

Hilfsbuch für die Elektrotechnik

Unter Mitwirkung namhafter Fachgenossen
bearbeitet und herausgegeben

von

Dr. Karl Strecker

Zehnte, umgearbeitete Auflage

Starkstromausgabe

Mit 560 Abbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1925

ISBN-13: 978-3-642-90446-2 e-ISBN-13: 978-3-642-92303-6
DOI: 10.1007/978-3-642-92303-6

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1925 by Julius Springer in Berlin.
Softcover reprint of the hardcover 10th edition 1925

Vorwort zur zehnten Auflage.

Das Hilfsbuch für die Elektrotechnik hatte sich in seinen ersten acht Auflagen als Ziel gesetzt, die gesamte Elektrotechnik zu behandeln. Infolge der raschen Entwicklung wurde die Lösung dieser Aufgabe immer schwieriger. Bei der neunten, in der Inflationszeit erscheinenden Auflage entschloß ich mich unter dem Druck der Notlage, das Hilfsbuch vorübergehend auf die Starkstromtechnik zu beschränken. Die Rückkehr wirtschaftlich günstigerer Verhältnisse veranlaßt mich, den alten Leitgedanken wieder aufzunehmen und die gesamte Elektrotechnik im Hilfsbuch zusammenzufassen. Entsprechend der Entwicklung der Starkstrom- und der Schwachstromtechnik und den zum Teil verschiedenen Käuferkreisen wird aber die zehnte Auflage in zwei getrennt käuflichen Teilen erscheinen, von denen der vorliegende Band den Starkstrom behandelt. Der etwa in Jahresfrist erscheinende zweite Band wird die Schwachstromtechnik, insbesondere das elektrische Nachrichtenwesen einschließlich der Funktelegraphie bringen. Der dann zu Verfügung stehende größere Raum wird gestatten, den Stoff wesentlich eingehender zu behandeln als in den früheren Auflagen.

Der vorliegende Starkstromband stellt sich dar als die Neubearbeitung der neunten Auflage unter Weglassung der drahtlosen Telegraphie, die, wie vorher bemerkt, dem Schwachstromband zugeteilt wird. Im ersten Teil ist ein Abschnitt über Nomographie (S. 18—23) zugefügt worden, die Abschnitte über Messungen an elektrischen Maschinen (S. 188—197), über Leitung und Verteilung (S. 458 bis 490), das Licht und seine Messung (S. 601—623) und Verteilung des Lichts (S. 630—643) sind ganz neu bearbeitet, alle anderen Abschnitte auf das sorgfältigste durchgesehen und erneuert worden. Der Umfang des Buches ist um 90 Seiten größer geworden, als bei der neunten Auflage, wenn man den Wegfall der drahtlosen Telegraphie in Rechnung setzt.

Auf reichliche Literaturangaben ist, wie in den früheren Auflagen, großer Wert gelegt worden.

Die elektrotechnischen Firmen haben mich wieder, besonders bei der Beschaffung der Abbildungen ausgeführter elektrischer Maschinen, in entgegenkommender Weise unterstützt, wofür ich hier verbindlich danke.

Heidelberg, Dezember 1924.

Strecker

Verzeichnis der Mitarbeiter und der von ihnen bearbeiteten Abschnitte.

- Bahl, J., Dipl.-Ing., Oberingenieur, Berlin (Siemens-Schuckertwerke). (893) bis (906).
- Benischke, G., Prof. Dr., Charlottenburg (Technische Hochschule). (976) bis (993).
- Bloch, L., Dr. Ing., Berlin (Osram-Versuchsstelle). (12)—(17), (278)—(282).
- Büttner, M., Dr., Direktor, Berlin (Gesellschaft f. elektrische Zugbeleuchtung). (297)—(300), (594)—(616), (670), (671), (869)—(876).
- Döry, I., Dr., Chefelektriker, Wien (AEG-Union-Werke). (755)—(803).
- Ely, O., Direktor, Nürnberg (Städt. Elektrizitätswerk). (631)—(642), (689) bis (706).
- Engelhardt, V., Prof., Direktor, Berlin (Siemens & Halske A.-G., Gesellschaft für Elektrostahlanlagen m. b. H.). (907)—(975).
- Görges, H., Geh. Hofrat, Prof. Dr. Ing., Dresden (Technische Hochschule). (301)—(593).
- Gumlich, E., Geh. Regierungsrat Prof. Dr., Charlottenburg. (28)—(43), (239)—(251).
- Jaeger, W., Geh. Reg.-Rat Prof. Dr., Charlottenburg (Phys.-Techn. Reichsanstalt). (148)—(161), (165), (166), (179)—(183).
- Lux, H., Dr., Ingenieur, Berlin. (863)—(868).
- Orlich, E., Geh. Regierungsrat Prof. Dr., Charlottenburg (Technische Hochschule). (162)—(164), (167)—(178), (184)—(238), (287)—(296).
- Petri, A., Direktor, Belgard a. d. Persante (Überlandzentrale). (745)—(754).
- Philippi, W., Prof. Dr. Ing., Direktor, Berlin (Siemens-Schuckertwerke). (720) bis (744).
- Sauer, J., Oberingenieur, Berlin (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft). (884) bis (892).
- Schendell, G., Abteilungsleiter beim Elektrizitätsverband Pommern, Stettin. (617)—(630), (683)—(688), (707)—(719).
- Schüler, L., Oberingenieur, Berlin (Dr. Paul Meyer A.-G.). (252)—(277).
- Schulz, W., Oberingenieur, Frankfurt a. M. (Prometheus). (877)—(883).
- v. Steinwehr, H., Oberregierungsrat Prof. Dr., Charlottenburg (Phys.-Techn. Reichsanstalt). (75)—(90).
- Teichmüller, J., Prof. Dr., Karlsruhe (Technische Hochschule). (643) bis (669), (672)—(675), (804)—(831), (850)—(862).
- Wagner, K. W., Präsident, Prof. Dr. Ing. eh. Dr., Berlin (Telegraphentechnisches Reichsamt). (8), (9), (44)—(74), (91)—(147).
- Wedding, W., Geh. Regierungsrat Prof. Dr., Charlottenburg (Technische Hochschule). (832)—(849).
- Zipp, H., Prof., Cöthen i. Anhalt (Friedrichs-Polytechnikum). (676)—(682).
- Der Herausgeber (1)—(7), (10), (11), (18)—(27), (283)—(286), Anhang.

Berichtigung. Auf S. 721, linke Spalte, Zeile 13 soll lauten:
 $\mu = 1/m$ (m Poissonsche Zahl) $\cdot \mu$

Inhaltsverzeichnis.

I. Teil. Allgemeine Hilfsmittel.

No.	I. Abschnitt. Tabellen, Formeln, Bezeichnungen.	Seite
1—7	Mathematik, Mechanik, Wärme. Querschnitt und Gewicht von Eisen- und Kupferdrähten 1. — Tafel zur Berechnung des Widerstandes von Drähten 2 u. 3. — Umwandlung komplexer Größen 4. — Vielfache von 0,735 5. — Mathematische Zeichen 6. — Näherungsformeln für das Rechnen mit kleinen Größen 7. — Tabelle der Werte von e^{-x} 8.	1
8, 9	Vektorenrechnung	9
10	Bezeichnungen	13
11	Englisches Gewicht und Maß	17
12—17	Nomographie	18
18, 19	Statik Zusammensetzung von Kräften 24. — Trägheitsmomente 25.	24
20, 21	Festigkeit	26
22	Dichte verschiedener Körper	29
23—27	Wärme Temperaturen, Wärmeleitung 31. — Spezifische Wärme, Verdampfungswärme, Ausdehnungskoeffizienten 32.	31

II. Abschnitt. Magnetismus und Elektrizität.

28—43	Magnetismus Magnetische Stoffe 33. — Verteilung des Magnetismus 33. — Herstellung der Magnete 33. — Äußerungen der magnetischen Kraft 34. — Magnetisches Feld. Kraftlinien 36. — Magnetische Eigenschaften von Eisensorten 41. — Hysterese 44. — Der magnetische Kreis 45. — Erdmagnetismus 47.	33
44—60	Das elektrische Feld Einheit der Elektrizitätsmenge 47. — Spannung 48. — Dielektrische Verschiebung 48. — Dielektrizitätskonstanten 48. — Dielektrischer Energieverlust 49. — Werte von Kapazitäten 51. — Gesamtenergie des elektrischen Feldes 54. — Mechanische Kräfte elektrischen Ursprungs 54. — Durchbruchfeldstärke und Durchschlagspannung, Gase 55. — Flüssigkeiten 56. — Feste Körper 57.	47
61—74	Der elektrische Strom a) Metallisch leitende Körper: Eingeprägte Feldstärke 59. — Ohmsches Gesetz 59. — Energieumsatz 59. — Potential 59. — Lineare Leiter 59. — Kirchhoffsche Sätze 60. — Widerstände ausgedehnter Leiter 60. — Temperatureinfluß 61. — Spezifischer Widerstand 61. — Joulesches Gesetz 64. — Thermoelektrische Kräfte 64.	59
75—90	b) Elektrolyte: Leitfähigkeit 65. — Dissoziation 66. — Gesetz von Faraday 66. — Überführungszahlen, Wanderung der Ionen 66. — Atom- und Äquivalentgewichte und elektrochemische Äquivalente 67. — Ionenbeweglichkeiten 67. — Zersetzungs- und Überspannung 68. — Polarisation und Depolarisation 68. — Umkehrbare Elektroden 69. — Berechnung elektromotorischer Kräfte 70.	
91—95	c) Isolierstoffe: Flüssigkeiten 71. — Feste Körper 72. — Durchgangswiderstand 74. — Temperatureinfluß 74. — Oberflächenwiderstand 75. — Wechselstromwiderstand 75.	
96—102	d) Gase: Selbständige und unselbständige Strömung 75. — Elektronenröhren 75. — Glimmentladung, Glimmverluste 77. — Lichtbogen 78.	
103—111	Das magnetische Feld elektrischer Ströme. Grundlegende Beziehungen 79. — Magnetische Umlaufspannung 79. — Vektorpotential 80. — Lineare Leiter 80. — Magnetische Energie 81. — Selbstinduktivitäten 82. — Gegeninduktivitäten 85. — Rasch veränderliche Felder 86. — Verschiebungsstrom 86.	79

No.		Seite
112—123	Das Induktionsgesetz Grundgesetz von Faraday-Maxwell 86. — Gegeninduktion zwischen Starkstrom- und Fernmeldeleitungen 88. — Lenzsches Gesetz 89. — Wirbelströme 89. — Wirksamer Widerstand 95. — Widerstandszuwachs eines Krüppelleiters 95.	86
124—127	Energiebeziehungen im elektromagnetischen Felde; mechanische Kräfte Feld linearer Ströme 96. — Mechanische Kräfte 96. — Energiestrom 97. — Elektromagnetische Wellen 98.	96
128—147	Veränderliche Ströme Wechselströme 99. — Sinusförmige Ströme 100. — Harmonische Komponenten eines Wechselstroms 101. — Darstellung durch Fouriersche Reihen 102. — Polardiagramm der Wechselstromgrößen 103. — Komplexe Rechnung 105. — Allgemeine Gleichungen des Wechselstromkreises 106. — Wichtige Stromkreise 107. — Ausgleichsvorgänge 111. — Regel von Heaviside 113. — Spannungs- und Stromvorgänge in Leitungen 114. — Kettenleiter 117.	99

II. Teil. Meßkunde.

I. Abschnitt. Elektrische Meßverfahren und Meßvorrichtungen.

148—151	Hilfsmittel bei den Messungen Genauigkeit 148. — Einige besondere Einrichtungen an Meßvorrichtungen (Zeiger- und Spiegelablesung, Dämpfung u. a.) 121.	120
152—166	Galvanometer Schwingungsdauer 122. — Dämpfung 122. — Empfindlichkeit 123. — Nadelgalvanometer 123. — Tangentenbussole usw. 124. — Astasie 124. — Panzergalvanometer 125. — Drehspulengalvanometer 125. — Saitengalvanometer 127. — Zeigergalvanometer 127. — Differentialgalvanometer 128. — Wahl eines passenden Galvanometers 129.	122
167—169	Dynamometer	130
170, 171	Das Telephon als Meßinstrument für Wechselströme, Vibrationsgalvanometer	130
172	Elektrokalorimeter Hitzdrahtinstrumente 131.	131
173—177	Elektrometer Messung mit dem Quadrantenelektrometer 133. — Direkt zeigende Elektrometer 133. — Elektrometer für hohe Spannung 134.	132
178	Schreibende Meßgeräte	134
179	Voltmeter Wasser- und Knallgasvoltmeter, Metallvoltmeter 135.	135
180—183	Normalelemente	136
184—195	Widerstände Herstellung und Formen 137. — Verfahren der Widerstandsmessung 139. — Widerstand aus Strom und Spannung 139. — Widerstandsmesser 139. — Wheatstonesche Brücke 140. — Kleine Widerstände 142. — Zersetzbare Leiter 142. — Untersuchung der Isolierstoffe 143.	137
196—203	Strom- und Spannungsmessung Regeln des VDE, Bezeichnungen der Instrumente 148. — Strommessung mit direkt zeigenden Apparaten 151. — Spannungsmessung mit direkt zeigenden Apparaten 151. — Potentialmessung 152. — Kompensationsmethode 152. — Kompensationsapparate 153. — Messung durch Funken-schlagweite 154.	148
204, 205	Messung einer Elektrizitätsmenge	155
206—217	Wechselstromwiderstände (Induktivitäten und Kapazitäten) Selbstinduktivitäten 156. — Gegeninduktivitäten 159. — Kapazitäten 160. — Dielektrizitätskonstante 162.	156
218—232	Wechselstrommessungen Leistung, Spannung, Strom 164. — Methoden der 3 Spannungs- und der 3 Strommesser 166. — Dynamometer 166. — Elektrometer 168. — Hitzdrahtapparate 169. — Weicheisenapparate 169. — Drehfeldmeßgeräte 169. — Spannungs- und Stromwandler 169. — Kompensationsmethode 171. — Phasenverschiebung 171. — Frequenz 172.	164

No.		Seite
233—235	Prüfung von Spannungs-, Strom- und Leistungsmessern	172
236—238	Aufnahme von Stromkurven und deren Analyse	173
239—251	Magnetische Messungen	176
	Magnetisches Moment 176. — Stärke der Magnetisierung 177. — Koorzivkraft 177. — Horizontalstärke des Erdmagnetismus 177. — Kraftlinien- menge 177. — Feldstärke 178. — Eisenuntersuchung 179. — Bei sehr kleinen Feldstärken 183. — Bei hoher Feldstärke 183. — Nullkurve 184. — Kom- mutierungskurve 184. — Dynamoblech 184. — Entmagnetisierung 187.	

II. Abschnitt. Technische Messungen.

252—277	Messungen an elektrischen Maschinen	188
	Arten der Messung und zu messende Größen 188. — Prüffeldeinrich- tung 188. — Umlaufende Maschinen: Antrieb und Belastung 189. — Reglung und Anlassen 189. — Widerstände 189. — Isolierfestigkeit 190. — Magnetische Messungen 190. — Spannung, Strom, Leistung 190. — Dreh- zahl 191. — Frequenz 191. — Schlüpfung 191. — Mechanische Leistung 192. — Drehmoment 194. — Wirkungsgrad 194. — Verluste 195. — Charakteristik 196. — Leistungsfaktor 196. — Kreisdiagramm 196. — Er- wärmung 196. — Transformatoren: Wirkungsgrad 197. — Spannungs- änderung 197. — Erwärmung 197.	
278—282	Messungen in elektrischen Anlagen	197
	Isolation 197. — Selbsttätige Meldung der Isolationsfehler 201. — Strom- und Spannung 202.	
283—286	Messungen an Erdleitungen	203
287—296	Verbrauchsmessung	205
	Elektrizitätszähler 205. — Elektrolytische Zähler 205. — Pendelzähler 206. — Motorzähler 206. — Induktionszähler 208. — Drehstromzähler 209. — Blindverbrauch 209. — Besondere Tarife 209. — Prüfung 210. — Gesetzliche Bestimmungen 211.	
297—300	Messungen an Sammlern (Akkumulatoren)	212
	EMK und Klemmenspannung 212. — Widerstand 212. — Arbeits- messung 213. — Spannungsverteilung 215.	

III. Teil. Starkstromtechnik.

I. Abschnitt. Elektromagnete.

301—306	Allgemeines	216
	Benennungen 216. — Querschnitt des Eisenkerns 166. — Wicklung 217. — Isolierende Umhüllung 217. — Erwärmung 217. — Formeln für die Wicklung 219.	
307—310	Der magnetische Kreis	220
	Unterteilung des Eisens 221. — Spulenfluß 221. — Streuung 222.	
311—313	Magnete	223
	Zugkraft 223. — Hubmagnete 223. — Lasthebemagnete 224.	
314—317	Drosselspule	225
	Vektor diagramme 225. — Verzerrung der Stromkurve 226. — Berechnung 226. — Überspannungen 227.	

II. Abschnitt. Transformatoren.

318—322	Benennungen. Grundlagen des Aufbaues	228
	Eisenkern 228. — Wicklung 229. — Isolation 230. — Äußerer Aufbau 230.	
323—325	Öltransformatoren	231
	Das Öl 231. — Hochspannungsklemmen 232. — Sicherheitsvorkehrungen 232. — Drehtransformator 233. — Verschiebbarer Transformator 234. — Streuung 234. — Spulenfaktoren 235. — Transformator diagramm 237. — Wirkungsgrad 239. — Verschiedene Arten der Transformatoren 239. — Schaltungen 242. — Meßwandler 243. — Frequenztransformatoren 243.	
326—346	Einzelheiten des Aufbaues. Transformatoren für verschiedene Zwecke	232
	Übersetzungsverhältnis 232.	

No.	III. Abschnitt. Dynamomaschinen.	Seite
347—387	Dynamomaschinen im allgemeinen	245
	Arten 245. — Mechanischer Aufbau 245. — Massenausgleich 247. — Schleuderprobe 247. — Schwungraddynamos 247. — Lager 248. — Schmierung 248. — Schenkel und Polschuhe 248. — Kühlung 250. — Anker: Wicklungen 251. — Isolation 252. — Hohe Spannung 252. — Nuten 253. — Befestigung auf der Welle 254. — Lüftung 254. — Anordnung der Wicklungen 255. — Kommutatorwicklung 256. — Durchmesser- und Schenwicklung 257. — Gangzahl 257. — Wicklungsformen 258. — Parallel arbeitende Wicklungsteile 260. — Ausgleichleitungen 260. — Schleifringe, Kommutator, Bürsten: Funkenbildung 262. — Bürstenhalter 263. — Bürsträger 264. — Kurzschließer 265. — Klemmen 265.	
388—416	Kommutatormaschinen	265
	Ankerrückwirkung 265. — Die magnetischen Felder 266. — Induktionsfluß 267. — Ankerstreuung 268. — Kompensierung des Ankerfeldes 268. — Wendepole 269. — Die Kommutierung 269. — Der zusätzliche Strom 272. — Die Strom- und Spannungsgleichungen 273. — Die Theorie 273. — Kommutierung mit und ohne Bürstenverschiebung 275. — Kommutierung bei Wechselstrom 276. — Mechanische Bedingungen für gute Kommutierung 277. — EMK 278. — Drehmoment 278. — Verluste und Wirkungsgrad 279. — Entwurf der Maschinen: Ausnutzungsgrad 280. — Strombelast 281. — Umfangsgeschwindigkeit 282. — Polzahl und Frequenz 282. — Magnetische Induktion 283. — Spannungen 283. — Normalform 283. — Lüftung 284.	
417—451	Gleichstromdynamos	284
	Unipolarmaschinen 284. — Kommutatormaschinen 285. — Hauptgleichungen 285. — Schaltungen 286. — Stromerzeuger: Angehen 287. — Charakteristiken 288. — Regulierwiderstände 290. — Besondere Maschinen 290. — Parallel- und Reihenschaltung 292. — Gleichstrommotoren: Generator und Motor 293. — Umsteuerung 294. — Der fremderregte Motor 294. — Geschwindigkeitsreglung 294. — Durchgehen 295. — Kritische Geschwindigkeit 296. — Verhalten des Nebenschluß- und des Reihenschlußmotors im Betrieb 296. — Anlassen und Anlasser 298.	
452—495	Wechselstrommaschinen	302
	Synchrone und asynchrone Generatoren 302. — Drehzahl und Polzahl 302. — Blechschnitt 302. — Pole 303. — Wicklungen und Schaltungen 304—308. — Ankerrückwirkung 308. — Ankerfeld 309. — Dämpfungswicklung 310. — Vorausberechnung der Kurve der EMK 310. — Glatte Anker 312. — Erregung 313. — Regulierwiderstände 314. — Sinusförmiger und nichtsinusförmiger Strom 314. — Wicklungsfaktoren 315. — Diagramme 316. — Charakteristiken 318. — Selbst- und Zusatzerrregung 318. — Kurzschluß der Ankerwicklung 319. — Hochfrequenzmaschinen 320. — Parallelbetrieb der Wechselstrommaschinen: Vorrichtung 321. — Leistungslinien 321. — Eigenschwingungen 322. — Erzwungene Schwingungen 323. — Resonanzmodul 323. — Dämpfung 323. — Ungleichförmigkeit 324. — Parallelbetrieb vieler Maschinen 325. — Regulatoren 325. — Parallelschalten und Hilfsmittel dazu 326.	
496—568	Wechselstrommotoren	328
	Arten der Motoren 328. — Synchronmotoren: Verhalten 328. — Vorzüge und Nachteile 329. — Klein-Synchronmotor 329. — Anlassen 329. — Induktionsmotoren: Arbeitsweise 331. — Aufbau 331. — Ständer 331. — Grenze der Spannung 331. — Schaltung und Klemmen 332. — Läufer 332. — Windungszahl 333. — Drehfeld bei Mehrphasenstrom 333. — Magnetische Induktion 335. — EMK, 335. — Streuung 336. — Wirkungsweise der Mehrphasenmotoren 337. — Heylandsches Kreisdiagramm 338. — Streukoeffizienten 338. — Schlüpfung 339. — Drehmoment 340. — Leistung 341. — Änderung der Umlaufzahl 343. — Kaskadenschaltungen 344. — Polumschaltung 344. — Anlassen 346. — Kompensierung des Blindstromes 350. — Der Induktionsmotor als Generator 351. — Der Induktionsmotor für Einphasenstrom 352. — Anlassen 352. — Kommutatormotoren für Wechselstrom: Einteilung und Schaltungen 354. — EMKe in der Kommutatorwicklung 355. — Drehmomente 357. — Arbeits- und Erregerwicklungen 357. — Kommutatormotoren für Drehstrom 358. — Diagramm des Drehstrom-Reihenschlußmotors 359. — Der allgemeine Induktionsmotor 360. — Regulierbare Induktionsmotoren 361. — Regulierung großer Induktionsmotoren 362. — Der Phasenschieber 362. — Kommutatormotoren für Einphasenstrom 364. — Diagramme des Einphasen-Induktionsmotors und des Reihenschlußmotors 366. — Verhalten des Motors von Latour, Winter und Eichberg 369. — Diagramm des Repulsionsmotors 370. — Elektrische Verstellung der magnetischen Achse 372. — Kommutierung 372. — Bauausführung der Wechselstrommotoren 373. — Frequenz 373.	

No.		Seite
569—580	Stromumformungen	374
	Arten 374. — Verhalten der Einanker-Umformer 374. — Bau 375. — Leistung 375. — Wirkungsgrad 376. — Regelung 376. — Anlassen 377. — Kaskadenumformer 377. — Vergleich zwischen Motorgenerator, Einanker- und Kaskadenumformer 378. — Gleichrichter 378. — Elektrolytischer und Quecksilberdampf-Gleichrichter 379.	
581—592	Regulierwiderstände und Anlasser	381
	Aufbau 381. — Selbsttätige, träge- und Eilregler 382. — Tirrillscher und BBC-Regler 383. — Bau 385. — Walzenschalter 386. — Flüssigkeits- und selbsttätige Anlasser 386. — Widerstandsmaterial 387. — Beanspruchung 387.	
593	Beispiele ausgeführter Dynamomaschinen und Transformatoren	388
	Übersicht 388. — Gleichstromgeneratoren 389. — Wechselstromgeneratoren 391. — Gleichstrommotoren 399. — Induktionsmotoren 400. — Wechselstromkommutatormotoren 403. — Motorgeneratoren 406. — Einankerumformer 410. — Kaskadenumformer 413. — Transformatoren 414. — Phasenschieber 418. — Quecksilberdampf-Gleichrichter 418.	
IV. Abschnitt. Sammler oder Akkumulatoren.		
594—607	I. Der Bleisammler	419
	Aufbau 419. — Chemischer Vorgang 419. — Eigenschaften des Sammlers 420. — Aufbau 422. — Tragbare Sammler 423. — Aufstellung und Bedienung einer Batterie 423.	
608—613	II. Der alkalische Sammler	427
	Chemischer Vorgang 427. — Aufbau 428. — Eigenschaften 428. — Bedienungsvorschriften 431.	
614—616	Technische Anwendung der Akkumulatoren	432
	Berechnung der Größe einer Batterie 433.	
V. Abschnitt. Das elektrische Kraftwerk.		
617—623	Kraftmaschinen	435
	Wahl 435. — Kolbendampfmaschinen 435. — Dampfturbinen 436. — Dampfkessel 437. — Nebenapparate 438. — Verbrennungsmaschinen 438. — Wasserkraftmaschinen 439.	
624—627	Anlage der Kraftwerke	440
	Grundstück 440. — Gebäude- und Maschinenanlagen 441. — Gleichstrom- und Drehstromwerke 441.	
628—630	Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke	442
	Betriebskosten 442. — Betriebsführung und Statistik 444. — Ausnutzung 444.	
631—642	Geschäftliche Bedingungen der Stromlieferung	447
	Stromlieferungsverträge 447. — Hausanschlüsse 447. — Inneneinrichtungen 448. — Zählergebühren 449. — Strompreise 450. — Tarife 451. — Soziale Staffeln 456. — Blind- und Leerlaufverbrauch 456.	
VI. Abschnitt. Leitung und Verteilung.		
643—646	Allgemeines	458
	Aufgaben der Leitung 458. — Die fünf Grundgrößen der Leitungsberechnung und deren Bedeutung 458.	
647—658	Gleichstromleitungen	461
	Die Grundgrößen 461. — Grundformel zur Berechnung auf Spannungsschwankung 462. — Einfacher Leitungsstrang 463. — Leitungsverzweigung 464. — Beiderseitig gespeister Leitungsstrang 465. — Stromverteilung 465. — Bestimmung der Stromverteilung in einem nur an den Knotenpunkten belasteten Leitungsnetz 465. — Bestimmung der Stromverteilung in einem beliebig belasteten Leitungsnetze 466. — Methoden zur Bestimmung der Stromverteilung 467. — Vorausberechnung eines Leitungsnetzes 467. — Speise- und Ausgleichleitungen 468. — Entwerfen des Leitungsnetzes 469.	
659—663	Wechselstromleitungen	469
	Die Grundgrößen 469. — Grundformeln zur Berechnung von Einphasenstromleitungen 470. — Einfacher Leitungsstrang und Leitungsnetz 470. — Drehstrom 473. — Dreieckschaltung 473.	
664—668	Mehrleitersysteme	473
	Dreileitersystem 474. — Drehstrom-Sternschaltung 475. — Spannungsteilung 476. — Allgemeine Formel für die Leitungsberechnung 476.	

No.		Seite
669—671	Energieverteilung mit Umformung Übertragung auf große Entfernung mit ein- und mehrmaliger Trans- formierung 477. — Umformung mittels Sammlerbatterien 478. — Anschluß- batterie 483. — Pufferung 484.	477
672—674	Erwärmung der Leitungen Leitungen für Hausinstallationen 486. — Unterirdisch verlegte Kabel 487.	486
675	Wirtschaftlichkeit der Leitungen Wirtschaftlich günstige Stromdichte und Spannung 489.	489
676—719	Ausführung von Anlagen im einzelnen Errichtungsvorschriften des VDE 490. — Gefahren und deren Ver- hütung 491. — Kabelleitungen: Verlegungsarten 491. — Bau- arten 493. — Strombelastung 493. — Kabelgaranturen 494. — Kabelkästen 496. — Freileitungen: Begriff und Verwendung 497. — Maste und Leitungssträger 497. — Isolatoren und Stützen 501. — Leitungsdraht 504. — Spannweite und Durchhang 504. — Schutzvorrichtungen 505. — Leitungen in Innenräumen: Blanke und isolierte Leitungen 507. — Leitungs- normen 508. — Ersatzstoffe 508. — Leitungsverlegung 509. — Offene Ver- legung 509. — Rohrverlegung 511. — Apparate in elektrischen Anlagen: Normen des VDE 515. — Aus- und Umschalter 516. — Steckvorrichtungen 518. — Fassungen 518. — Schmelzsicherungen für Installationen: Schraubsicherungen 520. — Patronensicherungen 521. — Normale und Mehrfachsicherungen 522. — Selbstschalter 524. — Prüfzeichen des VDE 524. — Apparate für Hochspannung: Schalter 526. — Überstromauslöser 527. — Sicherungen 530. — Meßwandler 530. Überspannungsschutzapparate 531. — Meßinstrumente 532. — Erdschluß- prüfer 532. — Erdschlußspule 532. — Schaltanlagen für Nieder- und für Hochspannung 533. — Schutzmaßnahmen in Hochspannungs- anlagen 540.	490

VII. Abschnitt. Elektrische Kraftübertragung.

720—724	Allgemeines Zweck und Vorteile 544. — Eigenschaften der wichtigsten Stromarten 544. — Leitungsanlage 545. — Regelung der Drehzahl der Mo- toren 545.	544
---------	---	-----

Sondergebiete der elektrischen Kraftübertragung.

725—731	I. Bergwerke Hauptschachtfördermaschinen 546. — Ventilatoren 548. — Wasser- haltungen 548. — Bohrmaschinen 549. — Grubenbahnen 549. — Schlag- wettergefährliche Grubenräume 550. — Sonstige Betriebe 550.	546
732—736	II. Hütten- und Walzwerke Kraftwerke 550. — Walzenstraßen 551. — Rollgänge 552. — Hoch- ofenaufzüge 552. — Sonstige Maschinen 552.	550
737—740	III. Hebezeuge Stromart 552. — Motorgröße 553. — Krane 553. — Aufzüge 554.	552
741—744	IV. Fabrikbetrieb Papierfabriken 555. — Werkzeugmaschinen 556. — Spinnereien 557. — Webereien 558.	555
745—754	V. Elektrischer Betrieb in der Landwirtschaft und Überland- zentralen Stromverbrauch 558. — Kleinkraft 559. — Dreschen 559. — Land- wirtschaftliche Industrie 562. — Pflügen 562. — Feldbahn 563. — Wirt- schaftlichkeit 563.	558
755—803	VI. Elektrische Bahnen Betriebsarten 565. — A. Kritik der Systeme: Fahrdrachtspannung 565. — Speisung und Verteilung 566. — Geschwindigkeitsregelung 566. — Nutzbremsung 567. — Wirtschaftlichkeit 567. — Zusammenfassung 567. — B. Betriebsmittel: Motorleistung 568. — Zugeinheit 568. — Antrieb der Fahrzeuge 569. — Schüttelerscheinungen 572. — Die Motoren und ihre Reglung 572. — Steuerungs- und Fahrzeugausrüstung 576. — Schalt- walzen 576. — Schütze 576. — Stromabnehmer 578. — Hochspannung 579. Nebenzwecke 579. — C. Speisung und Verteilung: Oberleitung 580. — Kettenaufhängung 581. — Festigkeit 582. — Dritte Schiene 582. — Unterirdische Stromzuführung 583. — Schienenverbindungen 583. — Ver- teilungsnetz 583. — Spannungsabfall 585. — Gleich- und Wechselstrom- Widerstände 587. — Isolation 590. — Kraftwerke 590. — Unterwerke 590.	565

Erster Teil.

Allgemeine Hilfsmittel.

Erster Abschnitt.

Tabellen, Formeln, Bezeichnungen.

Mathematik, Mechanik, Wärme.

(1) Querschnitt und Gewicht von Eisen- und Kupferdrähten.

Durchmesser mm	Querschnitt mm ²	Gewicht von 1000 m		Durchmesser mm	Querschnitt mm ²	Gewicht von 1000 m	
		Eisen kg	Kupfer kg			Eisen kg	Kupfer kg
0,05	0,002	0,02	0,02	1,6	2,01	15,6	17,8
0,10	0,008	0,06	0,07	1,7	2,27	17,7	20,1
0,15	0,018	0,14	0,17	1,8	2,54	19,8	22,6
0,20	0,031	0,24	0,28	1,9	2,84	22,1	25,1
0,25	0,049	0,38	0,44	2,0	3,14	24,4	27,9
0,30	0,071	0,55	0,63	2,2	3,80	29,6	33,7
0,35	0,096	0,75	0,85	2,4	4,52	35,2	40,0
0,40	0,126	0,98	1,12	2,6	5,31	41,3	47,0
0,45	0,159	1,24	1,41	2,8	6,16	47,9	54,7
0,50	0,196	1,53	1,74	3,0	7,07	55,0	62,5
0,55	0,238	1,85	2,11	3,2	8,04	63	72
0,60	0,283	2,20	2,51	3,4	9,08	71	81
0,65	0,332	2,58	2,95	3,6	10,18	79	90
0,70	0,385	2,99	3,42	3,8	11,34	88	100
0,75	0,442	3,43	3,90	4,0	12,57	98	112
0,80	0,503	3,9	4,5	4,2	13,85	108	123
0,85	0,567	4,4	5,0	4,4	15,21	118	132
0,90	0,636	4,9	5,7	4,6	16,62	129	147
0,95	0,709	5,5	6,3	4,8	18,10	141	160
1,00	0,785	6,1	7,0	5,0	19,63	153	174
1,1	0,950	7,4	8,4	5,2	21,24	165	189
1,2	1,131	8,8	10,0	5,4	22,90	178	202
1,3	1,327	10,3	11,8	5,6	24,63	192	218
1,4	1,539	12,0	13,7	5,8	26,42	205	234
1,5	1,767	13,7	15,6	6,0	28,27	220	251

(2)

Drahttafel für Drahtdurchmesser von 0,05 – 4,0 mm

Widerstand von

Draht- durchm. mm	Kupfer					Phosphor- und Siliziumbronze				
	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	0,025	0,030	0,04	0,05	0,06
0,05	8,15	8,66	9,17	9,68	10,19	12,73	15,3	20,4	25,5	30,6
0,10	2,04	2,16	2,29	2,42	2,55	3,18	3,8	5,1	6,4	7,6
0,15	0,91	0,96	1,02	1,07	1,13	1,41	1,70	2,26	2,83	3,4
0,20	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,80	0,95	1,27	1,59	1,91
0,25	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,51	0,61	0,81	1,02	1,22
0,30	0,226	0,240	0,255	0,269	0,283	0,354	0,424	0,566	0,707	0,849
0,40	0,127	0,135	0,143	0,151	0,159	0,199	0,239	0,318	0,398	0,477
0,50	0,081	0,087	0,092	0,097	0,102	0,127	0,153	0,204	0,255	0,306
0,60	0,057	0,060	0,064	0,067	0,071	0,088	0,106	0,141	0,177	0,212
0,70	0,042	0,044	0,047	0,049	0,052	0,065	0,078	0,104	0,130	0,156
0,80	0,0318	0,0338	0,0358	0,0378	0,0398	0,0497	0,060	0,080	0,099	0,119
1,00	0,0204	0,0216	0,0229	0,0242	0,0255	0,0318	0,038	0,051	0,064	0,076
1,2	0,0142	0,0150	0,0159	0,0168	0,0177	0,0221	0,0265	0,0354	0,0442	0,053
1,4	0,0104	0,0110	0,0117	0,0123	0,0130	0,0162	0,0195	0,0260	0,0325	0,039
1,6	0,0080	0,0085	0,0090	0,0095	0,0099	0,0124	0,0149	0,0199	0,0249	0,0298
2,0	0,0051	0,0054	0,0057	0,0060	0,0064	0,0080	0,0095	0,0127	0,0159	0,0191
2,5	0,00326	0,00346	0,00367	0,00387	0,00407	0,0051	0,0061	0,0081	0,0102	0,0122
3,0	0,00226	0,00240	0,00255	0,00269	0,00283	0,0035	0,0042	0,0057	0,0071	0,0085
3,5	0,00166	0,00177	0,00187	0,00197	0,00208	0,00260	0,00312	0,00416	0,0052	0,0062
4,0	0,00127	0,00135	0,00143	0,00151	0,00159	0,00199	0,00239	0,00318	0,0040	0,0048
Länge eines Drahtes von										
0,05	0,123	0,115	0,109	0,103	0,098	0,079	0,065	0,049	0,039	0,0327
0,10	0,49	0,46	0,44	0,41	0,39	0,314	0,262	0,196	0,157	0,131
0,15	1,11	1,04	0,98	0,93	0,88	0,71	0,59	0,44	0,35	0,295
0,20	1,96	1,85	1,75	1,65	1,57	1,26	1,05	0,79	0,63	0,52
0,25	3,07	2,89	2,73	2,58	2,45	1,96	1,64	1,23	0,98	0,82
0,30	4,4	4,2	3,9	3,7	3,5	2,83	2,36	1,77	1,41	1,18
0,40	7,9	7,4	7,0	6,6	6,3	5,03	4,19	3,14	2,51	2,09
0,50	12,3	11,5	10,9	10,3	9,8	7,85	6,54	4,91	3,93	3,27
0,60	17,6	16,6	15,7	14,9	14,1	11,3	9,4	7,1	5,7	4,7
0,70	24,0	22,6	21,4	20,3	19,2	15,4	12,8	9,6	7,7	6,4
0,80	31,4	29,6	27,9	26,4	25,1	20,1	16,8	12,6	10,1	8,4
1,00	49,1	46,2	43,6	41,3	39,3	31,4	26,2	19,6	15,7	13,1
1,2	71	66	63	59	57	45	37,7	28,3	22,6	18,8
1,4	96	90	86	81	77	62	51,3	38,5	30,8	25,7
1,6	126	118	112	106	101	80	67	50	40	33,5
2,0	196	185	175	165	157	126	105	79	63	52,4
2,5	307	289	273	258	245	196	164	123	98	82
3,0	442	416	393	372	353	283	236	177	141	118
3,5	601	566	535	506	481	385	321	241	192	160
4,0	785	739	698	661	628	503	419	314	251	209

und für spezifische Widerstände von 0,016–0,85.

1 m Draht in Ohm.

Messing, Platin, Eisen					Neusilber und andere Widerstandsmaterialien					Draht- durch- messer mm
0,07	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,85	
36	41	51	76	102	127	153	204	255	433	0,05
8,9	10,2	12,7	19,1	25,5	31,8	38	51	64	108	0,10
4,0	4,5	5,7	8,5	11,3	14,1	17,0	22,6	28,3	48	0,15
2,23	2,55	3,18	4,8	6,4	8,0	9,5	12,7	15,9	27,1	0,20
1,43	1,63	2,04	3,06	4,1	5,1	6,1	8,1	10,2	17,3	0,25
0,99	1,13	1,41	2,12	2,83	3,54	4,24	5,66	7,07	12,0	0,30
0,56	0,64	0,80	1,19	1,59	1,99	2,39	3,18	3,98	6,76	0,40
0,36	0,41	0,51	0,76	1,02	1,27	1,53	2,04	2,55	4,33	0,50
0,248	0,283	0,354	0,53	0,71	0,88	1,06	1,41	1,77	3,00	0,60
0,182	0,208	0,260	0,39	0,52	0,65	0,78	1,04	1,30	2,21	0,70
0,139	0,159	0,199	0,298	0,398	0,497	0,60	0,80	0,99	1,69	0,80
0,089	0,102	0,127	0,191	0,255	0,318	0,38	0,51	0,64	1,08	1,00
0,062	0,071	0,088	0,133	0,177	0,221	0,265	0,354	0,442	0,75	1,2
0,045	0,052	0,065	0,097	0,130	0,162	0,195	0,260	0,325	0,55	1,4
0,0348	0,0398	0,0497	0,075	0,099	0,124	0,149	0,199	0,249	0,423	1,6
0,0223	0,0255	0,0318	0,048	0,064	0,080	0,095	0,127	0,159	0,271	2,0
0,0143	0,0163	0,0204	0,0305	0,0407	0,051	0,061	0,081	0,102	0,173	2,5
0,0099	0,0113	0,0141	0,0212	0,0283	0,035	0,042	0,057	0,071	0,120	3,0
0,0073	0,0083	0,0104	0,0156	0,0208	0,0260	0,0312	0,0416	0,052	0,088	3,5
0,0056	0,0064	0,0080	0,0119	0,0159	0,0199	0,0239	0,0318	0,040	0,068	4,0
1 Ohm Widerstand in Metern.										
0,0280	0,0245	0,0196	0,0131	0,0098	0,0079	0,0065	0,0049	0,0039	0,0023	0,05
0,112	0,098	0,079	0,052	0,039	0,0314	0,0262	0,0196	0,0157	0,0092	0,10
0,252	0,221	0,177	0,118	0,088	0,071	0,059	0,044	0,035	0,0208	0,15
0,45	0,39	0,314	0,209	0,157	0,126	0,105	0,079	0,063	0,0370	0,20
0,70	0,61	0,49	0,327	0,245	0,196	0,164	0,123	0,098	0,0578	0,25
1,01	0,88	0,71	0,47	0,35	0,283	0,236	0,177	0,141	0,083	0,30
1,80	1,57	1,26	0,84	0,63	0,503	0,419	0,314	0,251	0,148	0,40
2,80	2,45	1,96	1,31	0,98	0,785	0,654	0,491	0,393	0,231	0,50
4,0	3,53	2,83	1,88	1,41	1,13	0,94	0,71	0,57	0,332	0,60
5,5	4,81	3,85	2,57	1,92	1,54	1,28	0,96	0,77	0,453	0,70
7,2	6,3	5,0	3,25	2,51	2,01	1,68	1,26	1,01	0,592	0,80
11,2	9,8	7,9	5,24	3,93	3,14	2,62	1,96	1,57	0,924	1,00
16,2	14,1	11,3	7,5	5,7	4,5	3,77	2,83	2,26	1,33	1,2
22,0	19,2	15,4	10,3	7,7	6,2	5,13	3,85	3,08	1,81	1,4
28,7	25,1	20,1	13,4	10,1	8,0	6,7	5,0	4,0	2,37	1,6
44,9	39,2	31,4	20,9	15,7	12,6	10,5	7,9	6,3	3,7	2,0
70	61	49	32,7	24,5	19,6	16,4	12,3	9,8	5,8	2,5
101	88	71	47,1	35,3	28,3	23,6	17,7	14,1	8,3	3,0
137	120	96	64	48	38,5	32,1	24,1	19,2	11,3	3,5
180	157	126	84	63	50,3	41,9	31,4	25,1	14,8	4,0

(3) Umwandlung komplexer Größenaus der Form $c \cdot e^{-\varphi}$ in die Form $a + bi$ und umgekehrt.Gebrauch der Tafel s. S. 5. — Zur Abkürzung ist gesetzt O_3195 für $O00195$.
Nographisches Verfahren s. S. 22.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00		0 ₆ 50 0,057	0 ₅ 200 0,115	0 ₅ 450 0,172	0 ₅ 800 0,229	0 ₄ 125 0,287	0 ₄ 180 0,344	0 ₄ 245 0,401	0 ₄ 320 0,458	0 ₄ 405 0,516
0,01	0 ₄ 50 0,57	0 ₄ 61 0,63	0 ₄ 72 0,69	0 ₄ 85 0,74	0 ₄ 98 0,80	0 ₃ 113 0,86	0 ₃ 128 0,92	0 ₃ 145 0,97	0 ₃ 162 1,03	0 ₃ 181 1,09
0,02	0 ₃ 200 1,15	0 ₃ 221 1,20	0 ₃ 242 1,26	0 ₃ 265 1,32	0 ₃ 288 1,37	0 ₃ 313 1,43	0 ₃ 338 1,49	0 ₃ 365 1,55	0 ₃ 392 1,60	0 ₃ 421 1,66
0,03	0 ₃ 45 1,72	0 ₃ 48 1,78	0 ₃ 51 1,83	0 ₃ 55 1,89	0 ₃ 58 1,95	0 ₃ 61 2,00	0 ₃ 65 2,06	0 ₃ 69 2,12	0 ₃ 72 2,18	0 ₃ 76 2,23
0,04	0 ₃ 80 2,29	0 ₃ 84 2,35	0 ₃ 88 2,41	0 ₃ 93 2,46	0 ₃ 97 2,52	00101 2,58	00106 2,63	00111 2,69	00115 2,75	00120 2,81
0,05	00125 2,86	00130 2,92	00135 2,98	00141 3,03	00146 3,09	00151 3,15	00157 3,21	00163 3,26	00168 3,32	00174 3,38
0,06	00180 3,43	00186 3,49	00192 3,55	00199 3,60	00205 3,66	00211 3,72	00218 3,78	00225 3,83	00231 3,89	00238 3,95
0,07	00245 4,00	00252 4,06	00259 4,12	00266 4,18	00274 4,23	00281 4,29	00288 4,35	00296 4,40	00303 4,46	00311 4,52
0,08	00319 4,57	00328 4,63	00336 4,69	00344 4,74	00352 4,80	00361 4,86	00369 4,92	00378 4,97	00386 5,04	00395 5,09
0,09	00404 5,14	00413 5,20	00422 5,26	00432 5,31	00441 5,37	00450 5,43	00460 5,48	00469 5,54	00479 5,60	00489 5,65
0,1	0050 5,71	0060 6,28	0072 6,84	0084 7,41	0098 7,97	0112 8,53	0127 9,09	0143 9,65	0161 10,20	0179 10,76
0,2	0198 11,3	0218 11,9	0239 12,4	0261 13,0	0284 13,5	0308 14,0	0332 14,6	0358 15,1	0384 15,6	0412 16,2
0,3	044 16,7	047 17,2	050 17,7	053 18,3	056 18,8	059 19,3	063 19,8	066 20,3	070 20,8	073 21,3
0,4	077 21,8	081 22,3	085 22,8	089 23,3	093 23,7	097 24,2	101 24,7	105 25,2	109 25,6	114 26,1
0,5	118 26,6	123 27,0	127 27,5	132 27,9	137 28,4	141 28,8	146 29,3	151 29,7	156 30,1	161 30,5
0,6	166 31,0	171 31,4	177 31,8	182 32,2	187 32,6	193 33,0	198 33,4	204 33,8	209 34,2	215 34,6
0,7	221 35,0	226 35,4	232 35,8	238 36,1	244 36,5	250 36,9	256 37,2	262 37,6	268 38,0	274 38,3
0,8	281 38,7	287 39,0	293 39,4	300 39,7	306 40,0	312 40,4	319 40,7	326 41,0	332 41,4	339 41,7
0,9	345 42,0	352 42,3	359 42,6	366 42,9	372 43,2	379 43,5	386 43,8	393 44,1	400 44,4	407 44,7

Gebrauch der Tafel (3).

Die linke und die obere Randspalte enthalten die Ziffern eines echten Dezimalbruchs d mit 3 oder 2 Dezimalstellen. Jedes Viereck enthält in der oberen Zahl die Dezimalstellen des Wertes $\sqrt{1+d^2}=1, \dots$ und darunter einen Winkel φ .

Übergang von der Form

$a \pm ib$ zu $c \cdot e^{\pm i\varphi}$	$c \cdot e^{\pm i\varphi}$ zu $a \pm ib$
$a > b$	$\varphi < 45^\circ$
Zu $b/a = d$ ($9,2/20,4 = 0,45$) gibt die Tafel φ und $\sqrt{1+(b/a)^2}$; letzteres mit a multipliziert ist $c = \sqrt{a^2+b^2}$ $20,4 - 9,2i = 20,4 \cdot 1,097 \cdot e^{-24,2^\circ i}$ $= 22,4 \cdot e^{-24,2^\circ i}$	Über φ steht in der Tafel $\sqrt{1+(b/a)^2}$; dies in c dividiert ist a . Die Randspalten geben b/a , welches mit a multipliziert b liefert. $22,4 \cdot e^{-24,2^\circ i} = \frac{22,4}{1,097} - 0,45 \cdot \frac{22,4}{1,097} i$ $= 20,4 - 9,2 i$
$a < b$	$\varphi > 45^\circ$
Zu $a/b = d$ ($9,2/20,4 = 0,45$) gibt die Tafel einen Winkel, der von 90° zu subtrahieren ist, um φ zu erhalten. $\sqrt{1+(a/b)^2}$ aus der Tafel gibt mit b multipliziert c . $9,2 - 20,4 i = 20,4 \cdot 1,097 \cdot e^{-65,8^\circ i}$ $= 22,4 \cdot e^{-65,8^\circ i}$	φ wird von 90° subtrahiert, über dem so erhaltenen Winkel steht in der Tafel $\sqrt{1+(a/b)^2}$; dies in c dividiert ist b . Die Randspalten geben a/b , welches mit b multipliziert a liefert. $22,4 \cdot e^{-65,8^\circ i} = -\frac{22,4}{1,097} i + \frac{22,4}{1,097} \cdot 0,45$ $= 9,2 - 20,4 i$

(4)**Vielfache von 0,735**

zur Umrechnung von Pferdestärken in Kilowatt.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		0,74	1,47	2,21	2,94	3,68	4,41	5,15	5,88	6,62
1	7,35	8,09	8,82	9,56	10,29	11,03	11,76	12,50	13,23	13,97
2	14,70	15,44	16,17	16,91	17,64	18,38	19,11	19,85	20,58	21,32
3	22,05	22,79	23,52	24,26	25,00	25,73	26,46	27,20	27,94	28,67
4	29,40	30,14	30,87	31,61	32,34	33,08	33,81	34,55	35,28	36,02
5	36,75	37,49	38,22	38,96	39,69	40,43	41,16	41,90	42,63	43,37
6	44,10	44,84	45,57	46,31	47,04	47,78	48,51	49,25	49,98	50,72
7	51,45	52,19	52,92	53,66	54,39	55,13	55,86	56,60	57,33	58,07
8	58,80	59,54	60,27	61,01	61,74	62,48	63,21	63,95	64,68	65,42
9	66,15	66,89	67,62	68,36	69,09	69,83	70,56	71,30	72,03	72,77
10	73,50	74,24	74,97	75,71	76,44	77,18	77,91	78,65	79,38	80,12
11	80,85	81,59	82,32	83,06	83,79	84,53	85,26	86,00	86,73	87,47
12	88,20	88,94	89,67	90,41	91,14	91,88	92,61	93,35	94,08	94,82
13	95,55	96,29	97,02	97,76	98,49	99,23	99,96	100,7	101,4	102,2
14	102,9	103,6	104,4	105,1	105,8	106,6	107,3	108,1	108,8	109,5
15	110,3	111,0	111,7	112,5	113,2	113,9	114,7	115,4	116,1	116,9
16	117,6	118,3	119,1	119,8	120,5	121,3	122,0	122,8	123,5	124,2
17	125,0	125,7	126,4	127,2	127,9	128,6	129,4	130,1	130,8	131,6
18	132,3	133,0	133,8	134,5	135,2	136,0	136,7	137,5	138,2	138,9
19	139,7	140,4	141,1	141,9	142,6	143,3	144,1	144,8	145,5	146,3

(5) Mathematische Zeichen des AEF

(Dinorm 1302; Nr. 41 bis 54 noch nicht endgültig.)

Nr.	Zeichen	Bedeutung	Nr.	Zeichen	Bedeutung
1.	1. 1)	erstens			an dessen Ende noch ein kurzer senkrechter Strich angesetzt werden kann
2.	()	Numerierung von Formeln			
3.	‰, vH	Hundertel, vom Hundert, Prozent	22.		Determinante
4.	‰, vT	Tausendtel, vom Tausend, Promille	23.		Betrag einer reellen oder komplexen Größe
5.	/	in 1, für 1, auf 1 usw., pro, je	24.	!	Fakultät
6.	() [] { }	Klammer	25.	∠	endliche Zunahme
7.	,	Dezimalzeichen; Komma unten oder Punkt oben. Zur Gruppenabteilung bei größeren Zahlen sind weder Komma noch Punkt, sondern Zwischenräume zu verwenden	26.	d	vollständiges Differential
			27.	∂	partielles Differential
			28.	δ	Variation, virtuelle Änderung
			29.	đ	Diminutiv
8.	+	plus, mehr, und	30.	Σ	Summe von; Grenzbezeichnungen sind unter und über das Zeichen zu setzen. Die Summationsvariable wird unter das Zeichen gesetzt
9.	-	minus, weniger			
10.	· ×	mal, multipliziert mit. Der Punkt steht auf halber Zeilenhöhe. Das Multiplikationszeichen darf weggelassen werden	31.	∫	Integral
			32.		parallel
			33.	≠	gleich und parallel
			34.	⊥	rechtwinklig zu
11.	: / -	geteilt durch	35.	△	Dreieck
12.	=	gleich	36.	≅	kongruent
13.	≡	identisch mit	37.	~	ähnlich, proportional
14.	≠	nicht gleich	38.	∠	Winkel
15.	≈	nahezu gleich, rund, etwa	39.	AB	Strecke AB
16.	<	kleiner als	40.	⌒	Bogen AB
17.	>	größer als	41.	...	bis: 11 ... 15 = 12 bis 15 usw. (unbegrenzt): $\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \dots = 1$
18.	≪	klein gegen			
19.	≫	groß gegen			
20.	∞	unendlich	42.	≠	nicht identisch gleich
21.	√	Wurzelzeichen, das Zeichen √ erhält einen oben angesetzten wagerechten Strich,	43.	↑↑	parallel und gleichgerichtet
			44.	↑↓	parallel und entgegengesetzt

Nr.	Zeichen	Bedeutung	Nr.	Zeichen	Bedeutung
45.	\rightarrow	$x \rightarrow a$, x gegen a , x nähert sich a , x strebt nach a , x konvergiert nach a , dasselbe wie $\lim x = a$, a ist der Grenzwert von x .	50.	sin, cos,	trigonometrische Funktionen
		$f(x) \rightarrow$ für $x \rightarrow a$, dasselbe wie $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = b$		tg	$\sin^n \alpha \equiv (\sin \alpha)^n$
				ctg	$\sin^{-1} \alpha \equiv \frac{1}{\sin \alpha}$, $\equiv \text{arc sin } \alpha$
46.	log	Logarithmus: $a \log =$ Logarithmus zur Basis a .	51.	arc sin, arc cos, arc tg, arc ctg	zyklometrische Funktionen
47.	lg	Briggscher Logarithmus: $\lg x = {}^{10} \log x$	52.	Sh, Cof, Ig, Ctg	hyperbolische Funktionen
48.	ln	natürlicher Logarithmus: $\ln x = e \log x$	53.	Ar Sin, Ar Cos, Ar Ig, Ar Ctg	deren Umkehrung
49.	o, ' "	Winkelzeichen: Grad, Minute = $1/60$ Grad, Sekunde = $1/60$ Minute $32^\circ 15' 13''$, 40	54.	$\int_a^b f(x) dx$	

Außerdem wird benutzt:

In England üblich:

55.	\oint	Linienintegral, Integral über einen in sich geschlossenen Weg.	56.	\div	dividiert durch
			57.	\therefore	also, Folgerung
			58.	\therefore	weil, Begründung

(6) Näherungsformeln für das Rechnen mit kleinen Größen.

d und δ bedeuten gegen 1 bzw. φ sehr kleine Größen; δ und φ im Bogenmaß.

$$(1 \pm d)^m = 1 \pm m d, \text{ für jedes reelle } m.$$

$$\frac{1 \pm d_1}{1 \pm d_2} = 1 \pm d_1 \mp d_2 \quad (1 \pm d_1)(1 \pm d_2) = 1 \pm d_1 \pm d_2$$

$\sin \delta = \delta - 1/6 \delta^3$	$\text{arc sin } \delta = \delta + 1/6 \delta^3$	$\sin (\varphi \pm \delta) = \sin \varphi \pm \delta \cos \varphi$
$\cos \delta = 1 - 1/2 \delta^2$	$\text{arc cos } \delta = \frac{\pi}{2} - \delta - 1/6 \delta^3$	$\cos (\varphi \pm \delta) = \cos \varphi \mp \delta \sin \varphi$
$\text{tg } \delta = \delta + 1/3 \delta^3$	$\text{arc tg } \delta = \delta - 1/5 \delta^3$	$\text{tg } (\varphi \pm \delta) = \text{tg } \varphi \pm \frac{\delta}{\cos^2 \varphi}$
$\text{ctg } \delta = \frac{1}{\delta} - 1/3 \delta$	$\text{arc ctg } \delta = \frac{\pi}{2} - \delta + 1/5 \delta^3$	$\text{ctg } (\varphi \pm \delta) = \text{ctg } \varphi \mp \delta (\text{ctg}^2 \varphi + 1)$

$$a^d = 1 + d \log \text{ nat } a \quad \log \text{ nat } (1 \pm d) = \pm d - 1/2 d^2.$$

$$\log \text{ nat } \frac{1+d}{1-d} = 2d (1 + 1/3 d^2)$$

(7)

Werte von e^{-x} .

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00 .	0, . . .	9990	9980	9970	9960	9950	9940	9930	9920	9910
0,01 .	9900	9891	9881	9871	9861	9851	9841	9831	9822	9812
0,02 .	9802	9792	9782	9773	9763	9753	9743	9734	9724	9714
0,03 .	9704	9695	9685	9675	9666	9656	9646	9637	9627	9618
0,04 .	9608	9598	9589	9579	9570	9560	9550	9541	9531	9522
0,05 .	9512	9503	9493	9484	9474	9465	9455	9446	9437	9427
0,06 .	9418	9408	9399	9389	9380	9371	9361	9352	9343	9333
0,07 .	9324	9315	9305	9296	9287	9277	9268	9259	9250	9240
0,08 .	9231	9222	9213	9204	9194	9185	9176	9167	9158	9148
0,09 .	9139	9130	9121	9112	9103	9094	9085	9076	9066	9057
0,10 .	9048	9039	9030	9021	9012	9003	8994	8985	8976	8967
0,11 .	0,8958	8949	8940	8932	8923	8914	8905	8896	8887	8878
0,12 .	8869	8860	8851	8843	8834	8825	8816	8807	8799	8790
0,13 .	8781	8772	8763	8755	8746	8737	8728	8720	8711	8702
0,14 .	8694	8685	8676	8668	8659	8650	8642	8633	8624	8616
0,15 .	8607	8598	8590	8581	8573	8564	8556	8547	8538	8530
0,16 .	8521	8513	8504	8496	8487	8479	8470	8462	8454	8445
0,17 .	8437	8428	8420	8411	8403	8395	8386	8378	8369	8361
0,18 .	8353	8344	8336	8328	8319	8311	8303	8294	8286	8278
0,19 .	8270	8261	8253	8245	8237	8228	8220	8212	8204	8195
0,2 .	0,8187	8106	8025	7945	7866	7788	7711	7634	7558	7483
0,3 .	7408	7334	7261	7189	7118	7047	6977	6907	6839	6771
0,4 .	6703	6637	6570	6505	6440	6376	6313	6250	6188	6126
0,5 .	6065	6005	5945	5886	5827	5769	5712	5655	5599	5543
0,6 .	0,5488	5434	5379	5326	5273	5220	5169	5117	5066	5016
0,7 .	4966	4916	4868	4819	4771	4724	4677	4630	4584	4538
0,8 .	4493	4449	4404	4360	4317	4274	4232	4190	4148	4107
0,9 .	4066	4025	3985	3946	3906	3867	3829	3791	3753	3716
1,0 .	3679	3642	3606	3570	3534	3499	3465	3430	3396	3362
1,1 .	0,3329	3296	3263	3230	3198	3166	3135	3104	3073	3042
1,2 .	3012	2982	2952	2923	2894	2865	2837	2808	2780	2753
1,3 .	2725	2698	2671	2645	2618	2592	2567	2541	2516	2491
1,4 .	2466	2441	2417	2393	2369	2346	2322	2299	2276	2254
1,5 .	2231	2209	2187	2165	2144	2122	2101	2080	2060	2039
1,6 .	0,2019	1999	1979	1959	1940	1920	1901	1882	1864	1845
1,7 .	1827	1809	1791	1773	1755	1738	1720	1703	1676	1670
1,8 .	1653	1637	1620	1604	1588	1572	1557	1541	1526	1511
1,9 .	1496	1481	1466	1451	1437	1423	1409	1395	1381	1367

Werte von $10^6 \cdot e^{-x}$.

2	135336	6	2478,8	10	45,400	14	0,83153	18	0,015230
3	49787	7	911,9	11	16,702	15	0,30590	19	0,005603
4	18316	8	335,5	12	6,144	16	0,11253	20	0,002612
5	6738	9	123,4	13	2,260	17	0,04140	21	0,000758

Beispiel für Zwischenwerte: $e^{-5,175} = e^{-5} \cdot e^{-0,175} = 10^{-6} \cdot 6738 \cdot 0,8395 = 0,005657$.

Die Vektorenrechnung.

Ein Vektor ist bestimmt durch die Angabe seines Betrags und seiner Richtung. Gehört zu jedem Punkte eines Raumes ein bestimmter Vektor, so nennt man den Raum ein Vektorfeld. Durch alle Punkte eines Vektorfeldes lassen sich, soweit es stetig ist, Linien ziehen, deren Richtung überall die Richtung des zu dem betreffenden Punkte gehörigen Vektors angibt (Vektorlinien). Niveauflächen, das sind Flächen, die von den Vektorlinien überall senkrecht durchkreuzt werden, lassen sich außer in wirbelfreien (lamellaren) Feldern nur in solchen Feldern angeben, wo der Vektor überall senkrecht auf seinem Wirbel steht (komplexlamellare oder geschichtete Felder).

(8) Begriffe und Formeln aus der Vektoralgebra und der Vektoranalysis.

Inneres Produkt $\mathfrak{A} \mathfrak{B} = (\mathfrak{A} \mathfrak{B}) = |\mathfrak{A}| |\mathfrak{B}| \cos(\mathfrak{A}, \mathfrak{B})$;

äußeres Produkt $[\mathfrak{A} \mathfrak{B}]$ hat den Betrag $|[\mathfrak{A} \mathfrak{B}]| = |\mathfrak{A}| |\mathfrak{B}| \sin(\mathfrak{A}, \mathfrak{B})$
= Flächeninhalt des aus \mathfrak{A} , \mathfrak{B} gebildeten Parallelogramms.

Das innere Produkt ist ein Skalar (einfache Zahl); das äußere ein auf der Ebene \mathfrak{A} , \mathfrak{B} senkrecht stehender Vektor. Der durch die Reihenfolge \mathfrak{A} , \mathfrak{B} bestimmte Umlaufsinn des Parallelogramms und die Richtung des äußeren Produkts ordnen sich einander zu wie der Drehsinn und der Fortschreitungsinn einer Rechtsschraube.

Rechnungsregeln: $\mathfrak{A}(\mathfrak{B} + \mathfrak{C} + \dots) = \mathfrak{A}\mathfrak{B} + \mathfrak{A}\mathfrak{C} + \dots$

$$[\mathfrak{A}, \mathfrak{B} + \mathfrak{C} + \dots] = [\mathfrak{A}\mathfrak{B}] + [\mathfrak{A}\mathfrak{C}] + \dots$$

$$\mathfrak{A}\mathfrak{B} = \mathfrak{B}\mathfrak{A}$$

$$[\mathfrak{A}\mathfrak{B}] = -[\mathfrak{B}\mathfrak{A}]$$

Mehrfache Produkte.

$\mathfrak{A}[\mathfrak{B}\mathfrak{C}] = \mathfrak{B}[\mathfrak{C}\mathfrak{A}] = \mathfrak{C}[\mathfrak{A}\mathfrak{B}] =$ Rauminhalt des aus \mathfrak{A} , \mathfrak{B} , \mathfrak{C} gebildeten Quaders.

$$[\mathfrak{A}[\mathfrak{B}\mathfrak{C}]] = \mathfrak{B} \cdot \mathfrak{A}\mathfrak{C} - \mathfrak{C} \cdot \mathfrak{A}\mathfrak{B}$$

$$[\mathfrak{A}\mathfrak{B}][\mathfrak{C}\mathfrak{D}] = \mathfrak{A}\mathfrak{C} \cdot \mathfrak{B}\mathfrak{D} - \mathfrak{A}\mathfrak{D} \cdot \mathfrak{B}\mathfrak{C}$$

$$[[\mathfrak{A}\mathfrak{B}][\mathfrak{C}\mathfrak{D}]] = \mathfrak{C} \cdot [\mathfrak{B}\mathfrak{D}]\mathfrak{A} - \mathfrak{D} \cdot [\mathfrak{B}\mathfrak{C}]\mathfrak{A}$$

$$[\mathfrak{A}[\mathfrak{B}[\mathfrak{C}\mathfrak{D}]]] = \mathfrak{B}\mathfrak{D} \cdot [\mathfrak{A}\mathfrak{C}] - \mathfrak{B}\mathfrak{C} \cdot [\mathfrak{A}\mathfrak{D}]$$

Zerlegung eines Vektors \mathfrak{A} in Komponenten \parallel und \perp zu n ($n^2=1$):

$$\mathfrak{A} = n \cdot \mathfrak{A}n + [n[\mathfrak{A}n]].$$

Differentiale. $d(\mathfrak{A}\mathfrak{B}) = \mathfrak{A}d\mathfrak{B} + \mathfrak{B}d\mathfrak{A}$

$$d[\mathfrak{A}\mathfrak{B}] = [\mathfrak{A}d\mathfrak{B}] + [d\mathfrak{A}, \mathfrak{B}] = [\mathfrak{A}d\mathfrak{B}] - [\mathfrak{B}d\mathfrak{A}].$$

Differentialquotienten. Ist V ein Raumteil, F seine Oberfläche, df ein Oberflächenelement, n ein die äußere Normalenrichtung dieses Elements anzeigender Einheitsvektor (Betrag 1), $df = n df$ also der Vektor des Oberflächenelements, so ist¹⁾

$$\text{der Gradient von } p = \text{grad } p = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_F p df,$$

$$\text{die Divergenz von } \mathfrak{A} = \text{div } \mathfrak{A} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_F \mathfrak{A} df,$$

$$\text{der Rotor (Wirbel) von } \mathfrak{A} = \text{rot } \mathfrak{A} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_F [df \mathfrak{A}].$$

$\text{grad } p$ ist ein Vektor, dessen Komponente nach irgendeiner Richtung s den Anstieg $\partial p / \partial s$ der skalaren Größe p in der Richtung s angibt.

¹⁾ W. v. Ignatowsky, Die Vektoranalysis. Leipzig 1909. — J. Spielrein, Lehrbuch d. Vektorrechnung, Stuttgart 1916, S. 77 ff.

div \mathfrak{A} ist der aus der (unendlich kleinen) Volumeinheit austretende Fluß des Vektors \mathfrak{A} und somit ein Maß für die Zahl der in der Volumeinheit entspringenden \mathfrak{A} -Linien.

rot \mathfrak{A} ist ein Vektor. Deutet man \mathfrak{A} als Kraft, so ist die Komponente von rot \mathfrak{A} nach irgendeiner Richtung die mechanische Arbeit, die bei einem vollständigen Umlauf um eine senkrecht zu jener Richtung stehende (unendlich kleine) Flächeneinheit durch \mathfrak{A} geleistet wird¹⁾.

$$(\mathfrak{A} \text{ grad}) \mathfrak{B} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\mathfrak{A}}{V} \int_F df \cdot \mathfrak{B}$$

ist ein Vektor, der die mit $|\mathfrak{A}|$ multiplizierte Änderung angibt, die \mathfrak{B} erfährt, wenn man in der Richtung von \mathfrak{A} um die Längeneinheit fortschreitet.

$$\mathcal{A}p = \text{div grad } p$$

$$\mathcal{A}\mathfrak{A} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_F (df \text{ grad}) \mathfrak{A}.$$

Rechnungsregeln. rot grad $p = 0$

$$\text{div rot } \mathfrak{A} = 0$$

$$\text{grad } \mathfrak{A} \mathfrak{B} = (\mathfrak{A} \text{ grad}) \mathfrak{B} + (\mathfrak{B} \text{ grad}) \mathfrak{A} + [\mathfrak{A} \text{ rot } \mathfrak{B}] + [\mathfrak{B} \text{ rot } \mathfrak{A}]$$

$$\text{div } [\mathfrak{A} \mathfrak{B}] = \mathfrak{B} \text{ rot } \mathfrak{A} - \mathfrak{A} \text{ rot } \mathfrak{B}$$

$$\text{rot } [\mathfrak{A} \mathfrak{B}] = (\mathfrak{A} \text{ grad}) \mathfrak{B} - (\mathfrak{B} \text{ grad}) \mathfrak{A} + \mathfrak{B} \text{ div } \mathfrak{A} - \mathfrak{A} \text{ div } \mathfrak{B}$$

$$\text{div } \mathfrak{A} p = \mathfrak{A} \text{ grad } p + p \text{ div } \mathfrak{A}$$

$$\text{rot } \mathfrak{A} p = -[\mathfrak{A} \text{ grad } p] + p \text{ rot } \mathfrak{A}$$

$$\text{rot rot } \mathfrak{A} = \text{grad div } \mathfrak{A} - \mathcal{A}\mathfrak{A}$$

$$(\text{grad } \mathfrak{A}) \mathfrak{B} = (\mathfrak{A} \text{ grad}) \mathfrak{B} + \mathfrak{B} \text{ div } \mathfrak{A}.$$

Unstetigkeiten. Die wichtigsten in den Anwendungen vorkommenden Unstetigkeiten sind endliche Sprünge von Skalaren und Vektoren längs gewisser Flächen. An solchen Flächen würde der im vorhergehenden definierte räumliche Gradient, die räumliche Divergenz und der räumliche Wirbel unendlich groß werden, also den Sinn verlieren. Man spricht aber an der Sprungfläche von

einem Flächengradienten von $p \dots \text{Grad } p = p_1 n_1 + p_2 n_2$;

einer Flächendivergenz von $\mathfrak{A} \dots \text{Div } \mathfrak{A} = \mathfrak{A}_1 n_1 + \mathfrak{A}_2 n_2$;

einem Flächenwirbel von $\mathfrak{A} \dots \text{Rot } \mathfrak{A} = [n_1 \mathfrak{A}_1] + [n_2 \mathfrak{A}_2]$.

n ist ein Einheitsvektor in Richtung der von der Fläche hinwegweisenden Normalen; die beiden Seiten der Sprungfläche werden durch die Zeiger 1 und 2 unterschieden.

Der Flächengradient ist also ein Vektor vom Betrag des Sprunges $p_1 - p_2$, der nach der Seite der höheren p -Werte weist.

Die Flächendivergenz ist ein Skalar, der den Sprung der normalen Komponenten $A_{n_1} + A_{n_2}$ des Vektors \mathfrak{A} mißt.

Der Flächenwirbel ist ein in der Sprungfläche liegender Vektor, der vom Betrage des Sprunges der tangentialen Komponenten abhängt.

Integralsätze.

Linienintegrale.

$$\int_P^Q dx \text{ grad } \varphi = \varphi_Q - \varphi_P,$$

¹⁾ Der Umlaufsinn bestimmt hierbei zusammen mit der angenommenen Richtung eine Rechtsschraube.

$$\int_P^Q (dr \operatorname{grad}) \mathfrak{A} = \mathfrak{A}_Q - \mathfrak{A}_P.$$

dr ist ein Element der Linie PQ .

Beziehungen zwischen Flächenintegral und Randintegral

$$\oint \mathfrak{A} dr = \int_F \operatorname{rot} \mathfrak{A} df \quad (\text{Satz von Stokes}).$$

df ist der Vektor eines Elements df der Fläche F ; dr ein Element ihres Randes.

Beziehungen zwischen Raumintegral und Hüllenintegral

$$\oint \mathfrak{A} df = \int_V \operatorname{div} \mathfrak{A} dv \quad (\text{Satz von Gauß}),$$

$$\oint (\varphi \operatorname{grad} \psi - \psi \operatorname{grad} \varphi) df = \int_V (\varphi \Delta \psi - \psi \Delta \varphi) dv \quad (\text{Satz von Green}),$$

$$\oint \varphi \operatorname{rot} \mathfrak{A} df = \int_V \operatorname{grad} \varphi \operatorname{rot} \mathfrak{A} dv \quad (\text{Satz vom Raumintegral des inneren$$

Produktes eines wirbelfreien Vektors mit einem quellenfreien Vektor).

dv ist ein Element des Raumes V ; df ist der Vektor eines Oberflächenelements seiner Hülle.

(9) **Allgemeine rechtsläufige orthogonale Koordinaten.** Die vorstehenden Definitionen und Rechnungsregeln sind unabhängig von der Wahl einer bestimmten Raumeinteilung, also vom Koordinatensystem. Dieses braucht man erst, wenn man in besonderen Fällen die räumliche Feldverteilung wirklich berechnen will. Dazu eignen sich am besten die orthogonale n Systeme, bei denen der Raum durch drei sich überall senkrecht durchschneidende Flächenscharen in kleine quaderähnliche Raumteile zerlegt wird. Wenn wir eine bestimmte Fläche F_1 aus der ersten Schar durch die Größe (Koordinate) u , eine bestimmte Fläche F_2 der zweiten Schar durch eine zweite Koordinate v und eine Fläche F_3 der dritten Schar durch w festlegen, so bestimmt der Schnittpunkt der drei Flächen den Punkt $P(u, v, w)$. Die Koordinate $u + du$ bestimmt eine zu F_1 benachbarte Fläche, die von dieser den Abstand

$$\partial s_u = U du$$

hat, wo U im allgemeinen eine Funktion des Ortes, das ist der Koordinaten u, v, w sein wird.

Entsprechend sind

$$\partial s_v = V dv \quad \text{und} \quad \partial s_w = W dw$$

die Abstände der durch v und $v + dv$, bzw. der durch w und $w + dw$ bestimmten Flächen. Die 6 Flächen schließen ein Quaderchen vom Rauminhalte

$$UVW du dv dw$$

ein. Die zu $u + du$, $v + dv$ und $w + dw$ gehörenden Flächen schneiden sich in einem Punkte P_1 , dessen Abstand von P die Diagonale des Quaders

$$ds = \sqrt{(U du)^2 + (V dv)^2 + (W dw)^2}$$

ist.

Sind die Größen u, v, w als Funktionen der rechtwinkligen kartesischen Koordinaten x, y, z gegeben, so ist

$$U^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial u} \right)^2$$

oder auch

$$\frac{1}{U^2} = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2.$$

Beispiele:

1. Kartesische Koordinaten. 2. Zylinderkoordinaten (Kreiszyylinder) (Abb. 1).

$$\begin{aligned} u &= x & U &= 1 \\ v &= y & V &= 1 \\ w &= z & W &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u &= r & x &= r \cos \varphi & U &= 1 \\ v &= \varphi & y &= r \sin \varphi & V &= r \\ w &= z & z &= z & W &= 1. \end{aligned}$$

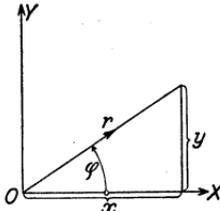


Abb. 1. Koordinaten des Kreiszyinders.

3. Koordinaten des elliptischen Zylinders (Abb. 2).

Die Schnittlinien der Flächen $u = \text{const}$, bzw. $v = \text{const}$ mit einer Ebene $z = w = \text{const}$ sind konfokale Ellipsen, bzw. Hyperbeln mit der Exzentrizität e .

$$\begin{aligned} u &= x = e \operatorname{Co}f u \operatorname{cos} v & U &= V = e \sqrt{\operatorname{Si}n^2 u + \operatorname{sin}^2 v} \\ v &= y = e \operatorname{Si}n u \operatorname{sin} v & &= e \sqrt{\operatorname{Co}f^2 u - \operatorname{cos}^2 v} \\ w &= z = w & W &= 1 \end{aligned}$$

4. Kugelkoordinaten.

$$\begin{aligned} u &= r = \text{Abstand vom Mittelpunkt} & x &= r \sin \vartheta \operatorname{cos} \varphi & U &= 1 \\ v &= \vartheta = 90^\circ - \text{geogr. Breite} & y &= r \sin \vartheta \operatorname{sin} \varphi & V &= r \\ w &= \varphi = \text{geogr. Länge} & z &= r \operatorname{cos} \vartheta & W &= r \sin \vartheta. \end{aligned}$$

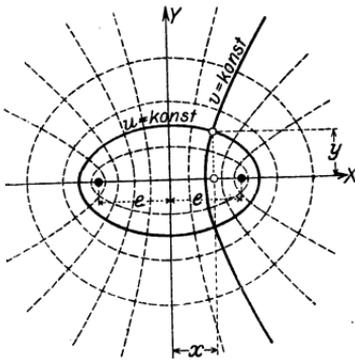


Abb. 2. Koordinaten des elliptischen Zylinders.

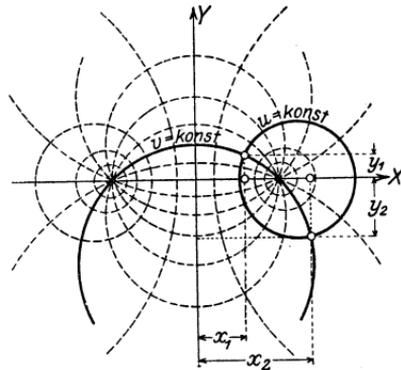


Abb. 3. Bipolarkoordinaten.

5. Bipolarkoordinaten (Abb. 3).

Die Schnittlinien der Flächen $u = \text{const}$, bzw. $v = \text{const}$ mit der Ebene $z = w = \text{const}$ sind Kreisscharen; die Kreise der Schar $v = \text{const}$ gehen sämtlich durch die beiden Mittelpunkte

$$\begin{aligned} u & \operatorname{Co}t g u = \frac{x^2 + y^2 + a^2}{2ax} & x &= \frac{a \operatorname{Si}n u}{\operatorname{Co}f u \mp \operatorname{cos} v} & U &= \frac{a}{\operatorname{Co}f u \mp \operatorname{cos} v} \\ v & \operatorname{co}t g v = \frac{x^2 + y^2 - a^2}{2ay} & y &= \frac{a \operatorname{sin} v}{\pm \operatorname{Co}f u - \operatorname{cos} v} & V &= \frac{a}{\operatorname{Co}f u \mp \operatorname{cos} v} \\ w & w = z & z &= w & W &= 1. \end{aligned}$$

Weitere Beispiele bei W. E. Byerly, An elementary treatise on Fouriers Series and spherical, cylindrical and ellipsoidal harmonics. Boston 1893. S. 238 ff.

Ausdrücke skalarer Größen in orthogonalen Koordinaten.

Inneres Produkt:

$$\mathfrak{A} \mathfrak{B} = \mathfrak{A}_u \mathfrak{B}_u + \mathfrak{A}_v \mathfrak{B}_v + \mathfrak{A}_w \mathfrak{B}_w.$$

Divergenz:

$$\operatorname{div} \mathfrak{A} = \frac{1}{UVW} \left\{ \frac{\partial}{\partial u} (VW \mathfrak{A}_u) + \frac{\partial}{\partial v} (UW \mathfrak{A}_v) + \frac{\partial}{\partial w} (UV \mathfrak{A}_w) \right\}.$$

Deltaableitung (Divergenzgradient):

$$\Delta p = \frac{1}{UVW} \left\{ \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{VW}{U} \frac{\partial p}{\partial u} \right) + \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{UW}{V} \frac{\partial p}{\partial v} \right) + \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{UV}{W} \frac{\partial p}{\partial w} \right) \right\}.$$

Vektorkomponenten in orthogonalen Koordinaten.

Außeres Produkt:

$$[\mathfrak{A} \mathfrak{B}]_u = \mathfrak{A}_v \mathfrak{B}_w - \mathfrak{A}_w \mathfrak{B}_v$$

$$[\mathfrak{A} \mathfrak{B}]_v = \mathfrak{A}_w \mathfrak{B}_u - \mathfrak{A}_u \mathfrak{B}_w$$

$$[\mathfrak{A} \mathfrak{B}]_w = \mathfrak{A}_u \mathfrak{B}_v - \mathfrak{A}_v \mathfrak{B}_u$$

Gradient:

$$\operatorname{grad}_u p = \frac{1}{U} \frac{\partial p}{\partial u}$$

$$\operatorname{grad}_v p = \frac{1}{V} \frac{\partial p}{\partial v}$$

$$\operatorname{grad}_w p = \frac{1}{W} \frac{\partial p}{\partial w}$$

Rotor (Wirbel):

$$\operatorname{rot}_u \mathfrak{A} = \frac{1}{VW} \left\{ \frac{\partial}{\partial v} (W \mathfrak{A}_w) - \frac{\partial}{\partial w} (V \mathfrak{A}_v) \right\}$$

$$\operatorname{rot}_v \mathfrak{A} = \frac{1}{UW} \left\{ \frac{\partial}{\partial w} (U \mathfrak{A}_u) - \frac{\partial}{\partial u} (W \mathfrak{A}_w) \right\}$$

$$\operatorname{rot}_w \mathfrak{A} = \frac{1}{UV} \left\{ \frac{\partial}{\partial u} (V \mathfrak{A}_v) - \frac{\partial}{\partial v} (U \mathfrak{A}_u) \right\}.$$

Literatur über Vektorenrechnung.

M. A b r a h a m, Geometrische Grundbegriffe. Enzykl. d. math. Wiss. IV, 14. Leipzig 1901. — A b r a h a m - F ö p p l, Theorie der Elektrizität, Bd. I, Leipzig 1904, 1907, 1912, 1918. — R. G a n s, Einführung in die Vektoranalysis mit Anwendungen auf die mathematische Physik. Leipzig 1905, 1910. — S. V a l e n t i n e r, Vektoranalysis. Leipzig 1907, 1912. — G i b b s - W i l s o n, Vector-Analysis. New Haven, Yale Univ. Press 1913. 2. Aufl. — W. v. I g n a t o w s k y, Die Vektoranalysis und ihre Anwendung in der theoret. Physik. 2 Teile. Leipzig 1909. — E. B u d d e, Tensoren und Dyaden im dreidimensionalen Raum. Braunschweig 1914. — J. S p i e l r e i n, Lehrbuch der Vektorrechnung. Stuttgart 1916.

Die folgende Tafel ist in erster Linie auf den Sätzen und Vorschlägen des Ausschusses für Einheiten und Formelgrößen (AEF) aufgebaut (S. 720); auf die Festsetzungen der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) wurde Rücksicht genommen. Auch einige Größen aus dem neuen französischen Gesetz über die Maßeinheiten sind aufgenommen worden (ETZ 1920, H. ft 49). Die Lichtgrößen sind nach den Beschlüssen der Deutschen Beleuchtungstechnischen Gesellschaft von 1922 aufgenommen.

Die Einheitszeichen sind lateinische gerade Buchstaben; für die elektrischen Einheiten wurden große Buchstaben gewählt. Die Zeichen für Vielfaches und

Teile von Einheiten werden aus letzterem durch Vorsetzen bestimmter Buchstaben abgeleitet, wobei ein Millesimalsystem bevorzugt wird: $M = 10^6$; $k = 10^3$; $m = 10^{-3}$; $\mu = 10^{-6}$; außerdem h in bestimmten Fällen wie $h = 10^2$; $d = 10^{-1}$; $c = 10^{-2}$. Die Einheitszeichen werden in Verbindung mit Zahlen benutzt; in Buchstabenformeln schreibt man die Einheitsnamen aus. Die Zeichen für die Größen sind entweder lateinische Kursiv-, deutsche Fraktur- oder griechische Buchstaben; die Vektoren werden durch Frakturbuchstaben dargestellt, die Eigenschaften der Stoffe vorzugsweise durch kleine griechische Buchstaben.

In Fällen, wo mehrere Größen derselben Art gleichzeitig in den Formeln auftreten, werden neben den in der Tafel angegebenen Zeichen die zugehörigen großen bzw. kleinen Buchstaben desselben Alphabets und die gleichlautenden Buchstaben anderer Alphabete verwandt. Gelegentlich werden auch Zeichen verwendet, welche die Tafel nicht aufführt.

Zeichen	Physikalische Größe oder Eigenschaft	Beziehungsgleichungen	Dimension	Technische Einheit		
				Zeichen	Name oder Bezeichnung	Wert in CGS

1. Grundmaße.

l	Länge		L	cm m μ	Zentimeter Meter Mikron=0,001 mm	1 10^2 10^{-4}
m	Masse		M	g	Gramm	1
t	Zeit		T	h min s	Stunde Minute Sekunde } Zeiträume	3600 60 1

m statt min, wo ohne Mißverständnis.
Gleiche Zeichen erhöht für Zeitpunkte.

2. Zahlen, geometrische und mechanische Größen.

$\alpha, \beta \dots$	Winkel		0		arc sin $57,3^\circ = 1$		
φ	Voreilwinkel, Phasenverschieb.		0				
η	Wirkungsgrad		0				
w	Windungszahl		0				
r	Halbmesser		L				
d	Durchmesser						
λ	Wellenlänge						
F	Fläche, Oberfläche		L^2	m^2	Quadratmeter	10^4	
q	Querschnitt			cm^2 a	Quadratzentimeter Ar = 100 m ²	1 10^6	
V	Raum, Volumen		L^3	m^3	Kubik(Raum)meter	10^6	
v	Geschwindigkeit		LT^{-1} LT^{-2}	cm^3	Kubikzentimeter	1	
b	Beschleunigung			l	Liter	10^3	
n	Umlaufzahl		T^{-2}	U/min	Umdrehungen in 1 min	$1/60$	
ω	Winkelgeschwindigkeit			Per/s	Perioden in 1 s	1	
ν	Frequenz			$Per/2\pi s$	Perioden in $2\pi s$	$1/2\pi$	
ω	Kreisfrequenz	$\omega = 2\pi\nu$					
P	Kraft	$P = m \cdot b$	LMT^{-2}	kg ^m g ^m sn	Kilogramm-Kraft Gramm-Kraft sthène, St ^m in	$981 \cdot 10^3$ 981 10^8	
A	Arbeit	$A = P \cdot l$	L^2MT^{-2}	kgm kWh	Kilogramm-meter Kilowattstunde	$98,1 \cdot 10^6$ $36 \cdot 10^{12}$	
W	Energie			ft lb	engl. Fußpfund	$13,55 \cdot 10^8$	
N	Leistung	$N = A / t$	L^2MT^{-3}	kW P, PS HP	Kilowatt Pferdestärke 1 PS = 75 kgm/s Horsepower, engl.	10^{10} $735 \cdot 10^7$ $745 \cdot 10^7$	

Zeichen	Physikalische Größe oder Eigenschaft	Beziehungs-gleichungen	Dimension	Technische Einheit		
				Zeichen	Name oder Bezeichnung	Wert in CGS
p	Druck, Spannung	$p = P/q$	$L^{-1}MT^{-2}$	kg^*/mm^2	Kilogramm auf das Quadratmillimeter	$98,1 \cdot 10^6$
J	Trägheitsmoment		L^2M	Atm	physik. Atmosphäre	$1,013 \cdot 10^6$
C	Schwingmoment		L^2MT^{-2}		76 cm Hg von 0°	
M	Moment einer Kraft		L^2MT^{-2}	at	technische Atm.	$98,1 \cdot 10^4$
S	Dichte	$S = m/V$	$L^{-3}M$		1 at = $1 kg^*/cm^2$	
s	spez. Gewicht	$s = S_1/S_2$	0	bar	dyn/cm ²	1
E	Elastizitätsmodul	$\alpha = 1/E$	$L^{-1}MT^{-2}$	pez	pièze, Pez	10^4
α	Dehnbarkeit		$LM^{-1}T^2$	tor	Tor (1mm Hgv. 0°)	$1,33 \cdot 10^3$
μ	Reibungszahl					

3. Wärme.

T	Temperatur, absol.	$T = 273 + t$		°	Grad	
t	Temper. v. Eispunkt					
Q	Wärmemenge			cal	Gramm- und Kilogramm-Kalorie.	$4,186 \cdot 10^7$ $4,186 \cdot 10^{10}$
c	spez. Wärme	$c = Q/m(t_2 - t_1)$		th	1 kcal = 426,9 kgm Thermie, (franz.) = 1000 kcal	$4,186 \cdot 10^{13}$
β	Wärmedehnbarkeit lineare			fg	Frigorie, (franz.) = 0,001 th = 1 kcal	$4,186 \cdot 10^{10}$
α	räumliche			BThU	British Thermal Unit = 778 ft lbs = 0,252 kcal = 107,5 kgm	$1,054 \cdot 10^{10}$

4. Licht.

Q	Lichtmenge			Lmh	Lumenstunden	
Φ	Lichtstrom	$\Phi = Q/T$		Lm	Lumen	
J	Lichtstärke	$J = \Phi/\omega$		HK	Kerze (Hefnerkerze)	
E	Beleuchtungsstärke	$E = \Phi/F = J \cos i/r^2$		Lx	Lux	
e	Leuchtdichte	$e = J_e/f \cos \varepsilon$		HK/cm ²	Kerze je cm ²	

T Zeit in Stunden; ω Raumwinkel; F, f Flächen, F in m², f in cm²; r eine Länge in m; i Einfallswinkel (Inzidenz)-winkel, ε Ausstrahlungswinkel (Emissions)-winkel.

5. Magnetismus.

\mathfrak{M}	magnet. Moment		$L^3/2M^{1/2}T^{-1}$			
\mathfrak{J}	Magnetisierungsstärke	$\mathfrak{J} = \mathfrak{M}/V$	$L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$	Gauß	1
\mathfrak{H}	magnet. Feldstärke	$\mathfrak{H} = \mathfrak{J}/l = 4\pi w I/l$				
\mathfrak{B}	magnet. Induktion	$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi \mathfrak{J}$ $\mathfrak{B} = \mu \mathfrak{H}$				
H	magnet. Spannung u. magnet. Potentialdifferenz	$H = l \cdot \mathfrak{H}$ $= 4\pi w I = 4\pi \Delta$	$L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$		Gilbert	1
Φ	magnet. Induktionsfluß	$\Phi = q \mathfrak{B}$ $\Phi = II G_m$	$L^3/2M^{1/2}T^{-1}$		Maxwell	1
G_m	magnet. Leitwert	$G_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu q}{l}$				
R_m	magnet. Widerstand	$R_m = \frac{1}{G_m} = \frac{l}{\mu q}$				
μ	magnet. Durchlässigkeit	$\mu = 1 + 4\pi \kappa$ $= \mathfrak{B}/\mathfrak{H}$				
κ	magnet. Aufnahmevermögen	$\kappa = \frac{\mu - 1}{4\pi} = \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}$				
η	Koeff. d. magnet. Hysterese					
p	Zahl der Polpaare					
ν	Streuungskoeffizient					

Zeichen	Physikalische Größe oder Eigenschaft	Beziehungsgleichungen	Dimension im elektro- n. agn. System	Technische Einheit		
				Zeichen	Name oder Bezeichnung	Wert in CGS
6. Elektrizität.						
\mathcal{E}	Elektr. Feldstärke	$\mathcal{D} = \epsilon \mathcal{E} / 4\pi \epsilon^2$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-2}$	V/cm		10^8
\mathcal{D}	Dielekt. Verschiebung	$\mathcal{E} = \mathcal{E} \cdot F$	$L^{-3/2} M^{1/2}$	C/cm ²		10^{-1}
\mathcal{E}	El. Verschiebungsfluß	$E = I \cdot R$	$L^{5/2} M^{1/2} T^{-2}$	V·cm		10^8
E	Elektromotorische Kraft	$U = I \cdot R$ $U = V_1 - V_2$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$	V	Volt	10^8
U	Spannung, Potentialdiff.					
V	Potential gegen Erde	$I = E/R$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	A	Ampere	10^{-1}
I	Stromstärke	$Q = I \cdot T$	$L^{1/2} M^{1/2}$	C	Coulomb	10^{-1}
Q	Elektrizitätsmenge	$c = I/q$	$L^{-3/2} M^{1/2} T^{-1}$	Ah	Ampere-Stunde	360
c	Stromdichte	$A = w \cdot I$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	A	Ampere	10^{-1}
A	Durchflutung	$\alpha = d \cdot l$	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$\frac{AW}{cm}$		10^{-1}
α	Strombelag	$A = Q \cdot E$	$L^2 M T^{-2}$	VC J Wh kWh	Voltcoulomb Joule Wattstunde Kilowattstunde	10^{-7} 10^{-7} $36 \cdot 10^9$ $36 \cdot 10^{12}$
A	elektrische Arbeit	$N = E \cdot I = A/T$	$L^2 M T^{-3}$	W kW BTU	Watt Kilowatt Board of Trade Unit	10^7 10^{10} 10^{10}
N	elektrische Leistung	$R = E/I$ $R = \rho l/q$	LT^{-1}	Ω $M\Omega$	Ohm Megohm	10^9 10^{15}
R	Widerstand	$G = 1/R$	$L^{-1} T$	S	Siemens	10^{-9}
G	Leitwert	$C = \frac{Q}{E}$	$L^{-1} T^2$	F μF	Farad Mikrofarad	10^{-9} 10^{-15}
C	Kapazität	$L = \frac{\Phi}{I}$	L	H	Henry	10^9
L	Selbstinduktivität					
M	Gegeninduktivität	$q = \frac{1}{z}$	$L^2 T^{-1}$	q und z bezogen auf Ohm		
q	spezif. Widerstand	z	$L^{-2} T$			
z	Leitfähigkeit	$A = \frac{z}{\eta}$	$M^{-1} L T$			
A	Äquivalentleitvermögen	Zusammengesetzte Wechselstromgrößen.				
α	elektrochem. Äquivalent	Nach dem Vorschlag des AEF bezeichnet man die Wechselstromgrößen als Wirk-, Schein- und Blindgrößen, vgl. (135). Der Wirkstrom wird auch Wattstrom, der Blindstrom wattloser Strom genannt. Außerdem werden folgende Benennungen gebraucht:				
η	Konzentration in Gramm-äquivalent auf cm ³ Lösung					
α	Dissoziationsgrad					
ϵ	Dielektrizitätskonstante					

Westonsches Normalelement
Form der Reichsanstalt
1,0183 - 0,0000406 (t-20)
- 0,00000095 (t-20)²
- 0,00000001 (t-20)³ V
bei 4⁰ gesätt. Lösung
1,0187 V
Clarcksches Normalelement
1,4263 - 0,00126 (t-20)
- 0,000007 (t-20)² V

1 A/s = 1 C
0,0933 mg H²O
0,328 mg Cu
1,118 mg Ag
0,337 mg Zn
Valenzladung F = 96500

1 J = 1 VC = 0,10197 kgm = 0,2390 cal (15⁰)

1 PS = 0,735 kW
1 kW = 1,360 PS
1 BTU (auch 1 U) = 1 kW

Werte in m/mm² Hg von 0⁰
1 legales Ohm = 1,06
1 international. Ohm = 1,063
1 Ohm (neuester Wert) = 1,0624

Elektrostatistisches oder mechanisches Maß.
Potential 1 = 300 V
Widerstand 1 = 9 · 10¹¹ Ω
Strom 1 = $\frac{1}{3}$ · 10⁻⁹ A
Menge 1 = $\frac{1}{3}$ · 10⁻⁹ C
Kapazität 1 = $\frac{1}{9}$ · 10⁻¹¹ F
„ 1 cm = $\frac{1}{9}$ · 10⁻⁵ μF

Reaktanz = $\omega L - 1/\omega C$; - Impedanz = $\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$; - Admittanz = $1/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$; -
Konduktanz = $R/[R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]$; - Suszeptanz = $[\omega L - 1/\omega C]/[R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]$.

(11) Englisches Gewicht und Maß.

1 ton = 1016,0 kg = 20 cwt, Hundredweighths.	1 Fuß = 30,48 cm.
1 cwt = 50,80 kg = 4 qrs, Quarters = 8 stones = 112 lbs, pounds.	1 yard = 3 engl. Fuß = 0,914 m.
1 lb = 0,4536 kg = 16 ozs, ounces = 256 drams = 7680 grains.	1 engl. statute mile = 1609,31 m;
1 pound troy = 373,242 g.	1 London mile = 1523,97 m;
1 lb - ft = 0,1383 kgm.	1 Seemeile = 1855,11 m.
1 ton per sq. inch = 1,575 kg ² /mm ² . — 1 lb per sq. inch = 0,0703 kg ² /cm ² .	1 circular mill = 0,000506 mm ² ;
	1 mm ² = 1970 circular mills.
	1 quarter = 8 bushels = 290 l.
	1 gallon = 4 quarts = 8 pints = 32 gills = 4,543 l.

Englisches Maß in Metermaß und umgekehrt.

	Fuß in Meter		Quadr.-F. in Quadr.-Meter		Kubik-F. in Kubik-Meter		Zoll in Zentimeter		Quadr.-Z. in Quadr.-Zentimeter		Kub.-Zoll in Kubik-Zentimeter		Meter in		Quadratmeter in		Kubikmeter in	
	Fuß	Meter	Quadr.-F.	Quadr.-Meter	Kubik-F.	Kubik-Meter	Zoll	Zentimeter	Quadr.-Z.	Quadr.-Zentimeter	Kub.-Zoll	Kubik-Zentimeter	Fuß	Zoll	Quadr.-Fuß	Quadr.-Zoll 100 x	Kubik-Fuß	Kubik-Zoll 1000 x
1	0,305	0,093	0,0283	2,54	6,45	16,4	3,28	39,4	10,8	15,5	35,3	61,0						
2	0,610	0,186	0,0566	5,08	12,90	32,8	6,56	78,7	21,5	31,0	70,6	122,1						
3	0,914	0,279	0,0849	7,62	19,35	49,2	9,84	118,1	32,3	46,5	105,9	183,1						
4	1,219	0,372	0,1133	10,16	25,81	65,5	13,12	157,5	43,1	62,0	141,3	244,1						
5	1,524	0,464	0,1416	12,70	32,26	81,9	16,40	196,9	53,8	77,5	176,6	305,1						
6	1,829	0,557	0,1699	15,24	38,71	98,3	19,69	236,2	64,6	93,0	211,9	366,2						
7	2,134	0,650	0,1982	17,78	45,16	114,7	22,97	275,6	75,4	108,5	247,2	427,2						
8	2,438	0,743	0,2265	20,32	51,61	131,1	26,25	315,0	86,1	124,0	282,5	488,2						
9	2,743	0,836	0,2548	22,86	58,06	147,5	29,53	354,3	96,9	139,5	317,8	549,2						

Englische Reichslehre (Imperial Standard Wire Gauge).

Nr.	Durchmesser mm												
7/0	12,7	2	7,01	10	3,25	18	1,22	26	0,46	34	0,234	42	0,102
6/0	11,8	3	6,40	11	2,95	19	1,02	27	0,41	35	0,214	43	0,092
5/0	11,0	4	5,89	12	2,64	20	0,91	28	0,376	36	0,193	44	0,081
4/0	10,16	5	5,28	13	2,34	21	0,81	29	0,346	37	0,173	45	0,071
3/0	9,45	6	4,88	14	2,03	22	0,71	30	0,310	38	0,152	46	0,061
2/0	8,84	7	4,47	15	1,83	23	0,61	31	0,295	39	0,132	47	0,051
1/0	8,23	8	4,06	16	1,63	24	0,56	32	0,274	40	0,122	48	0,041
1	7,62	9	3,66	17	1,42	25	0,51	33	0,254	41	0,112	49	0,031
												50	0,025

Birmingham-Lehre, B W G.

Nr.	Durchmesser mm												
0/4	11,53	2	7,21	7	4,57	12	2,77	17	1,47	22	0,71	27	0,41
0/3	10,80	3	6,58	8	4,19	13	2,41	18	1,24	23	0,64	28	0,36
0/2	9,65	4	6,05	9	3,76	14	2,11	19	1,07	24	0,56	29	0,33
0	8,64	5	5,59	10	3,40	15	1,83	20	0,89	25	0,51	30	0,30
1	7,62	6	5,16	11	3,05	16	1,65	21	0,81	26	0,46	31	0,25
												32	0,23

Amerikanische Brown & Sharpesche Lehre, B. & S. G.

Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm	Nr.	Durchmesser mm
0000	11,7	3	5,8	9	2,91	15	1,45	21	0,72	27	0,36	33	0,18
000	10,4	4	5,19	10	2,59	16	1,29	22	0,64	28	0,32	34	0,16
00	9,3	5	4,62	11	2,30	17	1,15	23	0,57	29	0,29	35	0,14
0	8,3	6	4,12	12	2,05	18	1,02	24	0,51	30	0,25	36	0,13
1	7,3	7	3,66	13	1,83	19	0,91	25	0,45	31	0,23	37	0,11
2	6,5	8	3,26	14	1,63	20	0,81	26	0,40	32	0,20	38	0,10

Nomographie.

(12) Die **Nomographie** bezweckt die Darstellung der Beziehungen zwischen mehreren Größen mit Hilfe von Skalen, die eine lineare, logarithmische oder andere Teilung tragen. Je nach Art der Beziehungen kommen eine oder mehrere gerade oder auch krumme Linien als Skalenträger zur Verwendung. Die logarithmische Skaleneinteilung hat den Vorzug gleichbleibender Ablesegenauigkeit an allen Stellen der Teilung, selbst bei sehr weit ausgedehntem Skalenbereich¹⁾.

(13) **Doppelskalen zur Darstellung der Beziehung zwischen zwei Größen.** Die Beziehung zwischen zwei Größen kann an Stelle der Aufzeichnung einer Kurve



Abb. 4. Doppelskala für die Magnetisierung von Dynamoblech und Stahlguß.

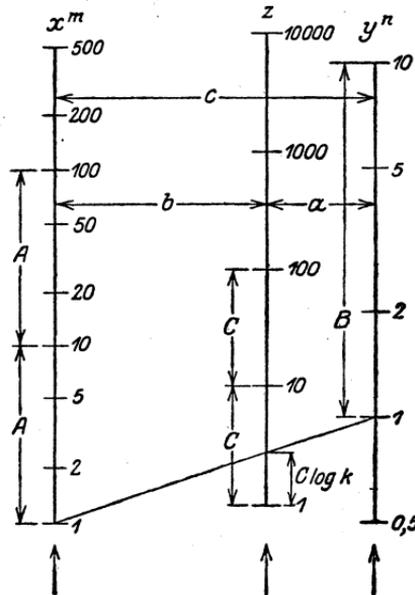


Abb. 5. Allgemeines Beispiel für das nomographische Verfahren.

in einem zweiachsigen Koordinatensystem durch eine **Doppelskala** mit zwei verschiedenen Teilungen dargestellt werden. Während die Kurve die Art der Beziehung besser zu übersehen gestattet, ist zum raschen Aufsuchen von Einzelwerten die Doppelskala bequemer, weil zusammengehörige Werte stets unmittelbar nebeneinander stehen. Durch passende Wahl der Skaleneinteilung kann für gute Übersichtlichkeit des ganzen Bereichs der Skala gesorgt werden.

Ein Beispiel gibt die **Doppelskala** für die Magnetisierung von Dynamoblech und Stahlguß in Abb. 4; sie ersetzt die in Abb. 19 (S. 38) gegebene Magnetisierungskurve. Für die Werte des Strombelages $\alpha = wI/l$ ist eine logarithmische Skalenteilung gewählt; auf diese Weise kann für den

¹⁾ Papiermaßstäbe mit logarithmischer Skaleneinteilung für eine größere Zahl verschiedener Meßbereiche werden von der „Stugra“, Zentralstelle für graphische Berechnungstafeln, Berlin-Waidmannslust, hergestellt. Dieselbe Stelle liefert Nomogramme entsprechend den Abb. 6 und 8.

ganzen Skalenbereich ein einheitlicher Maßstab benutzt werden, während für die Kurve in Abb. 19 zwei verschiedene Maßstäbe erforderlich sind (siehe auch v. Stritzl, ETZ 1922, S. 782).

(14) Nomogramme für die Beziehungen zwischen drei Größen. Die gebräuchlichsten nomographischen Darstellungen erhalten mehrere parallele Geraden als Skalenträger. Bei gleichmäßiger Skaleneinteilung können diese Nomogramme zur Addition und Subtraktion gebraucht werden; bei logarithmischer Einteilung dienen sie zur Multiplikation und Division, wobei die einzelnen Faktoren beliebige Exponenten haben können. Besteht z. B. zwischen x , y und z die Beziehung

$$z = k \cdot x^m \cdot y^n,$$

so kann zur Ermittlung beliebiger, zusammengehöriger Werte von x , y und z ein Nomogramm entsprechend der Abb. 5 dienen. Die drei parallelen Geraden besitzen logarithmische Einteilung. Zwei von den drei Werten x , y und z werden auf den zugehörigen Skalen aufgesucht und mittels eines (am besten durchsichtigen) Lineals oder gespannten Fadens miteinander verbunden; diese Gerade schneidet auf der dritten Skala den gesuchten Wert ab. Bei einer gesamten Skalenlänge von p cm und Werten von x_{\min} bis x_{\max} ergibt sich die Länge A für den Bereich von x zwischen 1 und 10 zu:

$$A = \frac{p}{\log x_{\max} - \log x_{\min}}$$

und ebenso wird für die y -Skala

$$B = \frac{p}{\log y_{\max} - \log y_{\min}}.$$

Für die z -Skala ergibt sich dann die Länge C des Bereichs von 1 bis 10 als:

$$\frac{1}{C} = \frac{m}{A} + \frac{n}{B} \quad \text{oder} \quad C = \frac{A \cdot B}{nA + mB}.$$

Die Abstände der z -Skala von den beiden anderen Skalen ergeben sich aus den Formeln:

$$a = c \cdot \frac{m \cdot C}{A} = \frac{c}{1 + \frac{n \cdot A}{m \cdot B}}$$

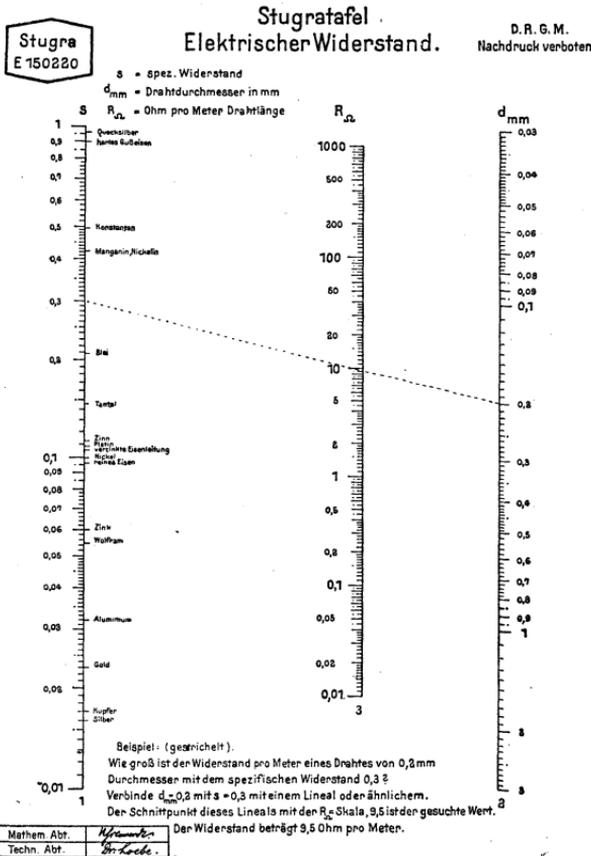
$$b = c \cdot \frac{n \cdot C}{B} = \frac{c}{1 + \frac{m \cdot B}{n \cdot A}}.$$

Zur Berücksichtigung des konstanten Faktors k muß der Punkt für 1 bei der z -Skala um den Wert $C \cdot \log k$ nach der Richtung der kleineren Zahlen hin gegenüber der Verbindungslinie der Punkte für 1 auf den Skalen x und y verschoben werden, wie aus Abb. 5 hervorgeht. Die Pfeile geben jeweils die Richtung der größeren Zahlen an.

Ein Beispiel für die Anwendung eines Nomogramms mit drei Skalen gibt die Abb. 6. Sie dient zur Berechnung des Widerstandes R für 1 m Länge aus dem spezifischen Widerstand s und dem Drahtdurchmesser d nach der Formel: $R = 4s/\pi d^2$. Dieses Nomogramm kann als Ersatz für die Drahttafel auf S. 2 und 3 dienen. Alle drei Skalenträger könnten hier auch eine doppelte Teilung erhalten. Auf dem linken Skalenträger kann neben dem spezifischen Widerstand die spezifische Leitfähigkeit aufgetragen werden, auf dem rechten neben dem Drahtdurchmesser der Drahtquerschnitt und auf dem mittleren neben dem Widerstand von 1 m Draht in Ω die Drahtlänge für 1 Ω in Metern. Die

gestrichelt eingezeichnete Linie gibt ein Beispiel für einen spezifischen Widerstand 0,3 und einen Drahtdurchmesser von 0,2 mm; hierbei wird der Widerstand 9,5 Ω /m auf dem mittleren Skalenträger erhalten.

(15) **Nomogramme mit Zapfenlinien für die Beziehungen zwischen mehr als drei Größen.** Sollen Nomogramme für Beziehungen zwischen mehr als drei Größen aufgestellt werden, so ist zunächst das Produkt oder der Quotient von zwei Größen in derselben Weise wie eben angegeben aufzusuchen. Der erhaltene Wert wird



Druck: Gebr. Wichmann, Berlin, Marienstr. 13. Verlag: Stugra-Centralstelle für graphische Berechnungstafeln, Berlin-Waldmannsuhl.

Abb. 6. Nomogramm mit drei Skalen zur Berechnung des Widerstandes.

auf der zugehörigen Skalenlinie festgehalten, die keine Teilung zu tragen braucht und deshalb als **Zapfenlinie** bezeichnet wird, und mit dem Wert für die dritte Größe durch eine gerade Linie verbunden. Diese Gerade schneidet die gesuchte Größe auf einem weiteren Skalenträger ab.

Eine Zapfenlinie wird auch für Umrechnungen benutzt, wie sie durch das Beispiel in Abb. 7 gegeben sind. Dieses Nomogramm dient zur **Umrechnung** der Betriebsverhältnisse von Metaldrahtlampen bei

veränderter Spannung. Es enthält Skalen für den spezifischen Verbrauch (W/HK), die Spannung (V), den Energieverbrauch (W), die Lichtstärke (HK) und die Nutzbrenndauer (N). Die Doppelskalen für V , W und HK gelten jeweils für zwei verschiedene Bereiche und werden je nach Bedarf benutzt. Um die Zapfenlinie (Z), die keine Teilung trägt, wird das Lineal jeweils gedreht. Soll beispielsweise festgestellt werden, welche Lichtstärke eine Lampe für 120 V und 50 HK bei 110 V ergibt, so wird der Punkt für 120 V auf der rechten Seite der V -Skala mit dem Punkt für 50 auf der rechten Seite der HK -Skala verbunden und der Schnittpunkt des Lineals mit der Zapfenlinie alsdann mit 110 V verbunden; hierdurch erhält man auf der HK -Skala den gesuchten Wert 37 HK. In gleicher Weise kann mit diesem Nomogramm der Energieverbrauch (W), der spezifische Verbrauch (W/HK) und die Nutzbrenndauer (N) für verschiedene Spannungen umgerechnet werden.

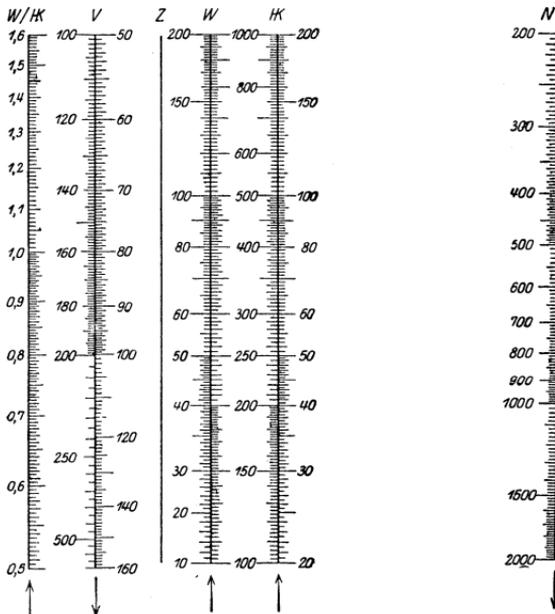
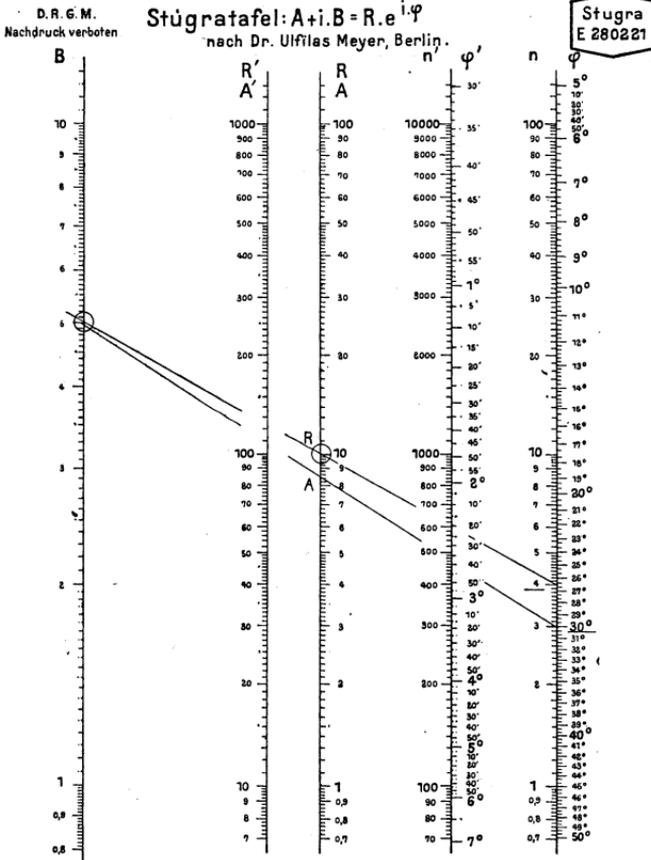


Abb. 7. Tafel zur Berechnung der Betriebsverhältnisse von Metalldrahtlampen bei abweichenden Spannungen.

(16) Nomogramme für Beziehungen mit Produkten und Summen. Nomogramme mit logarithmischen Teilungen lassen sich auch für Beziehungen verwenden, in denen neben Produkten noch Summen vorkommen, sofern eine einfache Hilfsrechnung vorgenommen wird. Als Beispiel dient das von U. Meyer (ETZ 1921, S. 1226) aufgestellte Nomogramm Abb. 8 für die U m w a n d l u n g k o m p l e x e r G r ö ß e n aus der Form $A + i \cdot B$ in die Form $R \cdot e^{i\varphi}$. Dieses Nomogramm dient als Ersatz für die Tab. (3) auf S. 4. Auf der mittleren Skala wird A , auf der linken Skala B aufgesucht; ihre Verbindungslinie gibt auf der linken Seite der rechten Skala $n = A^2/B^2 = \cotg^2 \varphi$ und rechts davon den zugehörigen Winkel φ . Zu $\cotg^2 \varphi$ wird 1 hinzugezählt. Dieser Wert wird ebenfalls auf der linken Seite der rechten Skala aufgesucht und mit dem Wert von B verbunden. Diese Gerade ergibt auf der mittleren Skala $R = B \cdot \sqrt{1 + \cotg^2 \varphi}$. Die in Abb. 8 eingetragenen Linien geben ein Beispiel für die Berechnung von $8,65 + 5i = 10 \cdot e^{i \cdot 30^\circ}$.

Als größerer Wert wird hier jeweils A , als kleinerer B gewählt. Die Skala für A gilt für Werte von 0,7 bis 100. Soweit sie nicht ausreicht, kann die Skala für A und die hierzu gehörige für n' und φ' benutzt werden.

Mit Hilfe dieses Nomogramms können auch die Werte für A und B ermittelt werden, wenn R und φ gegeben sind (siehe hierzu auch die Fußnote auf S. 18).



Gegeben: A und B . Verbinde B mit A bzw. A' , Ergebnis φ bzw. φ' steht. Neben φ bzw. φ' steht. Zahl n bzw. n' addiere hierzu 1 und verbinde mit B . Ergebnis R bzw. R' . A, B, R können mit gleichen Potenzen von 10 multipliziert werden. Wenn $B > A$, vertausche B mit A und rechne mit $90^\circ - \varphi$. Gegeben: R und φ . Neben φ steht n , addiere 1 hinzu und verbinde mit R , ergibt B . Verbinde B mit φ , ergibt A . Druck: Geb. Wichmann, Berlin. Verlag: Stugra - Centralstelle für graphische Berechnungstafeln, Berlin - Wadmannslust.

Abb. 8. Nomogramm für die Umwandlung komplexer Größen.

(17) **Nomogramme mit Z-Skalen.** Für manche Fälle eignen sich am besten die Nomogramme mit sogenannten Z -Skalen. Sie dienen ebenfalls zur Darstellung von Beziehungen zwischen drei Größen. Die Anfangs- und Endpunkte der beiden äußeren parallelen Skalen werden durch eine schräg liegende dritte Skala verbunden, welche eine projektive Teilung erhält. Diese ergibt sich aus einer gleichmäßigen Skaleneinteilung mittels Projektion.

Als Beispiel für ein Z-Nomogramm dient die von Bloch angegebene Normal-Lichtverteilungsskala für luftleere Osram-Drahtlampen in Abb. 9. Sie ist ein Ersatz für die üblichen, in einem Polar-Koordinatensystem aufgetragenen Lichtverteilungskurven und hat vor diesen die Benutzbarkeit für alle gebräuchlichen Lampentypen voraus. Auf der linken Skala sind an Stelle der ursprünglich eingetragenen Kerzenteilung die Winkel eingetragen, unter denen die verschiedenen Lichtstärken erhalten werden. Die schräge Skala enthält oben die horizontalen Lichtstärken der gebräuchlichen Lampentypen und darunter den zugehörigen Gesamtlichtstrom in Lumen. Die rechte Skala trägt eine gleichmäßige Kerzenteilung. Das Nomogramm stellt so eine Kombination einer Doppelskala und einer Z-Skala dar. Soll die Lichtstärke unter einem beliebigen Aus-

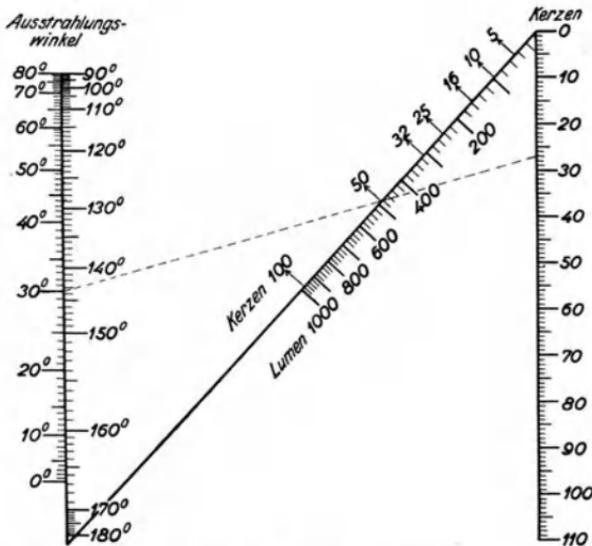


Abb. 9. Normal-Lichtverteilungsskala für luftleere Osram-Drahtlampen.

strahlungswinkel, z. B. 30° , aufgesucht werden, so wird der zugehörige Punkt auf der linken Skala mit dem Punkt für die horizontale Lichtstärke der betreffenden Lampentype, z. B. 50 Kerzen, auf der schrägen Skala verbunden. Diese in Abb. 9 gestrichelt eingetragene Gerade schneidet auf der rechten Skala die unter einem Winkel von 30° für die 50kerzige Lampe sich ergebende Lichtstärke von 27 Kerzen ab.

Literatur: d'Ocagne, „Traité de nomographie“ (Paris 1899). — Pirani, „Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik“. Sammlung Götschen Nr. 723, Berlin und Leipzig 1922. — Mehmkke, „Leitfaden zum graphischen Rechnen“. Leipzig 1917. — Krauss, „Die Nomographie“. Berlin 1922. — U. Meyer, „Rechentafeln zur Leitungsberechnung“ ETZ 1921, S. 1225. — Bloch, „Lichttechnische Berechnungen in nomographischer Behandlungsweise“, ETZ 1922, S. 73. — Ott, „Fluchtlinientafeln“, Betrieb, Dezember 1920. — „Tafeln für die Berechnung von Gleich- und Wechselstromleitungen“. ETZ 1922, S. 1318. — Schwerdt: Fluchtlinientafeln, Grundlagen und Anwendungen auf Fragen der Leitungsberechnung und Beleuchtungstechnik. ETZ 1922, S. 777. — von Stritzl: „Die Nomographie und ihre Anwendungen im Elektromaschinenbau“. ETZ 1922, S. 781. — W. Hage, „Rechentafeln zur Auswertung von Nebenspremmessungen“, ETZ 1922, S. 1239.

Statik.

(18) **Zusammensetzung von Kräften in der Ebene.** a) Zwei Kräfte: Parallelogramm (Dreieck) der Kräfte (in Abb. 11 z. T. punktiert), P_1, P_2 Seiten-, R_{12} Mittelkraft.

$$R_{12} = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 - 2 P_1 P_2 \cos \alpha}$$

$$P_1 : P_2 : R_{12} = \sin \alpha_1 : \sin \alpha_2 : \sin \alpha$$

b) Drei und mehr Kräfte in einem Punkte (Abb. 10): Kräftezug, geschlossenes Kräftepolygon, Kräfteviereck. Die Mittelkraft schließt den Kräftezug; Abb. 10 zeigt die Stützkraft, welche der Mittelkraft gleich und entgegengesetzt ist. Zur Berechnung zerlegt man die Kräfte nach den rechtwinkligen Koordinatenachsen, addiert je die gleichgerichteten Seitenkräfte und setzt die Summen wieder zusammen:

$$R_{12 \dots n} = \sqrt{[\sum P_n \cos \alpha_n]^2 + [\sum P_n \cos \beta_n]^2 + [\sum P_n \cos \gamma_n]^2}$$

$$\cos(R, X) = \frac{\sum P_n \cos \alpha_n}{R}; \cos(R, Y) = \frac{\sum P_n \cos \beta_n}{R}; \cos(R, Z) = \frac{\sum P_n \cos \gamma_n}{R}$$

c) Kräfte greifen nicht in einem Punkte an (Abb. 12): aus dem Kräftezug wie unter b (Abb. 10) R_{123} nach Größe und Richtung. Pol p in Abb. 13 beliebig, Polstrahlen $R_1, (1, 2)$ usw.; parallel zu den Polstrahlen Seilzug in Abb. 12; die Wirkungslinie der Mittelkraft geht durch den Schnittpunkt von R_1 und R_{IV} . R_{123} ist die der Mittelkraft gleiche, ihr entgegengesetzt gerichtete Stützkraft. — Parallele Kräfte, Abb. 14. Belastung des in a und b

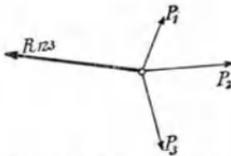


Abb. 10. Mehrere Kräfte in einem Punkt.

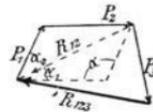


Abb. 11. Kräftezug.

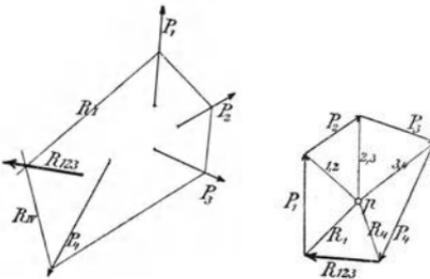


Abb. 12 u. 13. Kräfte in verschiedenen Punkten; Seilzug.

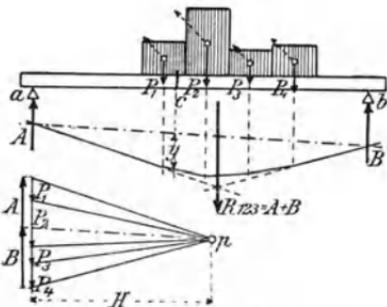


Abb. 14. Parallele Kräfte.

gelagerten Balkens prop. der schraffierten Fläche, Kräfte $P_1, P_2 \dots$ Kräftezug durch Aneinanderfügen der gleichgerichteten Kräfte P_1 bis P_4 , Mittelkraft = $\sum P$; p beliebig, Polstrahlen, danach Seilzug durch Parallele zu den Polstrahlen gezeichnet, Mittelkraft geht durch den Schnittpunkt des ersten mit dem letzten Strahl. Die Parallele durch p zur Schlußlinie des Seilzugs teilt $\sum P$ in die Auflage drucke $A+B$. Die vom Seilzug und dessen Schlußlinie umschriebene Fläche heißt Momentenfläche. Das Moment der Kräfte auf einer Seite des beliebigen Punktes c ist $H \cdot y$, worin y die Ordinate in der Momentenfläche unter c .

Zur Bestimmung des Mittelpunkts der Kräfte P wird die Mittelkraft für noch eine Richtung der Kräfte (in Abb. 14 punktiert) aufgesucht; der Schnittpunkt beider R ist der Kräftemittelpunkt und der Schwerpunkt der schraffierten Fläche.

(19) **Trägheitsmomente** sind Ausdrücke von der Form $J = \int r^2 dm$ oder $\Sigma r^2 m$, worin dm Elemente, r ihre Abstände von der Achse sind, auf die J bezogen wird. Für das T. eines Körpers bedeutet dm Massenelemente, bei Flächen deren Elemente.

Äquatoriales T. einer ebenen Fläche, Achse in der Ebene, $J_x = \int y^2 dF$, dF Flächenelemente.

Polares T. einer ebenen Fläche, bezogen auf einen Punkt der Ebene (Pol) $J_p = \int r^2 dF$, r Abstand vom Pol. $J_p = J_x + J_y$, letztere bezogen auf zwei sich im Pol \perp schneidende Achsen.

T. für parallele Achsen: J_s bezogen auf die Schwerpunktsachse, J (für Masse m) und J_x (für Fläche F) bezogen auf Achsen, die \parallel zu jener im Abstand a laufen: $J = J_s + ma^2$ $J_x = J_s + Fa^2$.

Widerstandsmoment $W = J : e$, J für eine Schwerpunktsachse, e größte Entfernung eines Flächenteils von der Achse.

Trägheitshalbmesser der Masse m oder Fläche F : $i = \sqrt{J/m}$ bzw. $\sqrt{J/F}$.

Literatur.

Müller-Breslau, Graphische Statik der Baukonstruktionen. Winnig, Grundlagen der Bautechnik für oberirdische Telegraphenlinien.

Äquatoriale Trägheitsmomente J_x und Widerstandsmomente W_x , Polare Trägheitsmomente J_p und Widerstandsmomente W_p .

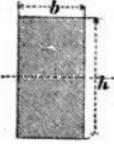
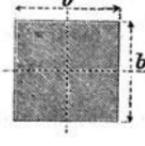
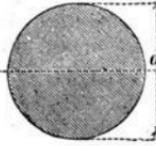
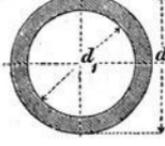
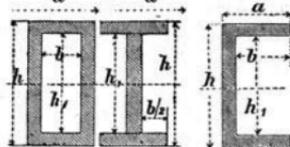
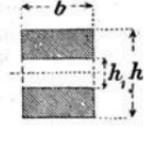
			
$J_x = 1/12 bh^3$ $W_x = 1/6 bh^2$ $J_p = 1/12 bh(b^2 + h^2)$ $W_p = 1/6 b(b^2 + h^2)$	$J_x = 1/12 b^4$ $W_x = 1/6 b^3$ $J_p = 1/6 b^4$ $W_p = 1/3 b^3$	$J_x = 0,0491 d^4$ $W_x = 0,0982 d^3$ $J_p = 0,0982 d^4$ $W_p = 0,1963 d^3$	$J_x = 0,0491 (d^4 - d_1^4)$ $W_x = 0,0982 \frac{(d^4 - d_1^4)}{d}$ $J_p = 0,0982 (d^4 - d_1^4)$ $W_p = 0,1963 \frac{(d^4 - d_1^4)}{d}$
			
$J_x = \frac{ah^3 - bh_1^3}{12}$ $W_x = \frac{ah^3 - bh_1^3}{6b}$	$J_x = \frac{b(h^3 - h_1^3)}{12}$ $W_x = \frac{b(h^3 - h_1^3)}{6h}$	$J_x = 0,0491 bh^3$ $W_x = 0,0982 bh^2$ $l_1 = 0,4244 r$	

Abb 15a bis g. Trägheits- und Widerstandsmomente für verschiedene Querschnitte.

Trägheitsmomente homogener Körper,
bezogen auf eine durch den Schwerpunkt gehende Achse.

Gestalt des Körpers	Schwerpunktachse	Trägheitsmoment
Parallelepiped, Kanten a, b, c	$ a$	$\frac{1}{12} m (b^2 + c^2)$
Zylinder, Halbmesser r , Länge l	in der Zylinderachse	$\frac{1}{2} m r^2$
	\perp z. Zylinderachse	$m (\frac{1}{12} l^2 + \frac{1}{4} r^2)$
Hohlzylinder, Ring: äußerer Halbm. R , inn. r , Länge l	in der Ringachse	$\frac{1}{2} m (R^2 + r^2)$
	\perp zur Ringachse	$m (\frac{1}{12} l^2 + \frac{1}{4} \{R^2 + r^2\})$
dünnwandige Röhre $R + r = 2r'$	in der Rohrachse	$m r'^2$
dünnere Stab oder Röhre	\perp zur Stabachse	$\frac{1}{12} m l^2$

Festigkeit.

(20) **Begriffe.** Spannung $p = \text{Kraft } P : \text{Fläche } F$. Festigkeitsgrenze ist die Spannung, welche hinreicht, den Zusammenhang der Teile aufzuheben; die ihr entsprechende Kraft heißt Bruchlast.

Dehnung ε ist das Verhältnis der Längenänderung Δl eines Stabes zur ursprünglichen Länge l , also $\varepsilon = \Delta l / l$. — Dehnungszahl α ist die Dehnung für die Spannung 1; $\varepsilon = \alpha \cdot p$. — Elastizitätsmaß $E = 1/\alpha$. — Für manche Stoffe ist $\Delta l / l = \alpha \cdot p$ (Hookesches Gesetz, gültig innerhalb der Elastizitätsgrenze). Allgemein ist $\Delta l / l = \alpha \cdot p^n$, worin n meist > 1 , manchmal auch < 1 .

Querzusammenziehung ε_q ist das Verhältnis der Verringerung δ des Durchmessers d zum Durchmesser $\varepsilon_q = \delta / d$; $\varepsilon / \varepsilon_q = m$ (Poissonsche Zahl) liegt für isotrope Körper zwischen 3 und 4, hat für Metalle den Wert 10/3.

Schubzahl β ist die Strecke, um die sich zwei um die Längeneinheit voneinander abtastende Flächenteilchen unter der Einwirkung der Schubspannung 1 kg/cm^2 gegeneinander verschieben.

Schubfestigkeit ist die Schubspannung, bei der sich zwei gegeneinander verschobene Querschnittsebenen eines Stabes trennen.

Elastizitätsgrenze ist die größte Spannung, bei der die bleibende Dehnung noch verschwindend klein ist; die zugehörige Kraft heißt Traglast.

Tragsicherheit = Verhältnis Elastizitätsgrenze / höchste Spannung.

Bruchsicherheit = Verhältnis Festigkeitsgrenze / höchste Spannung.

In die Rechnung einzuführen: P in kg^* , l in cm , q in cm^2 , p in kg^*/cm^2 , J in cm^4 , W in cm^3 , M und D in $\text{kg} \cdot \text{cm}$.

(21) **Formeln und Zahlen.** Zug-, Druck- und Schubfestigkeit. Zulässige Belastung $P = q \cdot p$; p aus der Tafel S. 28 u. 29 zu entnehmen als p_z, p_d, p_s . Die Elastizitätsgrenze für Schub ist etwa $4/5$ des kleineren Wertes für Zug oder Druck; die Schubspannung τ ist für rechteck. Querschnitt $3 p/2 bh$ und für kreisförm. Querschnitt $= 16 p/3 \pi d^2$.

Biegefestigkeit. Biegemoment $M = P \cdot x$; P Last, x ihr Hebelarm. Im gefährlichen Querschnitt wird $P \cdot x$ ein Maximum; dies muß sein $\leq W_p \cdot p_b$; W_p s. S. 25, p_b s. S. 29.

Einige wichtige Fälle von Biegebeanspruchung.

Art der Beanspruchung	M_{max}	Tragkraft P	Durchbiegung f
Abb. 16a	Pl	$\frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P \alpha l^3}{J_x 3}$
Abb. 16b	$\frac{Pl}{2}$	$2 \frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P \alpha l^3}{J_x 8}$
Abb. 16c	$\frac{Pl}{4}$	$4 \frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P \alpha l^3}{J_x 48}$
auf beiden Seiten eingespannt	$\frac{Pl}{8}$	$8 \frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P \alpha l^3}{J_x 192}$
Abb. 16d.	$\frac{Pl}{8}$	$8 \frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P \alpha 5l^3}{J_x 384}$
auf beiden Seiten eingespannt	$\frac{Pl}{12}$	$12 \frac{W_x}{l} p_b$	$\frac{P \alpha l^3}{J_x 384}$

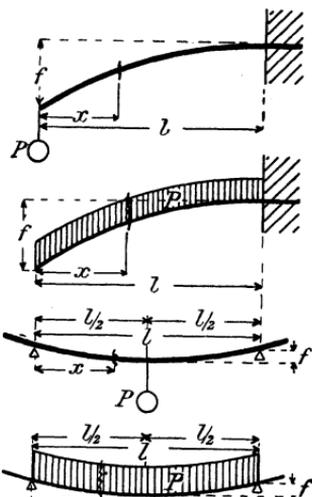
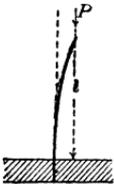
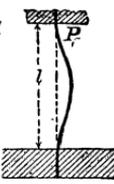


Abb. 16a bis d. Biegung eines Stabes.

Knickfestigkeit.

Abb. 17a bis d. Knickung eines Stabes.

			
Ein Ende eingespannt, ein Ende frei	Beide Enden frei und geführt	Ein Ende eingespannt, ein Ende geführt	Beide Enden eingespannt
$\text{Knicklast } P_k = \frac{\pi^2 J_x}{4 \alpha l^2}$	$= \pi^2 \frac{J_x}{\alpha l^2}$	$\approx 2 \pi^2 \frac{J_x}{\alpha l^2}$	$\approx 4 \pi^2 \frac{J_x}{\alpha l^2}$

Eulersche Formeln: J_x ist das kleinste äquatoriale Trägheitsmoment des Querschnitts in cm^4 , l in cm , α in cm^2/kg , P in kg/cm^2 ; $P/F >$ Elastizitätsgrenze.

Die Eulersche Formel für den 2. Fall ist nur anwendbar, wenn $l:i \geq 80$ (Gußeisen), 122 (Schweißeisen), 105 (Flußeisen), 90 (Flußstahl), 100 (Holz). Für kleinere Längen, als den Grenzwerten von $l:i$ entspricht, sind die Tetmeyer'schen Formeln (vgl. Hütte) zu benutzen.

Drehfestigkeit. Das Drehmoment $D = Pl \leq W_p p_d$, l Hebelarm der drehenden Kraft, W_p S. 25. Der Verdrehwinkel zweier um 1 mm voneinander absteher Querschnitte eines runden Stabes ist $\vartheta = D\beta/J_p$, J_p s. S. 25, β S. 28.

Festigkeitszahlen in kg/cm².

Stoff	α 10—8.	β 10—8.	Zug- festigkeit kg/cm ²	Drähte aus	α 10—8.	Zug- festigkeit kg/cm ²
Schweißeisen Sehnen	50,0	130	3300—4000	Eisen, blank gezogen.		5600—7000
„ I. Sehnen	50,0	130	2800—3500	„ geglüht	50	4000
Flußeisen	46,5	121	3400—5000	Bessemerstahl, blank.		6500
Flußstahl	45,5	118	5000—20000	„ geglüht	46,5	4000—6000
Flußstahl, ungehärtet	45,5	118	10000 u. mehr	Tiegelstahl	46,5	9000—19000
„ gehärtet.	45,5	118	17000 u. mehr	Zink	670	1900
Stahlguß	46,5	121	3500—7000 u. m.	Kupfer	77	4000
Gußeisen	95—133	250—345	1200—2400	Bronze		4600—7100
Kupfer, gewalztes Blech	87		2000—2300	Siliziumbronze		6500—8500
Messing, gegossen	125		1500	Doppelbronze		7600
Rotguß	111		2000	Phosphorbronze, blank		14000
Phosphorbronze			4000	„ geglüht		6300
Manganbronze	83—106		2900—3570	Messing.	100	5000—6100
Aluminium	148	380	930—1000	Aluminium, kalt geschmiedet		2300—2700
Aluminiumbronze	83		4300—6200	Al.-Bronze, gegossen		6500
Zink, gewalzt	83—114		2050—2570	Blei	1400	170—220
Zinn	250		350			
Blei, weich	2000		125	Druckfestigkeit: Gußeisen		7000—8500
„ hart			300	Porzellan		4780
Glas	142		250	Biegefestigkeit:		4200—5600
Holz, Faser.	440—1100		750—1340	Die Bruchsicherheit wird im allgemeinen gewertet für		
Porzellan	140—190		1300—2000	Holz 10, Metall 6, Stein 12, Mauerwerk 20, Seil 3 bis 5.		

Spannungszahlen.

Die Zahlen der Tafel sind mit 100 zu multiplizieren, um kg*/cm² zu erhalten. Man nehme die zulässigen Spannungen unter:

a für ruhende Belastung.

b für Spannungen wechselnd zwischen 0 und dem Höchstwert.

c für Spannungen wechselnd zwischen einem negativen und einem positiven Höchstwert.

Stoff	zulässige Spannung in kg*/mm ²													
	auf Zug p_z			Druck p_k		Biegung p_b			Schub p_s			Drehung p_d		
	a	b	c	a	b	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Schweißeisen	9	6	3	9	6	9	6	3	7,2	4,8	2,4	3,6	2,4	1,2
Flußeisen	11	7	3,5	11	7	11	7	3,5	8,4	5,6	2,8	7,2	4,8	2,4
Flußstahl	14	9	4,5	14	9	14	9	4,5	11	7,2	3,6	11	7	3,5
Tiegelgußstahl geh.								43						
Gußeisen	3	2	1	9	6	4,5	3	1,5	3	2	1	1,5	1	0,5

Zusammengesetzte Festigkeit. Die zulässige Beanspruchung ergibt sich für: 1. Zug (Druck) und Biegung: $M/W + p \leq p_z$ oder p_k . Bei starker lotrechter Belastung (Knickgefahr) empfiehlt sich $M/W - p \leq p_z$ oder p_k . 2. Zug (Druck, Biegung) und Drehung: $0,35 p + 0,65 \sqrt{p^2 + 2,4 x^2 r^2} \leq p_z$ oder p_k oder p_b . x ist für Zug p_z/p_d , für Druck p_k/p_d , für Biegung p_b/p_d ; hierin ist $p = P/q$; p_z ; p_k , usw. s. obige Tabelle; M s. S. 26 u. 27; W s. S. 25.

Eine neue Formel von Natalis¹⁾ gilt für das ganze Bereich; es ist

$$P_k = k_0 F \cdot \frac{1 + A}{1 + A + A^2}, \quad A = \frac{k_0}{\pi^2} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{l}{i}\right)^2$$

k_0 Druckfestigkeit an der Bruchgrenze in kg/cm², l Schublänge in cm, $i = \sqrt{J/F}$ in cm.

(22)

Dichte verschiedener Körper.

Metalle und Legierungen.

Aluminium	2,6—2,7	Magnesium	1,7
Blei	11,2—11,4	Mangan	7,4
Bronze (7,9—14 v H Zinn)	7,4—8,9	Messing	8,3—8,7
Deltametall	8,6	Neusilber, Argentan, Nicke-	
Eisen, reines	7,86	lin usf.	8,4—8,7
Flußeisen und Flußstahl	7,85	Nickel	8,6—8,9
Schmiedeeisen	7,82	Phosphorbronze	8,8
Schweißeisen	7,8	Platin	21,5
Schweißstahl	7,86	Quecksilber 0°	13,6
Weißer Guß	7,6—7,7	Silber	10,5
Grauer Guß	7,0—7,1	Siliziumbronze	8,9
Glockenmetall	8,81	Tantal	16,5
Gold	19,3	Weißmetall	7,1
Kadmium	8,6	Wismut	9,8
Kanonengut	8,44	Wolfram	19,1
Kupfer, gegossen	8,83—8,92	Zink	6,9—7,2
Draht, geh. od. gewalzt	8,94	Zinn	7,3
elektrolyt.	8,88—8,95		

¹⁾ Dingl. Polyt. J. Bd. 334. S. 69, 1919.

Verschiedene Materialien.

Asbest	2,1—2,8	Anthracit	1,4—1,7
Asbestpappe	1,2	Retortenkohle	1,9
Asphalt	1,1—1,5	Koks im Stück	1,4
Bernstein	1,0—1,1	Holzkohle im Stück	1,5
Beton	1,80—2,45	Kohlenstäbe	1,6
Bleioxyd, -glätte	9,3—9,4	Kolophonium	1,07
Bleisuperoxyd	8,9	Kork	0,24
Braunstein	3,7—4,6	Kupfervitriol	2,3
Chlornatrium	2,16	Linoleum	1,15—1,30
Eis von 0°	0,917	Marmor	2,5—2,9
Elfenbein	1,8—1,9	Mennige	8,6—9,1
Fette	0,92—0,94	Papier	0,70—1,15
Flachs, lufttrocken	1,5	Paraffin	0,9
Gips, gegossen	0,97	Pech	1,1
gebrannt	1,81	Porzellan	2,3—2,5
Glas	2,5—2,7	Salmiak	1,5—1,6
Glimmer	2,7—3,2	Schiefer	2,65
Guttapercha	0,97	Schmirgel	4,0
Hanf, lufttrocken	1,5	Schwefel	1,93—2,07
Hartgummi	1,15	Serpentin	2,4—2,7
Harz	1,07	Speckstein	2,6—2,8
Kalziumkarbid	2,26	Stearin	1,0
Kautschuk, nicht vulkan..	0,92—0,96	Vulkanfiber	1,28
Kohlenstoff		Wachs	0,96
Graphit	1,9—2,3	Zement, Portland..	2,7—3,0
Braunkohle	1,2—1,4	Ziegel	1,4—2,0
Steinkohle	1,2—1,5	Zinkvitriol	2,02

Flüssigkeiten.

Äther	0,74	Petroleum	0,8—0,9
Alkohol	0,79	Rizinusöl	0,97
Amylacetat	0,89	Schwefelkohlenstoff	1,29
Benzin	0,7	Spiritus	0,84
Benzol	0,90	Steinkohlenteer	1,20
Öle, Fette	0,91—0,94	Terpentinöl.	0,87

Wässrige Lösungen von Säuren, Alkalien und Salzen.

Dichte bei 15° C	100 Gewichtsteile der Lösung enthalten Gewichtsteile:							
	Schwefel- säure H_2SO_4	Salpeter- säure HNO_3	Salz- säure HCl	Kali- lauge KHO	Natron- lauge $NaHO$	Chlor- natrium $NaCl$	Kupfer- vitriol $CuSO_4$ + 5 H_2O	Zink- vitriol $ZnSO_4$ + 7 H_2O
1,05	7,5	8,2	10	6,1	4,3	6,9	7,8	8,5
1,10	14	17	20	12	8,7	14	15	17
1,15	21	25	30	17	13	20	28	24
1,20	27	32	40	22	18	26		31
1,25	33	40		27	22			37
1,30	39	47		31	27			44
1,4	50	65		39	37			55
1,5	60	91		47	46			
1,6	69			55	56			

Wärme.

(23) Temperaturen. Siedetemperatur T des Wassers bei verschiedenen Barometerhöhen (b_0):

$b_0 = 740$	745	750	755	760	765	770
$T = 99,3$	99,4	99,6	99,8	100,0	100,2	100,4.

Umrechnung eines Gasvolumens von der Temperatur $t^\circ \text{C}$ und dem Druck b mm Quecksilber auf 0° und 760 mm:

$$\text{Volumen bei } 0^\circ = \text{Volumen bei } t^\circ \times \frac{273}{273+t} \cdot \frac{b}{760}$$

Schmelz- und Siedepunkte.

Metalle und Legierungen	Schmelzpunkt $^\circ \text{C}$	Siedepunkt $^\circ \text{C}$	leicht schmelzbare Legierungen				Schmelzpunkt $^\circ \text{C}$	
			Gewichtsteile					
			<i>Cd</i>	<i>Sn</i>	<i>Pb</i>	<i>Bi</i>		
Aluminium	658	1800						
Blei . . .	327,4	1525						
Eisen, rein.	1600	2450	Lipowitz	3	4	8	15	60—65,5
Roheisen	1100—1200		Wood	1	1	2	4	65,5—70
Stahl . .	1300—1400		Rose . . .	—	4	4	8	95
Gold . . .	1063	2530	Organische Körper				Schmelzpunkt	Siedepunkt
Iridium . .	2340		Alkohol					78,5
Bronze . .	etwa 900		Amylacetat zur Hefnerlampe					138
Deltametall	950		Äther					35
Messing . .	etwa 900		Benzin					90—110
Kupfer . .	1083	2310	Ligroin					110—120
Magnesium	651	1120	Paraffin, weich					38—52
Nickel . . .	1460	2325	„ hart					52—56
Platin . . .	1764	2400	Schmalz, Talg, Wachs					40—65
Quecksilber	—38,9	357	Terpentinöl					160
Silber . . .	960,5	1950	Wallrat					44—44,5
Tantal . . .	2900		Gase					
Wolfram . .	3000	3710	Schweflige Säure					—10
Zink	419,4	918	Ammoniak					—33
Zinn	231,8	2270	Kohlensäure					—78
Schwefel . .	119	444,5	Sauerstoff					—183
Selen	217	690	Kohlenoxyd					—190
Chlornatrium	801		Stickstoff					—196
			Wasserstoff					—253
			Helium					—268

(24) Inneres Wärmeleitungsvermögen einiger Körper,

bezogen auf $\text{cm}^2, \text{cm}, ^\circ \text{C}, \text{cal}$.

Aluminium . .	0,35	Kohle	{	0,0003	Quecksilber . .	0,02
Antimon . . .	0,04			—0,0004	Schiefer	0,0008
Blei	0,08	Kupfer		0,7—1,0	Silber	1,1
Eisen	0,16	Luft		0,00005	Wismuth	0,017
Glas	0,002	Marmor		0,001—0,002	Woodsches	
Graphit	0,16	Messing		0,2—0,3	Metall	0,03
Hartgummi . .	0,0002	Neusilber . . .		0,07—0,10	Zinn	0,14
Holz	0,0003	Paraffin		0,0001	Zink	0,30
Kadmium . . .	0,21	Porzellan . . .		0,002		

(25) Spezifische Wärme fester und flüssiger Körper.

Äther	0,56	Platin	0,03
Alkohol	0,58	Porzellan	0,17
Aluminium	0,21	Quarz	0,19
Blei, fest	0,031	Quecksilber	0,033
flüssig	0,040	Roses Metall	0,04
Bleiglätte	0,05	Schwefel	0,17
Chloroform	0,23	Schwefelkohlenstoff	0,24
Eis	0,5	Schwefelsäure, konz.	0,33
Eisen bei 0°	0,112	Silber	0,055
100°	0,114	Tantal	0,036
300°	0,127	Terpentinöl	0,42
Stahl 20—100°	0,118	Wismut	0,029
Schmiedeeisen	0,108	Zink	0,092
Glas	0,19	Zinn	0,052
Gold	0,03	Woods Metall	0,04
Kohle, Gaskohle	0,2—0,3		
Holzkohle	0,16—0,20	Atmosphärische Luft,	
Graphit 0°	0,15	Kohlensäure, Sauerstoff	
200°	0,30	und Stickstoff bezogen	
Kupfer	0,091	auf gleiche Masse Wasser	
Magnesium	0,25	bei konstantem Druck	0,23
Messing	0,093	bei konstant., Volumen	0,17
Nickel	0,11		

(26) Verdampfungswärme bei 760 mm Druck.

Äther	90	Quecksilber	68
Alkohol	210	Schwefel	362
Chloroform	58	Wasser	539

(27) Ausdehnungskoeffizienten.

Lineare Ausdehnungskoeffizienten fester Körper.

Aluminium	22 . 10 ⁻⁶	Kupfer	17 . 10 ⁻⁶
Blei	28 . 10 ⁻⁶	Messing	19 . 10 ⁻⁶
Bronze	18 . 10 ⁻⁶	Neusilber	18 . 10 ⁻⁶
Eisen und Stahl	12 . 10 ⁻⁶	Nickel	13 . 10 ⁻⁶
Glas	6 bis 10 . 10 ⁻⁶	Platin	9 . 10 ⁻⁶
Graphit	8 . 10 ⁻⁶	Platin-Iridium	9 . 10 ⁻⁶
Hartgummi	80 . 10 ⁻⁶	Porzellan	5 . 10 ⁻⁶
Holz, quer	30 bis 60 . 10 ⁻⁶	Schwefel	80 . 10 ⁻⁶
„ längs	3 bis 10 . 10 ⁻⁶	Silber	19 . 10 ⁻⁶
Invar 64 Fe, 36 Ni	2 . 10 ⁻⁶	Zinn	23 . 10 ⁻⁶
Kohle, Gaskohle	5 . 10 ⁻⁶	Zink	30 . 10 ⁻⁶

Kubische Ausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten und Gasen.

Atmosphärische Luft, Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Kohlen- säure	0,0037
Äther, flüssig	0,0021
Alkohol „	0,0012
Quecksilber	0,00018
„ in Glas, scheinbar	0,00015
Wasser 4—25°, Mittel	0,0001

Zweiter Abschnitt.

Magnetismus und Elektrizität.

Magnetismus.

(28) Magnetische Stoffe. Am stärksten magnetisierbar sind: Eisen, Stahl, in geringerem Maße Magnetisenstein (Fe_3O_4), Nickel, Kobalt sowie die Legierungen von Kupfer mit Manganaluminium und Manganzinn (H e u s l e r). Zwar zeigen alle diese Materialien auch nach Aufhören der magnetisierenden Kraft sogenannten „remanenten“ Magnetismus, doch verschwindet dieser durch magnetische Felder, Erschütterungen usw. leicht wieder bei den „magnetisch weichen“ Materialien (reines Eisen, Eisensiliziumlegierungen u. dgl.), schwerer bei den übrigen, „magnetisch harten“, am schwersten bei bestimmten Stahlsorten, die sich daher besonders zu permanenten Magneten eignen (30, 39).

(29) Verteilung des Magnetismus. Bei jedem Magnet scheint die Wirkung nach außen von zwei verhältnismäßig kleinen Stellen nahe den Enden auszugehen, den Polen (ihre Verbindungslinie = magnetische Achse), während der Teil in der Mitte zwischen den Polen, die Indifferenzzone, nach außen fast keine Wirkung ausübt. Bei vielen Berechnungen darf man sich einen Magnet durch zwei starr verbundene punktförmige Magnetpole ersetzt denken, in denen der ganze freie Magnetismus konzentriert ist. Der Polabstand beträgt etwa $\frac{5}{6}$ der Länge eines stabförmigen bzw. des Durchmessers eines scheiben- oder ringförmigen Magnetes, hängt jedoch noch von der Gestalt des Magnetes und der Stärke der Magnetisierung ab.

Bei einem Rotationsellipsoid von der Länge l ist nach dieser Definition (Fernwirkung) der Polabstand = $0,775 l$ (vgl. z. B. G a n s, ETZ 1907, S. 529; dort sind auch die Bedingungen für die Zulässigkeit der Annahme punktförmiger Pole diskutiert). Nach einer zweiten, weniger gebräuchlichen Definition wird der Pol als Schwerpunkt des freien Magnetismus betrachtet; der Polabstand nach dieser Definition ist im allgemeinen kleiner, z. B. beim Rotationsellipsoid nur $0,67 l$.

Die Verteilung des Magnetismus im Innern des Magnetes ist der des freien Magnetismus entgegengesetzt; an den Polen hat der im Innern vorhandene Magnetismus ein Minimum, in der Indifferenzzone ein Maximum.

(30) Herstellung der Magnete. Das beste Material war bisher harter Stahl mit 0,7—1,2 % C und einem Zusatz von 3—6 % W, Cr oder Mo; Härtungstemperatur 800—850°. Bedeutende Verbesserungen sind neuerdings erzielt worden durch Zusatz von 4—5 % Mn, 4 % Cr und 35 % Co (Gumlich, ETZ 1923, H. 7; das Material wird von Krupp hergestellt) oder von 5—9 % W, 1,5—3 % Cr, 30—40 % Co (Honda und Saitô, Phys. Rev. R. 2, Bd. 16, S. 495). Starke Magnete setzt man aus dünneren Stäben oder Hufeisen zusammen, die vorher einzeln magnetisiert worden sind.

Die zu magnetisierenden Stahlstäbe oder -hufeisen werden an die Pole eines kräftigen hufeisenförmigen Stahl- oder Elektromagnetes gelegt und ein wenig

hin- und hergezogen, ein Stab auch um seine Längsachse gedreht. Vor dem Abreißen legt man dem Hufeisen einen Anker vor. Gerade Stäbe magnetisiert man am besten in einer von einem starken Strom durchflossenen Spule. Statt einer langen Spule, die den ganzen Stab bedeckt, genügt zur Not auch eine kurze Spule, die man über den Stab oder das Hufeisen der Länge nach wezieht. Besonders kräftige Magnetisierung erreicht man bei Hufeisenmagneten, wenn man den ganzen Raum zwischen den Schenkeln mit einem oder mehreren starken Kabeln anfüllt, durch die man ganz kurz einen möglichst hohen Strom schickt.

Haltbare Magnete. Im allgemeinen nimmt die Stärke permanenter Magnete schon bei längerem Lagern, besonders aber beim Gebrauch, infolge kleiner Temperaturschwankungen und Erschütterungen auch bei sorgfältiger Behandlung ab. Um dies möglichst zu vermeiden, behandelt man sie in folgender Weise (Alterung): Vor oder nach dem ersten Magnetisieren werden sie für mehrere Stunden in den Dampf von siedendem Wasser gebracht; nach dem Abkühlen magnetisiert man sie wieder und nimmt nun eine Reihe von kürzeren Erwärmungen und Abkühlungen vor. Sodann werden sie kräftigen Erschütterungen (Schlägen mit einem Holzhammer u. dgl.) ausgesetzt (Strouhal und Barus).

Temperaturkoeffizient permanenter Magnete. Das Moment gealterter Magnete nimmt bei mäßigen Temperaturschwankungen nicht mehr dauernd ab, wohl aber ändert es sich mit der Temperatur: es sinkt mit steigender Temperatur und nimmt mit fallender wieder zu. Die Änderung (der Temperaturkoeffizient) beträgt im allgemeinen 0,02—0,06 % für 1° C. Die Größe desselben hängt vom Material, aber auch von der Gestalt des Magnets ab: Langgestreckte Stabmagnete und lange, gut geschlossene Hufeisenmagnete haben einen geringeren Temperaturkoeffizienten als kurze, gedrungene Stabmagnete oder kurze, schlecht geschlossene Hufeisenmagnete. Magnete aus reinem, bei 1100° gehärtetem Kohlenstoffstahl mit etwa 1,4% C besitzen keinen Temperaturkoeffizient, aber auch nur geringes magnetisches Moment (Gumlich, Wiss. Abh. der Reichsanstalt IV, H. 3, S. 343).

Äußerungen der magnetischen Kraft.

(31) **Magnetische Verteilung.** Nähert man einem Magnet ein Stück Eisen oder Stahl, so wird das letztere ebenfalls zu einem Magnet; jeder Pol des ersteren Magnetes erzeugt in den ihm zunächst liegenden Teilen des genäherten Körpers einen ihm ungleichnamigen Pol, in den entfernteren Teilen einen gleichnamigen Pol.

(32) **Tragkraft der Magnete.** Ein Magnetpol hat die Eigenschaft, weiches Eisen anzuziehen und mit einer gewissen Kraft festzuhalten; diese „Tragkraft“ des Magnetes wird gemessen durch das Gewicht, das gerade ausreicht, um ein angezogenes und festgehaltenes Stück Eisen vom Magnetpol loszureißen. Zwischen der erreichbaren Tragkraft P und der Masse m des Magnetes ist die Beziehung gefunden worden

$$P = a \cdot \sqrt[3]{m^2} \text{ Kilogramm-Kraft,}$$

worin m in kg gemessen wird (D. Bernoulli). Die Zahl a ist für einen Pol = 10, für zwei Pole = 20 (ungefähr), doch spielen Gestalt und Material dabei eine erhebliche Rolle. Die Tragkraft ist im wesentlichen der Polfläche proportional, s. (125, b).

Allgemeiner: Treten vom Magnet zum Anker auf 1 cm^2 Kraftlinien senkrecht über, so ist nach Maxwell bei $F \text{ cm}^2$ Polfläche die Anziehung P zwischen Magnet und Anker gegeben durch

$$P = \frac{F \cdot \mathfrak{B}^2}{8\pi} \text{ Dyn} \approx \frac{F \cdot \mathfrak{B}^2}{25000} \text{ Gramm-Kraft.}$$

(33) **Anziehung und Abstoßung.** Eisen und nicht magnetisierter Stahl werden von beiden Polen angezogen (31). — Für Magnetpole untereinander gilt der Satz:

Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige Pole ziehen sich an.

Gesetz der magnetischen Fernwirkung. Die Kraft, mit welcher ein Magnetpol einen anderen anzieht bzw. abstößt, ist nach der Verbindungslinie der beiden Pole gerichtet und unabhängig von der Natur des zwischenliegenden Mittels, wenn das letztere unmagnetisch ist. Sie ist proportional den wirkenden Magnetismen und umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung der Pole voneinander:

$$P = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$$

Maß des Magnetismus eines Poles. Die Einheit des Magnetismus besitzt also derjenige Pol, der einen gleichstarken, 1 cm entfernten ungleichnamigen Pol mit der Einheit der Kraft (Dyn) anzieht, d. i. nahezu mit derselben Kraft, mit der die Masse von 1 mg von der Erde angezogen wird.

(34) Magnetisches Moment. Praktisch kommen niemals vereinzelt Pole, sondern immer Magnete, d. i. Paare von ungleichnamigen Polen vor. Die Pole eines Magnetes sind in der Regel gleich stark; besitzt der eine Nordmagnetismus von der Stärke m , also $+m$, so hat der andere Südmagnetismus von der Stärke m , d. i. $-m$. Das Produkt aus dem Magnetismus eines Poles in den Polabstand heißt das magnetische Moment des Magnetes. Polabstand s. (29).

Bei beliebiger Verteilung der magnetischen Mengen dm gilt allgemein für das magnetische Moment $\mathfrak{M} = \int \mathbf{r} \cdot d\mathfrak{m}$, wo \mathbf{r} den Radiusvektor von einem beliebigen Raumpunkt nach dem Punkt dm bezeichnet. Die einzelnen magnetischen Momente sind vektoriell zusammensetzen bzw. in Komponenten $\mathfrak{M}_x = \int x \, d\mathfrak{M}$ usw. zu zerlegen.

Wirkung eines Magnetes auf einen anderen. Ein Magnetstab (vom Moment \mathfrak{M}) liege fest an einer Stelle einer wagerechten Ebene, in der eine auf einer Spitze gelagerte oder aufgehängte Magnetnadel vom Moment \mathfrak{M}' sich drehen kann.

Erste Hauptlage (Gauß). Die Nadel liegt in der Verlängerung der magnetischen Achse des Stabes und steht senkrecht zur letzteren.

$$\text{Drehmoment } D_1 = 2 \cdot \frac{\mathfrak{M} \cdot \mathfrak{M}'}{r^3} \text{ CGS.}$$

Zweite Hauptlage (Gauß). Die Nadel liegt mit ihrer magnetischen Achse in der Senkrechten auf der Mitte der magnetischen Achse des Stabes.

$$\text{Drehmoment } D_2 = \frac{\mathfrak{M} \cdot \mathfrak{M}'}{r^3} \text{ CGS.}$$

Zwischenlagen. Bildet die Nadel mit den obigen Richtungen den Winkel φ , so sind die betreffenden Ausdrücke noch mit $\cos \varphi$ zu multiplizieren. Macht der Stab mit r den Winkel ψ , so kann man ihn ersetzt denken durch zwei Stäbe, von denen der eine mit dem Moment $\mathfrak{M} \cos \psi$ aus der ersten, der andere mit dem Moment $\mathfrak{M} \sin \psi$ aus der zweiten Hauptlage wirkt.

Diese Gesetze gelten nur auf Entfernungen, die so groß sind, daß die Quadrate der Magnetlängen gegen das Quadrat des Abstandes der Magnete voneinander verschwinden.

Maß des magnetischen Momentes. Ein Magnet vom Moment $\mathfrak{M} = 1$ übt in der zweiten Hauptlage aus der (großen) Entfernung r auf einen anderen, gleichstarken Magnet ($\mathfrak{M}' = 1$) das Drehmoment $1/r^3$ aus, welches also so groß ist, als wenn an dem letzteren Magnet im Abstand 1 cm von der Drehachse ein Zug gleich der Kraft $1/r^3$ wirkte.

(35) Spezifischer Magnetismus ist der Quotient aus dem magnetischen Moment durch die Masse des Magnetes.

Der spezifische Magnetismus, welcher nicht nur vom Material, sondern in hohem Maße auch von der Gestalt des Magnetes abhängt, ist bei guten Stahlmagneten etwa = 40 CGS, bei besonders gestreckter Form bis 100 CGS. Elektromagnete aus sehr gutem weichen Eisen erreichen 200 CGS.

Stärke der Magnetisierung \mathfrak{I} ist der Quotient aus dem magnetischen Moment durch das Volumen des Magnets, also das Moment für das Kubikzentimeter oder die Polstärke für das Quadratcentimeter des Magnetes $\mathfrak{I} = \mathfrak{M}/V = ml/ql = m/q$. Werte nach der Formel in (37) und der Tabelle S. 43 zu berechnen.

(36) Magnetisches Feld und Potential; magnetische Spannung. Die Umgebung eines Magnetpoles, eines Magnetes oder einer Vereinigung von Magneten heißt deren magnetisches Feld. Die Kraftlinien des Feldes geben für jeden Punkt die Richtung der resultierenden magnetischen Kraft an; die Linien nehmen im allgemeinen ihren Weg strahlenartig von einem Pol zum nächsten ungleichnamigen Pol.

Im magnetischen Felde von der Stärke 1 erleidet der Pol 1 die Kraft \mathfrak{I} ; ist die Stärke \mathfrak{H} , so übt das Feld auf den Pol m die Kraft $\mathfrak{H} \cdot m$ aus. Wird ein Pol von der Stärke m durch das Feld \mathfrak{H} auf irgendeinem Wege s von einem Punkt A zu einem Punkt B geführt, so ist die dabei aufzuwendende Arbeit $= m \int_A^B (\mathfrak{H}, ds)$ $= m \int_A^B \mathfrak{H}_s ds$, ($\mathfrak{H}_s =$ Projektion von \mathfrak{H} auf ds). $\int_A^B \mathfrak{H}_s ds = \Pi_{AB}$ oder $\int_a \mathfrak{H}_s ds = \Pi_a$ ist die magnetische Spannung (Potentialdifferenz) zwischen den Punkten A und B oder längs der Strecke a ; $\oint \mathfrak{H}_s ds$ längs eines geschlossenen Weges ist die magnetische Umlaufspannung. Diese wird Null für jeden geschlossenen Weg, der keine stromdurchflossene Stellen enthält: $\oint \mathfrak{H} ds = 0$, und $= 0,4 \pi w I$ für einen Weg, der mit wI Amperewindungen verkettet ist ($\text{rot } \mathfrak{H} = 4 \pi c/10$; c in A/cm²) vgl. (103).

Das magnetische Feld \mathfrak{H} im Innern einer langen Spule, welche auf die Längeneinheit K Windungen enthält ($K = w/l$) und vom Strome $I A$ durchflossen wird, ist daher $0,4 \pi K I$.

In den nicht von Strömen durchflossenen Teilen des Feldes lassen sich die Komponenten von \mathfrak{H} als Ableitungen eines Potentials ψ darstellen, so daß:

$$\mathfrak{H}_x = -\frac{\partial \psi}{\partial x}; \quad \mathfrak{H}_y = -\frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad \mathfrak{H}_z = -\frac{\partial \psi}{\partial z} \quad \text{oder} \quad \mathfrak{H} = -\text{grad } \psi.$$

Starke und dabei gleichmäßige Felder erhält man zwischen den Polen eines Elektromagnetes mit ziemlich breiten und nahe aneinander gerückten Polflächen oder, was auf dasselbe hinauskommt, im schmalen Schlitz eines Eisen-Rings oder -Vierecks, dessen Wickelung von einem Strom durchflossen wird. Die Beziehung zwischen Magnetisierungsstrom und Feldstärke muß zunächst empirisch ermittelt und in Kurvenform aufgetragen werden; dann genügt bei gewissen Vorsichtsmaßregeln (Gans und Gmelin, Ann. d. Phys. (4) Bd. 28, S. 925; 1909) zur Herstellung eines bestimmten Feldes die Anwendung eines bestimmten Magnetisierungsstromes. Schwächere, gleichmäßige Felder liefert die Mitte einer gleichmäßig bewickelten, relativ langen Spule.

Um den Verlauf der Kraftlinien in einem magnetischen Feld zu untersuchen, kann man sich einer kurzen Magnetnadel bedienen, die sich um zwei zur magnetischen Achse senkrechte Achsen drehen kann; sie stellt sich überall in die Richtung der Kraftlinien ein. Die Richtung, nach welcher der Nordpol der kleinen Magnetnadel zeigt, rechnen wir als positive Richtung der Kraftlinien. — Oder man bringt in das zu untersuchende Feld eine Papier- oder Glastafel, die mit Eisenfeilspänen bestreut ist; die Eisenteilchen ordnen sich bei leisem Klopfen in der Richtung der Kraftlinien an; um sie in ihrer Stellung festzuhalten, bestäubt man sie mit Gummi- oder Schellacklösung.

Wirkung auf eine Magnetnadel. Ist die Stärke des magnetischen Feldes \mathfrak{H} , das magnetische Moment der Nadel \mathfrak{M} , und schließt die magnetische Achse der letzteren mit der Richtung der Kraftlinien den Winkel φ ein, so erfährt die Nadel ein Drehmoment von der Größe $\mathfrak{H} \cdot \mathfrak{M} \cdot \sin \varphi$. Die Schwingungsdauer einer Magnetnadel im Magnetfeld ist $\pi \sqrt{J/\mathfrak{H} \mathfrak{M}}$ s. (J = Trägheitsmoment.)

Als Maß der Stärke des magnetischen Feldes [Messung s. (244)] gilt die Anzahl der Kraftlinien auf 1 cm^2 . Im magnetischen Feld von der Stärke 1 Gauß (eine Kraftlinie auf 1 cm^2) erfährt eine Magnetnadel vom Moment 1, deren magnetische Achse senkrecht zu den Kraftlinien steht, das Drehmoment 1.

(37) **Magnetische Induktion (magnetische Dichte).** Die magnetische Kraft oder die Stärke des magnetischen Feldes \mathfrak{H} an irgendeiner Stelle erzeugt die magnetische Induktion \mathfrak{B} . Wirkt \mathfrak{H} auf einen magnetischen Körper, so ist im Innern des Magnetes

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi \mathfrak{J}.$$

\mathfrak{H} und $4\pi \mathfrak{J}$ haben zwar im allgemeinen verschiedene Richtung, so daß sie als Vektoren zu addieren sind, in dem hier wichtigsten Falle, im Eisen, gilt jedoch, wenn man von der Hysterese absieht, die obige einfache Formel. Ferner ist

$$\frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}} = \mu \qquad \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}} = \kappa \qquad \mu = 1 + 4\pi \kappa.$$

μ heißt Permeabilität oder Durchlässigkeit,
 κ „ Suszeptibilität oder Aufnahmefähigkeit.

Für Luft ist μ sehr nahe = 1, $\kappa = 0$.

Der Pol von der Stärke 1 sendet 4π Kraftlinien, der Magnet von der Magnetisierungsstärke \mathfrak{J} sendet $4\pi \mathfrak{J} q$ Kraftlinien aus; q = Querschnitt.

Die Linien \mathfrak{B} bilden in sich geschlossene Bahnen. Umgrenzt man auf einer beliebigen Fläche, die die Linien \mathfrak{B} schneidet, einen kleinen Teil durch eine in sich

geschlossene Kurve, so bilden die durch diese Kurve gehenden Linien \mathfrak{B} eine Induktionsröhre. Diese kann sich durch beliebiges Material, z. B. teilweise durch Eisen, teilweise durch Luft, erstrecken, wobei sich im allgemeinen ihr Querschnitt q ändert, und schließt sich in sich selbst. Eine solche Röhre enthält in jedem Querschnitt gleich viele Induktionslinien \mathfrak{B} ($q_1 \mathfrak{B}_1 = q_2 \mathfrak{B}_2$), aber verschieden viele Feldlinien \mathfrak{H} . Der Stoff, durch den die Bahn führt (ob Eisen, Luft, Holz usw.), ist dabei ganz gleichgültig. In der Technik werden die Induktionslinien vielfach Kraftlinien, der Induktionsfluß Kraftfluß, in der Physik die Feldlinien häufig Kraftlinien genannt.

(38) **Magnetisierungskurve.** Stellt man den Zusammenhang zwischen der magnetisierenden Kraft \mathfrak{H} und der erzeugten Induktion \mathfrak{B} oder der Magnetisierungsstärke \mathfrak{J} durch eine Kurve dar, so erhält man ein Bild, wie es Abb. 18 zeigt. Vom unmagnetischen Zustand im Nullpunkt der Koordinaten ausgehend (Nullkurve)

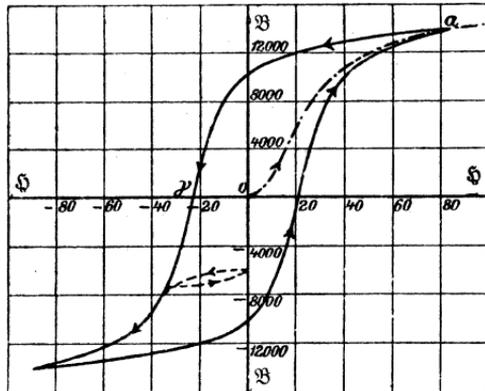


Abb. 18. Magnetisierungskurve (Hystereseschleife). 1

wächst \mathfrak{B} oder \mathfrak{H} bei schwachen magnetisierenden Kräften erst langsam, dann bedeutend rascher, schließlich wieder immer langsamer. Läßt man in irgend einem Punkte dieser Kurve, z. B. bei a , die magnetisierende Kraft wieder abnehmen, so entsprechen den neuen Werten andere \mathfrak{B} oder \mathfrak{H} als beim Zunehmen des Stromes. Ist die magnetisierende Kraft Null geworden, so haben \mathfrak{B} oder \mathfrak{H} noch ganz erhebliche Werte, um dann aber nach Umkehren des Feldes in ähnlicher Weise abzufallen, wie sie vorher im steilsten Teil der Kurve angestiegen waren. Die Ordinate zu O (in der

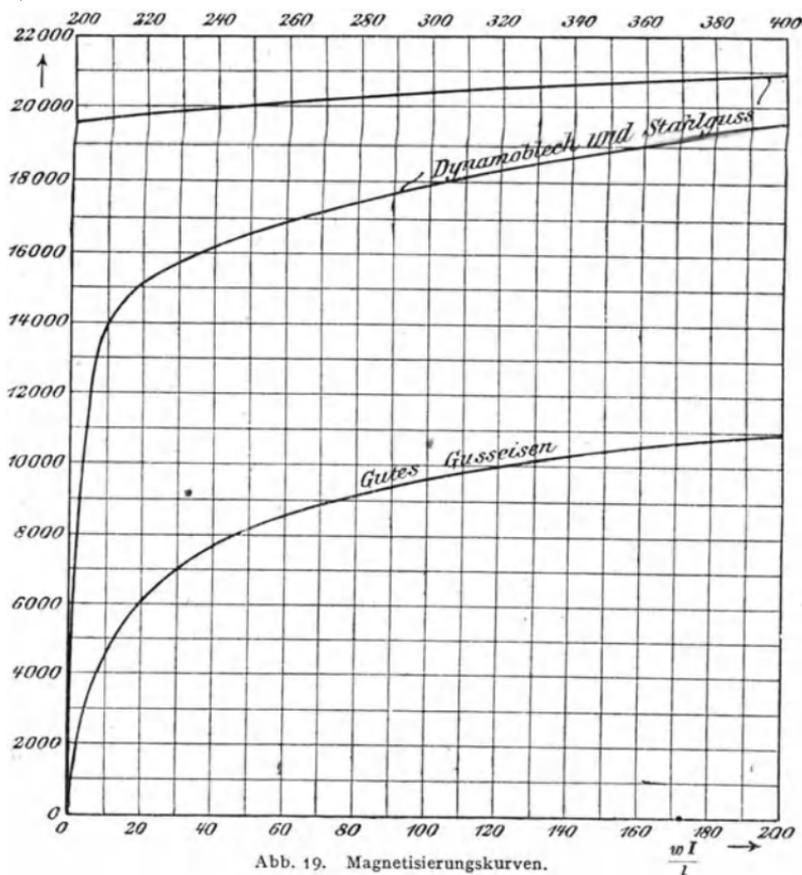


Abb. 19. Magnetisierungskurven.

Abb. etwa 10000) heißt Remanenz. Die Abszisse $O\gamma$ heißt Koerzitivkraft (H o p k i n s o n); sie bezeichnet diejenige Feldstärke, welche nötig ist, um die Remanenz zu beseitigen. Die ausgezogene Kurve stellt einen vollen Wechsel der Magnetisierung von einem hohen Werte von \mathfrak{B} oder \mathfrak{H} in der einen zu einem gleich großen Werte in der entgegengesetzten Richtung und wieder zurück dar. Wie sich aus der Abb. 18 ergibt, zeigt der Magnetismus eine Art von Beharrungsvermögen, insofern er hinter der magnetisierenden Kraft zurückbleibt, wenn diese einen Kreisprozeß beschreibt. Diese Eigenschaft nennt man Hysterese (E w i n g), eine vollständige magnetische Schleife bezeichnet man als Hystereseschleife. Nach mehrfachem Durchlaufen einer solchen Schleife werden die magnetischen Größen genau zyklisch, d. h. jeder folgende Wechsel verläuft wie der vorhergehende.

Ein Zurückbleiben der Magnetisierung tritt auch dann auf, wenn man an irgendeinem Punkte der Hystereseschleife eine kleinere Schleife einschaltet;

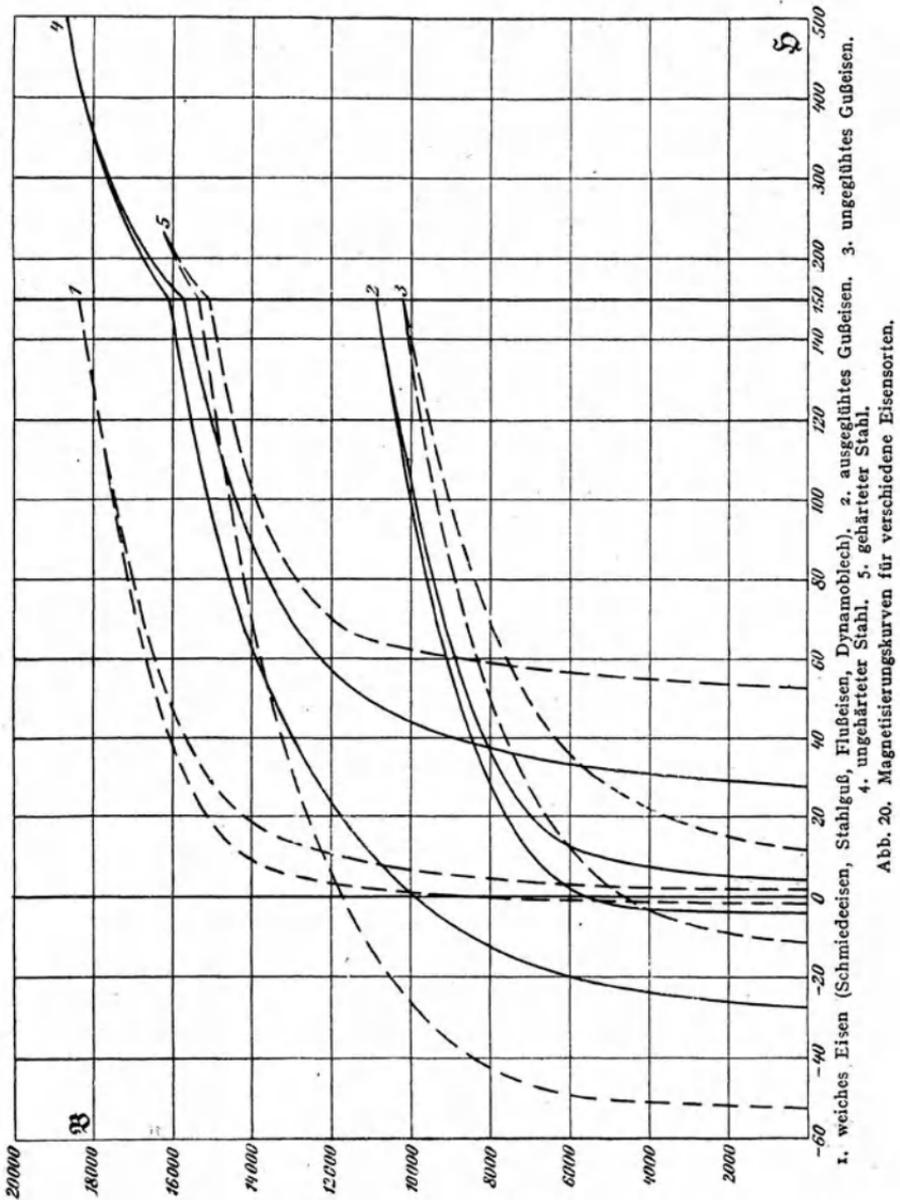


Abb. 20. Magnetisierungskurven für verschiedene Eisensorten.

so zeigt Abb. 18 links unten den Verlauf einer Änderung von \mathfrak{H} von einem höheren negativen Wert zu Null und wieder zurück.

Ist eine derartige Schleife sehr klein, so schrumpft sie zu einer Geraden

zusammen, deren Neigung gegen die Φ -Achse nicht mehr von der Größe der zusätzlichen Feldstärke $d\Phi$ abhängt. Entspricht der Feldänderung $d\Phi$ die Änderung $d\mathfrak{B}$ der Induktion, so wird die Größe $d\mathfrak{B}/d\Phi$ als reversible Permeabilität bezeichnet (Gans). Hierher gehört auch der erste Anstieg der Nullkurve (s. oben); die Permeabilität für sehr kleine Feldstärken ($\lim \Phi = 0$) bezeichnet man dann als Anfangspermeabilität μ_0 .

Abb. 19 gibt die Nullkurven von Stahlguß bzw. normalem Dynamoblech und von gutem Gußeisen, Abb. 20 (S. 39) die Hystereschleifen von fünf Eisen- und

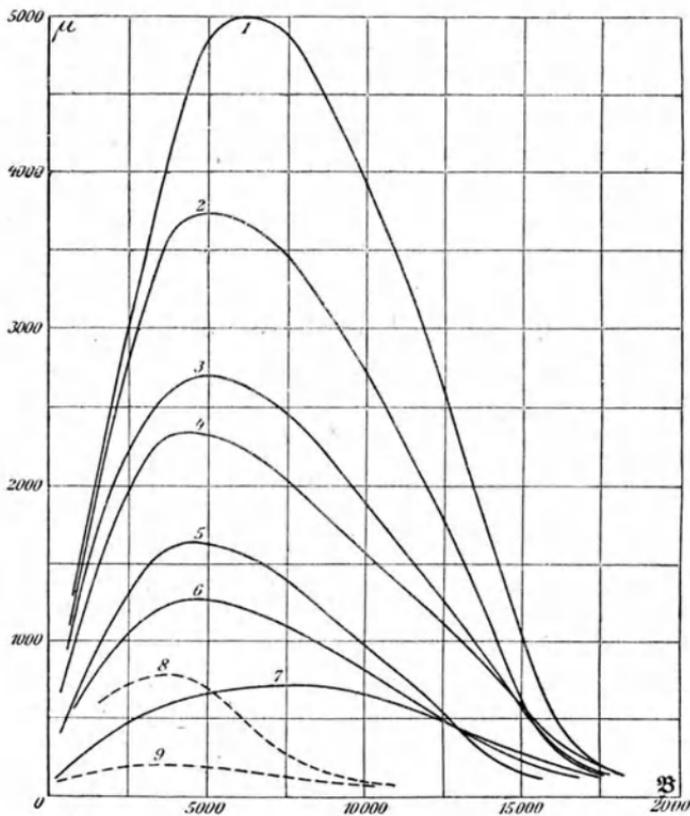


Abb. 21. Permeabilität und Induktion für Stahlguß (1—7) und Gußeisen, geglüht (8), ungeglüht (9).

Stahlorten. — Abb. 21 stellt die Beziehung zwischen der Permeabilität μ und der Induktion \mathfrak{B} für Stahlguß und Gußeisen dar. Man erhält die Werte von μ , wenn man die der Nullkurve (strichpunktierte Linie in Abb. 18) entnommenen Werte der Induktion \mathfrak{B} durch die zugehörigen Werte der Feldstärke Φ dividiert.

Auch bei weichem Eisen ist μ für sehr geringe magnetisierende Kräfte ($\Phi = 0,01$) klein, gewöhnlich etwa 100—200, ausnahmsweise bis gegen 500 (Anfangspermeabilität μ_0), wächst dann rasch auf einen hohen Wert (1000—10 000; Maximalpermeabilität μ_{max}) und sinkt bei sehr hohen magnetisierenden Kräften wieder auf ganz kleine Werte.

Bei Gußeisen, weichem und hartem Stahl überschreitet μ selten die Grenze 200—250; doch kann dieser Wert bei Gußeisen durch geeignetes Ausglühen auf das Drei- bis Vierfache gesteigert werden (vgl. Tab. auf S. 43, Nr. 25 bis 28).

Eine Beziehung zwischen der Maximalpermeabilität μ_{max} , der Remanenz R und der Koerzitivkraft C gibt für weiches, bis zur Sättigung magnetisiertes Eisen die empirische Formel $\mu_{max} = R/2C$ (G u m l i c h und S c h m i d t).

Für Werte von \mathfrak{H} , welche >7 sind, gilt die angenäherte Gleichung

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} \left(1 + \frac{10^3}{a + b \mathfrak{H}} \right),$$

worin a und b Konstanten bezeichnen.

(39) Magnetische Eigenschaften verschiedener Eisen- und Stahlsorten. In der folgenden Tabelle sind die Werte für die Magnetisierbarkeit verschiedener gehärteten Stahlsorten zusammengestellt (Frau C u r i e und Reichsanstalt). Hierbei bedeutet t die Härtungstemperatur, C die Koerzitivkraft, R die Remanenz, \mathfrak{B} die Induktion für $\mathfrak{H} = 500$, W die Energievergeudung für 1 cm^3 (40); die Indizes \mathfrak{s} bzw. r lassen erkennen, ob die betreffenden Werte mit Stäben von 20 cm Länge und 1 cm^2 Querschnitt, die bis zur Sättigung magnetisiert waren, oder mit geschlossenen Ringen gewonnen wurden.

Maßgebend für die Güte eines permanenten Magnets ist die Stärke der Magnetisierung, welche er festzuhalten vermag. Diese hängt aber, wie die Tabelle zeigt, einmal ab von der Höhe der Remanenz $R_r = 4\pi \cdot \mathfrak{J}_r$, die er bei der Untersuchung im geschlossenen Kreise (Ring, Joch) besitzt, sodann aber auch von der Größe der Koerzitivkraft. Je kürzer, gedrungenener ein Magnetstab, je weniger geschlossen ein Hufeisenmagnet ist, desto vorteilhafter ist eine hohe Koerzitivkraft selbst auf

Material	Kohlenstoff in %	t°	$C_{r,s}$	R_s	R_r	\mathfrak{B}_r	W_r	$R_r \cdot C_r \times 10^{-3}$	
Messungen von Frau Curie:									
Kohlenstoffstahl von Firminy	0,06	1000	3,4	400	7850	20110	28000	27	
		0,49	770	23	2800	10490	19660	108000	241
		1,21	770	60	5800	8110	15580	182000	487
Kohlenstoffstahl von Böhler (Steiermark) { weich	0,70	800	49	5300					
		0,99	800	55	5200				
Böhler (Steiermark) { extra zäh, hart	1,17	800	63	5800					
		1,17	800	63	5800				
Kupferstahl von Chatillon & Commentry; 3,9% Cu	0,87	730	66	6200					
		1,07	850	57	6700				
Chromstahl von Assailly; 3,4% Cr	0,76	850	66	6400	10050	16080	260000	663	
Wolframstahl von Assailly; 2,7% W	1,10	850	74	6700					
Wolframstahl von { Spezialstahl, sehr hart; 2,9% W	1,96	800	85	4700					
Böhler (Steiermark) Boreasstahl, gehärtet; 7,7% W	0,59	770	72	7000	10680	16080	280000	769	
Stahl von Allevard	0,51	850	60	6700					
Molybdänstahl von { 3,5% Mo	1,24	800	85	6700					
Chatillon & Commentry 4,0% Mo									
Messungen der Reichsanstalt:									
Chromstahl {	Cr in %	A	2,9	0,9	850	57,4	10900		626
		B	2,9	1,1	850	59,2	10380		615
		C	5,8	1,1	850	64,6	9920		641
		D	2,9	1,1	900	63,1	9560		603
		E	5,8	1,1	900	72,5	9200		666
Wolframstahl {		1876			58,1	10200		593	
		1877			61,5	9700		596	
		1615			63,0	10250		646	
		1614			62,3	10880		679	
		1739			66,4	10880		723	
Kobaltmanganstahl {	36% Co, 3,5% Mn (Gumlich-Krupp) }	4,8	1,1	875	227	9300		2110	
									4 bis 5% Cr
KS-Magnetstahl {	30 bis 40% Co, 5 bis 9% W (Honda-Takagi) }			1,5—3	0,4—0,8	950	226	11560	2610
				1,5—3	0,4—0,8	950	221	10570	2335
				1,5—3	0,4—0,8	950	245	10400	2550
				1,5—3	0,4—0,8	950	257	7790	2000

Kosten der Remanenz. Zur Beurteilung des Materials in bezug auf seine Tauglichkeit zu permanenten Magneten kann das Produkt $R_r C_r$ dienen, das, wie die Tabelle zeigt, bei gutem älterem W- und Cr-Stahl 600×10^3 , bei dem neueren sogar 2000×10^3 übersteigt. Wenn man den Verlauf der Hysteresekurve kennt, so kann man aus der hierdurch gefundenen Remanenz R_r diejenige eines kürzeren Magnetstabes auf folgende Weise berechnen:

Beindet sich ein Magnetstab von der Stärke \mathfrak{J} in einem Felde \mathfrak{H}' , so herrscht, da der freie Magnetismus des Stabes eine entmagnetisierende Wirkung ausübt, d. h. das ungestörte magnetische Feld schwächt, im Innern des Stabes nur die Feldstärke $\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' - N \cdot \mathfrak{J}$. Hierin bezeichnet N den sogenannten Entmagnetisierungsfaktor, der bei sehr gestreckten zylindrischen Stäben nur vom Dimensionsverhältnis v , d. h. dem Quotienten aus Länge und Durchmesser des auf kreisförmigen Querschnitt umgerechneten Stabes, abhängt, und zwar gilt hierfür, wie auch für Rotationsellipsoide, angenähert die Gleichung $N = \frac{4\pi}{v^2} (\log \text{nat } 2v - 1)$. Ist nun,

wie bei der Remanenz, $\mathfrak{H}' = 0$, so wird $\mathfrak{H} = -N \mathfrak{J} \approx -\frac{N \cdot R_r}{4\pi}$. Diese Größe trägt man in dem Punkt, wo der absteigende Ast der Hysteresekurve die Ordinatenachse schneidet, nach der Richtung der negativen Feldstärke ($-\mathfrak{H}$) auf und verbindet den Endpunkt mit dem Nullpunkt. Der Schnittpunkt dieser Scherungslinie mit dem absteigenden Ast gibt den Betrag an, den man für die Remanenz des betreffenden Stabes zu erwarten hat.

In der folgenden Tabelle sind magnetometrisch gewonnene Werte von N für verschiedene Werte von v zusammengestellt (Riborgh Man).

Werte des Entmagnetisierungsfaktors von zylindrischen Stäben (N_1) und von Rotationsellipsoiden (N_2) vom Dimensionsverhältnis v .

v	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	300
N_1	0,68	0,255	0,140	0,0898	0,0628	0,0460	0,0274	0,0183	0,0131	0,0099	0,0078	0,0063	0,0052	0,0025	0,0015	0,0008
N_2	0,70	0,255	0,135	0,0848	0,0587	0,0432	0,0266	0,0181	0,0132	0,0101	0,0080	0,0065	0,0054	0,0026	0,0016	0,0008

In nahezu geschlossenen magnetischen Kreisen (Hufeisenmagneten usw.) ist die entmagnetisierende Kraft viel geringer.

Zur angenäherten, wenn auch nicht einwandfreien, Vorausberechnung der scheinbaren Remanenz der Hufeisenmagnete kann man ein ähnliches Scherungsverfahren wie beim Stabmagnet benützen (Edgcumbe, Electrician Bd. 75, S. 546; 1915).

Die Tabelle auf S. 43 enthält eine Übersicht über die Magnetisierbarkeit verschiedener Eisensorten und über die dabei auftretenden wichtigsten Konstanten. Im allgemeinen gilt die Regel, daß mit wachsender Koerzitivkraft auch die Remanenz und die Energievergeudung [Hystereseverlust (40)] zunimmt, die Maximalpermeabilität abnimmt, doch kommen vielfache Ausnahmen vor.

Mit wachsendem Kohlenstoffgehalt wird das Eisen magnetisch härter, ebenso wirken Verunreinigungen durch Phosphor, Schwefel usw. ungünstig, während Zusatz von Aluminium oder Silizium die Permeabilität bei mäßigen Feldstärken erhöht. Durch Siliziumzusatz wird auch die elektrische Leitfähigkeit des Materials und damit das Auftreten von schädlichen Wirbelströmen in Transformatoren usw. beträchtlich vermindert („legiertes“ Dynamoblech).

Unmagnetische Legierungen. Während die Magnetisierbarkeit des Eisens durch den Zusatz von wenig Nickel (bis 5 %) noch zunimmt, vermindert sie sich durch höheren Nickelzusatz sehr stark. Nickelstahl von ca. 26 % Nickelgehalt ist bei gewöhnlicher Temperatur nahezu unmagnetisierbar (austenitisches Gefüge), er wird dagegen wieder magnetisierbar durch Abkühlung auf

Magnetisierbarkeit verschiedener Eisensorten
(nach Beobachtungen in der Reichsanstalt).

Material	Lfd. Nr.	Φ_{max}	\mathfrak{B}_{max}	B für $\Phi = 100$	Remanenz	Koerz. Kraft	μ_{max}	Energievergeudung (Erg.)	η	Widerstand für m/mm^2 (Ohm)
Elektrolyteisen 1×gegl.	1	150	18870	18050	10850	0,38	14600	—	—	0,099
„ 12×gegl.	2	150	18520	17700	850	0,15	4900	—	—	—
Elektrolyteisen mit 3,5% Si, im Vakuum geschmolzen(Heraeus)	3	147	17740	17000	3000	0,096	19400	—	—	0,52
Walzeisen	4	129	18190	17700	10300	0,60	8350	4900	0,00075	0,113
Schmiedeeisen	5	145	18370	17650	9000	1,65	2850	12300	185	0,148
gegossenes Material (Stahlguß, Flußeisen, Dynamostahl)	6	129	17950	17470	8000	0,80	5240	10100	158	0,143
	7	129	17700	17200	7500	0,95	4070	9400	150	0,154
	8	128	18040	17570	7200	1,04	3200	10700	166	0,142
	9	128	18080	17600	7500	1,35	2610	11400	176	0,167
	10	145	18250	17500	10200	1,50	3380	13600	207	0,148
	11	127	18190	17700	9200	1,82	2460	14700	225	0,154
	12	129	18190	17670	7500	2,00	1900	15700	240	0,129
	13	129	17940	17400	11700	2,42	2250	20300	317	0,158
	14	128	17790	17300	11080	3,27	1620	24200	383	0,217
	15	129	17270	16750	9550	4,33	1100	30200	502	0,196
Dynamoblech (geglüht)	16	129	17430	16900	9800	1,15	4950	9400	154	—
	17	128	19540	19100	7550	1,37	2940	10700	146	—
	18	146	18490	17700	8300	1,62	2660	11200	167	0,144
	19	146	18500	17730	8800	2,39	1840	16200	241	0,144
	20	129	17440	17000	10000	2,90	1740	17600	288	—
	21	127	18320	17800	10150	3,38	1410	22000	332	—
	22	124	18880	18450	11550	4,18	1220	28800	415	—
Dynamoblech (schwach legiert stark)	23	150	18220	17430	9400	1,30	3300	12600	192	—
	24	150	17550	16740	9850	0,77	6200	8090	131	—
Gußeisen	25	155	10320	9030	4630	11,3	200	34600	1310	0,878
	26	155	10930	9900	5560	4,06	800	14900	515	0,798
	27	154	10030	8800	4630	13,2	200	36600	1450	0,989
	28	155	10640	9600	5060	4,68	560	16100	580	—
Stahl, gehärtet	29	234	16220	13900	11700	52,6	195	—	—	0,325
	30	235	15120	12200	10500	61,7	125	—	—	0,360
	31	238	13370	9500	8880	69,7	—	—	—	0,422

Sättigungswerte $4\pi\mathfrak{J}$ für:

reinstes Elektrolyteisen	21600
Schmiedeeisen, guten Stahlguß usw	21200—21400
Stahl (ungehärtet) 21600—1580 p^* (bis 1% C); etwa	19800
„ (gehärtet) 21600—3200 p^* (bis 1,2% C); etwa	17800
Gußeisen etwa	16500
Siliziumlegierungen 21600—480 p^* (bis 5% Si).	
Dynamoblech (schwach legiert) etwa	20500
„ (stark „ „)	19300

* p = % Gehalt von C bzw. Si.

Für Feldstärken über 2000 findet man hieraus die zugehörigen Induktionen nach der Formel $\mathfrak{B} = 4\pi\mathfrak{J} + \mathfrak{H}$.

Temperaturen unter 0° und behält dann die Magnetisierbarkeit auch in höheren Temperaturen bei (martensitisches Gefüge). Durch eine Erhitzung auf ca. 600° wird er wieder unmagnetisch und bleibt in diesem Zustande bei der Abkühlung auf gewöhnliche Temperatur. Es existieren also für derartige (irreversible) Nickellegierungen zwei verschiedene magnetische Zustände innerhalb eines bestimmten Temperaturintervalls, das von der Zusammensetzung der Legierung abhängt. Zusätze von Kohlenstoff, Chrom, Mangan erniedrigen den Umwandlungspunkt sehr beträchtlich, so daß es gelungen ist, Legierungen herzustellen, welche auch bei der Temperatur der flüssigen Luft nicht magnetisierbar werden.

Beim Zusatz von noch mehr Nickel verliert sich diese Eigentümlichkeit, die Legierung wird wieder bei allen Temperaturen magnetisierbar, der magnetische Zustand ist reversibel (H o p k i n s o n, D u m o n t, D u m a s, G u i l l a u m e).

Auch durch den Zusatz von etwa 12 % Mangan wird Stahl praktisch unmagnetisierbar (H a d f i e l d, G u m l i c h).

(40) Hystereseverlust (Energievergeudung). Zur Magnetisierung von 1 cm^3 Eisen von \mathfrak{B}_1 bis zu \mathfrak{B}_2 muß die Energie $\frac{1}{4\pi} \int_{\mathfrak{B}_1}^{\mathfrak{B}_2} \mathfrak{H} \cdot d\mathfrak{B}$ aufgewendet werden. Führt man einen vollständigen Kreisprozeß von $+\mathfrak{B}$ zu $-\mathfrak{B}$ und wieder zurück aus, so gewinnt man beim Rückgange nur einen Teil der Energie wieder, der Rest wird in Wärme verwandelt. Das Flächenstück, das von der Kurve umschlossen wird, welche \mathfrak{B} oder \mathfrak{J} als Funktion von \mathfrak{H} darstellt (vgl. Abb. 18), ist derjenigen Arbeitsmenge proportional, welche bei dem magnetischen Kreisprozeß in Wärme verwandelt worden ist (Verlust durch Hysterese; W a r b u r g). Auch für unsymmetrische Kreisprozesse (Abb. 18 links unten) gilt dieser Satz.

Mißt man \mathfrak{H} , \mathfrak{B} und \mathfrak{J} im CGS-System, so ist die in Wärme verwandelte Arbeitsmenge für 1 cm^3 Eisen für einen vollen Kreisprozeß $= \int \mathfrak{H} \cdot d\mathfrak{J}$ oder $\frac{1}{4\pi} \int \mathfrak{H} \cdot d\mathfrak{B}$, gleichfalls in CGS.

Nach S t e i n m e t z (ETZ 1892) kann man die durch Hysterese in 1 cm^3 Eisen verbrauchte Arbeitsmenge bei verschiedenen hohen Induktionen \mathfrak{B} darstellen durch $\eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6}$, worin die Werte von η zwischen 0,001 und 0,025 liegen (vgl. auch Tab. S. 43, 44 und 45).

Jedoch ist, wie sich aus den eigenen Versuchen von S t e i n m e t z, namentlich aber aus den Versuchen der Reichsanstalt ergibt, der Wert η wenigstens für magnetisch weiches Material keineswegs konstant, sondern wächst für Induktionen, welche oberhalb des Knies der Magnetisierungskurve liegen, sehr beträchtlich, wie die folgende Tabelle zeigt.

Beziehung zwischen η und \mathfrak{B} für einige Materialien.

Weiches Schmiedeeisen		Geglühtes schwedisches Schmiedeeisen		Dynamoblech		Geglühter Wolframstahl	
\mathfrak{B}_{max}	η	\mathfrak{B}_{max}	η	\mathfrak{B}_{max}	η	\mathfrak{B}_{max}	η
5000	0,00097	4800	0,00168	4000	0,00137	4200	0,0138
8400	94	8000	169	6000	137	8300	137
14800	105	11000	187	8000	141	10800	136
17300	114	13800	216	10000	148	16800	139
18800	124	18300	252	12000	157	18500	134
		20500	214	14000	169		
				16000	185		

Trotzdem ist die Steinmetzsche Formel unter Umständen gut zu gebrauchen, wenn es sich darum handelt, die Hystereseverluste verschiedener nicht genau gleich hoch magnetisierter Materialien zu vergleichen.

Die von Rud. Richter (ETZ 1910, S. 1241) für den Hystereseverlust vorgeschlagene Formel $V = a \cdot \mathfrak{B} + b \cdot \mathfrak{B}^2$ paßt sich dem Verlauf der Verlustkurve viel besser an als die Formel von Steinmetz, verlangt aber natürlich zur Ermittlung der Konstanten a und b die Bestimmung des Hystereseverlusts bei zwei verschieden hohen Induktionen (etwa $\mathfrak{B} = 10\,000$ und $15\,000$).

Als sog. Faustregel (Abweichungen $< 20\%$) kann die Beziehung gelten: $V = a \cdot \mathfrak{B}_m \mathfrak{H}_c$, wobei \mathfrak{B}_m die Maximalinduktion, \mathfrak{H}_c die zugehörige Koerzitivkraft und a einen Faktor bezeichnet, welcher der folgenden Zahlentafel zu entnehmen ist (Gumlich, ETZ 1923, H. 4).

\mathfrak{B}_m	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10 000
a	0,227	0,230	0,235	0,242	0,251	0,261	0,273	0,287	0,303	0,320

\mathfrak{B}_m	11 000	12 000	13 000	14 000	15 000	16 000	17 000	18 000
a	0,339	0,360	0,382	0,406	0,432	0,460	0,489	0,520

Der Hystereseverlust wird durch andauernde Erwärmung (sog. Altern des Dynamoblechs) und durch hohen Druck vergrößert, wahrscheinlich aber nicht durch die fortwährende Ummagnetisierung; hochlegierte (39) Bleche altern wenig oder gar nicht.

Bei einer Frequenz von f Perioden in 1 Sekunde wird in 1 kg Etsen oder Stahl vom spezifischen Gewicht 7,7 eine Leistung verbraucht von (vgl. nachstehende Tabelle)

$$f \cdot \frac{\eta \mathfrak{B}^{1,6}}{7,7 \cdot 10^4} \text{ Watt}$$

Hystereseverlust in 1 kg Eisen oder Stahl (spez. Gew. = 7,7) bei 100 Perioden in 1 Sekunde in Watt.

\mathfrak{B}	$\eta = 0,0010$	$\eta = 0,0015$	$\eta = 0,0020$	$\eta = 0,0025$	\mathfrak{B}	$\eta = 0,0010$	$\eta = 0,0015$	$\eta = 0,0020$	$\eta = 0,0025$
5 000	1,076	1,614	2,15	2,69	11 000	3,803	5,705	7,61	9,51
6 000	1,442	2,164	2,88	3,60	12 000	4,373	6,556	8,74	10,93
7 000	1,845	2,768	3,69	4,61	13 000	4,969	7,452	9,94	12,42
8 000	2,284	3,428	4,57	5,71	14 000	5,594	8,387	11,19	13,98
9 000	2,759	4,140	5,51	6,90	15 000	6,248	9,367	12,49	15,62
10 000	3,265	4,898	6,53	8,16					

Verlustziffer s. S. 184, 185.

(41) **Der magnetische Kreis.** Die magnetischen Kraftlinien werden erzeugt von der magnetischen Spannung, welche das vorher unmagnetische Eisen (oder Stahl) magnetisch gemacht hat. Die Kraftlinien sind geschlossene Kurven; beim Übergang aus Eisen in Luft oder andere unmagnetische Körper werden sie gebrochen nach dem Gesetz (vgl. Abb. 22):

$$\operatorname{tg} \alpha = \mu \operatorname{tg} \beta.$$

Außerhalb des Eisens bilden die Kraftlinien das magnetische Feld (36); ihre Richtung gibt die Richtung der Kraft, ihre Dichte die magnetische Feldstärke an.

Für die Gesamtmenge Φ der Kraftlinien, welche von der magnetischen Spannung H (36) erzeugt werden, ist der magnetische Leitwert G_m des Weges, der sich den Kraftlinien darbietet, bestimmend. Bisweilen

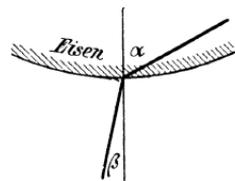


Abb. 22. Brechung der magnetischen Kraftlinien.

ist es bequemer, statt des magnetischen Leitwertes dessen Kehrwert, den magnetischen Widerstand $R_m = 1/G_m$ bei der Rechnung zu benutzen. Es gilt, analog dem Ohmschen Gesetz

$$\Phi = \mathfrak{B} \cdot q = II \cdot G_m = II/R_m.$$

Für einen vollständig bewickelten Eisenring aus gleichmäßigem Material und von gleichbleibendem Querschnitt ist $II = \mathfrak{H} \cdot l$, worin l die mittlere Länge des Kraftlinienweges und $\mathfrak{H} = 0,4\pi \cdot KI$ (36).

II wird häufig magnetische Potentialdifferenz oder Spannung genannt. Wenn längs einer magnetischen Kraftlinie die Werte von \mathfrak{H} gegeben sind, so gilt für die ganze Kraftlinie wie auch für jedes Stück die Gleichung $II = \int \mathfrak{H} \cdot dl$. Hat \mathfrak{H} längs einer Kraftlinie auf einer Weglänge l einen konstanten Wert, so herrscht zwischen den Endpunkten der Länge l die magnetische Spannung $II = \mathfrak{H} \cdot l$. Da $\mathfrak{H} \cdot \mu = \mathfrak{B}$ ist, so folgt $II = \mathfrak{B}l/\mu$. Setzt sich der Kraftlinienweg aus mehreren Stücken zusammen, so wird $\oint \mathfrak{H} \cdot d\mathfrak{s} = \Sigma II = \Sigma \mathfrak{H} \cdot l = \Sigma \mathfrak{B}l/\mu = 0,4 \cdot \pi \cdot w \cdot I$ (w = gesamte Windungszahl). Diese Formel enthält das Wichtigste für die Berechnung elektromagnetischer Apparate (107).

Bei einem geschlitzten Ring, bei welchem der Eisenteil die Länge l_i und der Luftschnitt die Breite l_a hat ($l_i + l_a = 2r\pi$), ergibt sich angenähert der Kraftlinienfluß

$$\Phi = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot w \cdot I}{\frac{l_i}{\mu q} + \frac{l_a}{q}}.$$

Bei einem permanenten Ringmagnet kann man sich die im Zähler stehende magnetische Spannung durch eine eingeprägte Feldstärke $\mathfrak{H}_c \cdot l_i$ ersetzt denken (G a n s), so daß auch hier gilt

$$\Phi = \frac{II}{R_i + R_a}.$$

Der magnetische Leitwert G_m und der magnetische Widerstand R_m hängen von den Abmessungen und der materiellen Beschaffenheit des Weges für die Kraftlinien ab. Für einen Körper, der gleichmäßig von parallelen Kraftlinien durchzogen wird, ist G_m proportional dem Querschnitt q des Körpers und der Permeabilität, aber umgekehrt proportional der Länge, also $G_m = \mu q/l$ und $R_m = l/\mu q$.

μ ist für Luft = 1, für weiches Eisen in schwachen Feldern etwa 200—10 000; bei stark zunehmender Magnetisierung nimmt der Wert von μ für Eisen wieder ab, s. Abb. 21.

Wenn die Kraftlinien auf ihrem Wege mehrere verschieden bemessene oder beschaffene Körper mit den magnetischen Widerständen r_1, r_2, r_3 durchsetzen, so ist der gesamte magnetische Widerstand des Weges gleich der Summe der Einzelwiderstände.

$$R_m = r_1 + r_2 + r_3 + \dots = \Sigma r_m.$$

Wenn den Kraftlinien Wege nebeneinander geboten werden, so berechnet sich der gesamte Leitwert G_m der nebeneinander liegenden Wege aus der Formel

$$G_m = g_1 + g_2 + g_3 + \dots = \Sigma g_m.$$

Einfluß des weichen Eisens auf die Kraftlinien. Der Verlauf der Kraftlinien in einem magnetischen Feld wird durch die Gegenwart von magnetisierbaren Körpern, besonders von weichem Eisen, beeinflusst. Die Kraftlinien werden aus ihrer Richtung abgelenkt und in großer Zahl und Dichte durch das Eisen geführt (magnetische Schirmwirkung des Eisens; Panzergalvanometer (158).

(42) **Erdmagnetismus.** Die Erde ist ein sehr großer Magnet, dessen Südpol nahe beim geographischen Nordpol, dessen Nordpol nahe beim geographischen Südpol liegt.

Der Nordpol einer durchaus frei beweglichen Magnetnadel zeigt nahezu nach dem geographischen Norden, und die magnetische Achse der Nadel macht mit der Horizontalen einen bestimmten Winkel. Die Abweichung von der geographischen Nord-Süd-Richtung heißt Deklination, sie ist in Deutschland westlich und beträgt etwa 8° . Der Winkel der magnetischen Achse mit dem Horizont heißt Inklination; der Nordpol zeigt nach unten, der Inklinationswinkel beträgt bei uns etwa 66° .

Die nur in der horizontalen Ebene frei beweglichen Magnetnadeln, wie Bussole, Magnetometer usw. suchen sich stets in die magnetische Nord-Südrichtung, den „magnetischen Meridian“ einzustellen; sie stehen nur unter der Einwirkung der horizontalen Komponente (Horizontalstärke h) des Erdmagnetismus.

In Gebieten von geringer Ausdehnung, in Beobachtungsräumen, Laboratorien u. dgl., darf man die Kraftlinien des erdmagnetischen Feldes als parallel und geradlinig, die Stärke des magnetischen Feldes als konstant ansehen, sofern nicht vorhandene Eisenmassen, Magnete, Stromschleifen usw. Störungen hervorbringen, die jedoch die Feldstärke nicht in dem Maße beeinflussen wie die Richtung der Kraftlinien.

In größeren Gebieten ändert sich die Horizontalstärke mit der geographischen Lage des Ortes; sie liegt in Deutschland zwischen 0,18 (Kiel) und 0,21 (Lindau).

(43) **Schwingungsdauer einer Magnetnadel** im erdmagnetischen Feld. Die Richtkraft ist gleich dem Produkt aus dem magnetischen Moment der Nadel \mathfrak{M} und der horizontalen Intensität h , also $= \mathfrak{M}h$; das Trägheitsmoment J wird nach (19), S. 26, berechnet; dann ergibt sich die Schwingungsdauer

$$t = \pi \cdot \sqrt{\frac{J}{\mathfrak{M}h}}.$$

Das elektrische Feld.

(44) **Einheit der Elektrizitätsmenge.** Gleichartig geladene Körper stoßen einander ab, ungleichartig geladene ziehen einander an. Die elektrostatische Einheit der Ladung oder Elektrizitätsmenge ist diejenige, die im Abstand 1 cm auf eine ihr gleiche durch den leeren Raum hindurch mit der Kraft 1 dyn $\approx 1,02 \text{ mg}^*$ wirkt. Vorausgesetzt ist hierbei, daß die körperlichen Träger der Elektrizitätsmengen klein gegenüber ihrem Abstände, und daß alle anderen Körper weit entfernt sind. Dann gilt nämlich das Coulombsche Gesetz, daß die Kraft zwischen zwei Ladungen Q_1, Q_2 im Abstand r gleich $Q_1 Q_2/r^2$ ist.

Die elektromagnetische Einheit der Ladung enthält $3 \cdot 10^{10}$, die praktische Einheit (Coulomb, Amperesekunde) $3 \cdot 10^9$ elektrostatische Einheiten. Ein Coulomb wirkt also auf ein zweites Coulomb in 1 km Abstand mit einer Kraft von rund 1 t.

(45) **Elektrisches Feld¹⁾** heißt jeder Raum, in dem sich elektrische Wirkungen äußern. Zu jedem Punkt des Feldes läßt sich ein Vektor (S. 9), die elektrische Feldstärke \mathfrak{E} angeben; sie ist gleich der Kraft in Dyn, die ein sehr kleiner, mit einer Einheit positiver Elektrizität geladener Körper (Einheitspol) dort erfährt. (Voraussetzung: grad $\varepsilon=0$; s. (57).)

Durch jeden Punkt des Feldes läßt sich eine Feld- oder Kraftlinie ziehen, deren Tangente in jenem Punkte die Richtung der Feldstärke angibt.

¹⁾ Im folgenden wird von dem Rechnen mit Vektoren Gebrauch gemacht. Die Erklärung der Bezeichnungen findet sich in den Abschnitten (8) und (9); dort sind auch die Rechenregeln zusammengestellt.

(46) Im **elektrostatischen Felde**, d. h. in einem elektrischen Felde, das ohne Energieumsatz fortbesteht, ist die Arbeit, die die elektrischen Kräfte beim Herumführen des Einheitspols auf einem geschlossenen Wege leisten, gleich Null:

$$\oint \mathfrak{E} \, ds = 0.$$

Daraus folgt: 1. daß zu beiden Seiten der Grenzfläche zweier Körper die tangentielle Komponente von \mathfrak{E} denselben Wert hat; 2. daß sich \mathfrak{E} von einem einwertigen Potential φ ableitet, und daß somit das elektrostatische Feld wirbelfrei ist:

$$\mathfrak{E} = -\text{grad } \varphi \qquad \text{rot } \mathfrak{E} = 0.$$

Die Flächenkonstanten Potentials werden von den Kraftlinien senkrecht durchkreuzt. Solche Flächen sind auch die Leiteroberflächen. Das Potential der Oberfläche herrscht auch im Leiterinnern, weil dort überall $\mathfrak{E} = 0$ ist.

(47) Die **Spannung** zwischen zwei Leitern im elektrostatischen Felde ist das von einem beliebigen Punkte des einen nach einem beliebigen Punkte des zweiten auf einem beliebigen Wege genommene Integral $\int \mathfrak{E} \, ds$. Es bedeutet die bei der Überführung des Einheitspols auf diesem Wege geleistete Arbeit und ist gleich der Potentialdifferenz der Leiter.

Das Integral $\int \mathfrak{E} \, ds$ ergibt die Spannung auch in nicht wirbelfreien elektrischen Feldern; hier hängt aber die Spannung im allgemeinen ab von dem Weg und von der Lage des Anfangs- und des Endpunkts.

(48) Die **dielektrische Verschiebung oder Erregung** ist in isotropen (nicht kristallartigen) Körpern der Feldstärke proportional:

$$\mathfrak{D} = \gamma \varepsilon \mathfrak{E}.$$

ε ist die Dielektrizitätskonstante, γ eine vom Maßsystem abhängige Konstante. Sie beträgt

a) im absoluten elektrostatischen Maßsystem. $\gamma = 1$

b) im absoluten elektromagnetischen Maßsystem. $\gamma = 1/4\pi c^2$
 darin ist $c = 3 \cdot 10^{10}$ die Lichtgeschwindigkeit;

c) im praktischen elektrotechnischen Maßsystem $\gamma = 10^9/4\pi c^2 = 0,886 \cdot 10^{-13}$.

In diesem Maßsystem ist \mathfrak{E} in Volt/cm und \mathfrak{D} in Coulomb/cm² ausgedrückt.

Von jeder Ladungseinheit geht stets der Verschiebungsfluß 1 aus. Es ist daher die Raumdichte der Ladung $\eta = \text{div } \mathfrak{D}$; die Flächendichte an der Grenze der Körper (1) und (2) beträgt $\omega = \mathfrak{D}_{n1} + \mathfrak{D}_{n2} = \text{Div } \mathfrak{D}$, wobei die positive Richtung der Normalkomponente \mathfrak{D}_n aus dem betreffenden Körper hinausweist.

(49) Dielektrizitätskonstanten.

Balata, roh	3,4	Baryt Leichtflint O 1266	7,7
Balata, stark entharzt . .	3,1	Silikatflint S 461	16,5
Bernstein	2,9	Kron mit hoher Disper-	
Cellon, hell	3,5	sion O 381	6,8
Ceresin	2,1 bis 2,2	Barytkron O 1209	8,3
Ebonit (Hartgummi) . . .	2,5 bis 3,5	Fluorkron O 7185	5,9
Gesteine ¹⁾	7 bis 15	Uviolglas	5,6
Glas, verschieden ²⁾ . . .	5 bis 8	Glimmer	5 bis 8
weißes Glas	7,1	Guttapercha (45 % Harz-	
gewöhnl. Flintglas O 118	7,3	gehalt).	3 bis 3,2

¹⁾ Einzelangaben für 42 Gesteinsarten bei H. Löwy, Ann. d. Phys. (4), Bd. 36, S. 126—127, 1911.

²⁾ R. Jaeger, Dissert., Berlin, 1917 (s. a. ETZ 1919, S. 442—443).

Gutta-Gentzsch	2,5	Petroleum	2,0 bis 2,2
Starkstromkabel-Isolation (getränkt. Papier od. Jute)	4,3	Porzellan	4,4
Fernsprechkabel-Isolation (Papier und Luft)	1,6	Quarz (amorph)	3,7
Hartpapier (Repelit)	3,6	Quarz (parallel zur Haupt- achse)	4,5
Kautschuk (natürlich oder synthetisch)	2,7 bis 2,8	Rapsöl	2,3
Kolophonium	2,5	Rizinusöl	4,7
Marmor	8,3	Rüböl	3
Mikanit	4,5 bis 5,5	Schellack	2,7 bis 3,7
Olivenerlenöl	3	Schwefel	3,6 bis 4,3
Papier	1,8 bis 2,6	Siegellack	4,3
Paraffin (fest)	2,1 bis 2,2	Terpentinöl	2,2
Paraffinöl	2 bis 2,5	Transformator- { Mineralöl	2,2
Pertinax	4,8	renöl { Harzöl	2,5
		Wasser	80

(50) **Dielektrischer Energieverlust.** Die in (48) angegebene Beziehung zwischen \mathfrak{E} und \mathfrak{D} gilt genau nur für Gase.

a) **Feste Dielektrika.** Wirkt auf ein festes Dielektrikum ein elektrisches Wechselfeld $\mathfrak{E}_0 \sin 2\pi ft$, so bleibt die Verschiebung um einen Winkel δ in der Phase hinter der Feldstärke zurück (dielektrische Nachwirkung). Dem entspricht eine Leistung in der Raumeinheit $N = \varepsilon \mathfrak{E}_0^2 f \operatorname{tg} \delta / 4c^2 \operatorname{Erg}/s \cdot \operatorname{cm}^3$ oder, wenn statt des Scheitelwertes \mathfrak{E}_0 der Effektivwert \mathfrak{E} eingeführt und dieser in V/cm ausgedrückt wird,

$$N = 0,555 \varepsilon \mathfrak{E}_{\text{eff}}^2 \cdot f \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-12} \operatorname{Watt}/\operatorname{cm}^3.$$

Für einen Kondensator der Kapazität C Farad, an dem eine effektive Wechselspannung E Volt liegt, ergibt sich hieraus die Verlustleistung $N = 2\pi f E^2 C \operatorname{tg} \delta \operatorname{Watt}$.

δ heißt der dielektrische Verlustwinkel. Wenn er, wie in den meisten Fällen, klein ist, so ist $\operatorname{tg} \delta \approx \sin \delta = \cos \varphi =$ dem Leistungsfaktor.

Die Größe des Verlustwinkels δ hängt von der Temperatur stark ab, dagegen nur in sehr geringem Maße von der Frequenz (größere Änderungen von δ treten meist erst bei Frequenzänderungen im Verhältnis 1 : 10 und mehr hervor). Die folgende Tafel gibt einige Werte. Es entspricht $\operatorname{tg} \delta = 2,9 \cdot 10^{-4}$ einem Winkel von 1° , $\operatorname{tg} \delta = 175 \cdot 10^{-4}$ einem Winkel von 1° .

Die dielektrische Nachwirkung unterscheidet sich von der magnetischen Hysterese durch das Fehlen der Remanenz¹⁾ und der Koerzitivkraft; nach dem Erlöschen des äußeren Feldes klingt auch die Verschiebung allmählich ab. Die dielektrische Nachwirkung rührt von Ungleichförmigkeiten im Stoff her, und zwar kommt es hierbei auf das Verhältnis der Dielektrizitätskonstante zur Leitfähigkeit an; je mehr dieses Verhältnis innerhalb eines Körpers schwankt, um so stärker tritt die Nachwirkung hervor. Sehr gleichförmige Stoffe, wie gereinigtes Ceresin und Paraffin, haben sehr geringe dielektrische Verluste.

Literatur: J. C. Maxwell, Lehrb. d. Elektrizität u. d. Magnetismus, Bd. 1. Art. 328—330 — E. v. Schweißler, Ann. d. Phys. (4) Bd. 24, 1907, S. 711 (enthält eine vollständige Zusammenstellung der älteren Literatur). — K. W. Wagner, Ann. d. Phys. (4) Bd. 40, 1913, S. 817; Archiv f. Elektrot. Bd. 2, 1914, S. 371; ebenda, Bd. 3, 1914, S. 67 (hier auch Literaturangaben über die wichtigeren experimentellen Arbeiten aus der neueren Zeit). — F. Tank, Ann. d. Phys. (4) Bd. 48, 1914, S. 307. — U. Meyer, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 1917, S. 139. — E. Schott, Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Telephonie, Bd. 18, S. 82, 1921. — E. Giebel u. G. Zickner, Arch. f. Elektrot. Bd. 11, 1922, S. 109.

¹⁾ Remanente Elektrisierung ist bisher nur bei Kristallen beobachtet worden, und zwar bei pyroelektrischen (Turmalin, Topas u. a., vgl. W. Thomson, Phil. Mag. (5) Bd. 5, S. 24, 1878. — E. Riecke, Wied. Ann. Bd. 28, S. 43, 1886) und piezoelektrischen (Seignettesalz; vgl. A. M. Nicolson, Proc. Amer. Inst. of El. Eng. Bd. 38, S. 1315, 1919).

Dielektrischer Verlustwinkel.

Stoff	Fre- quenz	Tem- peratur	10000 × tg δ	Stoff	Fre- quenz	Tem- peratur	10000 × tg δ
	f	° C			f	° C	
Balata, roh . . .	1000	15	48	Weichgummi (33% Paragummi) . .	1000	20	150
Balata, stark ent- harzt	1000	15	26	Isolation (Draht-)			
Cellon, hell	1000	20	330	„ aus Emaillelack	1000	20	180
Ceresin	1000	20	0,3	„ Seide	1000	20	400
Ebonit (Hart- gummi),				„ Baumwolle	1000	20	3600
gute Sorte I . . .	1000	20	25 bis 35	Papier - Luftraum- isolation f. Fern- sprechkabel . .	1000	20	27
geringe Sorte II	1000	20	230		10 ⁴	20	40
Sorte III (ameri- kanisch	10 ⁶	20	100		10 ⁵	20	72
Flintglas (Schott u. Gen., Jena) . .				Papierisolation, ge- tränkt, f. Stark- stromkabel . .	50	20	50 bis 200
	50	20	40				
	1000	20	30	Papier (trocken) .	1000	20	40
	5000	20	15	Papier, getrocknet und mit Paraffin getränkt	50	20	30 bis 150
	50000	20	8		1000	20	30 bis 100
	140000	20	4	Paraffin	1000	20	0,8
Glas (Spiegel-) . .	1000	17	180	Pertinax	1000	20	250
Glimmer	50	20	3 bis 15	Porzellan	50	20	500
	1000	20	2 bis 10	Paraffinöl ¹⁾ . . .	50	15	2,9
Guttapercha	1000	15	240	Rizinusöl ¹⁾	50	16,5	25
Gutta-Gentzsch . .	1000	15	65	Transformatoren- öl ¹⁾	50	17,5	50
Kautschuk (Para, roh oder vulka- nisiert)	1000	20	100				
„ (synthet.) . . .	1000	20	200				

In feuchtigkeitshaltigen Faserstoffen (z. B. Baumwollisolation) treten neben den dielektrischen Verlusten im elektrischen Wechselfelde noch zusätzliche Verluste infolge anomaler Leitung (92) auf. Diese Verluste nehmen schneller als das Quadrat der Spannung zu, und zwar besonders bei niedrigen Frequenzen (Näheres im Archiv f. Elektrot. Bd. 3, 1914, S. 99 bis 105).

b) Flüssige Dielektrika. Während bei den festen Dielektriken der Energieverbrauch durch Stromleitung (Joulesche Wärme) neben dem Energieverlust durch dielektrische Nachwirkung meistens verschwindend gering ist, verhalten sich flüssige Dielektrika gerade umgekehrt. Bei ihnen rührt der Verlust überwiegend von elektrolytischer Leitung her und ist von der Frequenz unabhängig. Verlustwinkel und Leistungsfaktor sind somit der Frequenz umgekehrt proportional. Leitfähigkeit und Energieverlust wachsen mit der Temperatur schnell an. Da nach Untersuchungen von Hertz, Warburg, Jaffé und Tank die Leitfähigkeit flüssiger Dielektrika von Verunreinigungen herrührt, verschwinden die dielektrischen Anomalien aller flüssigen Isolatoren mit zunehmender Reinheit der Substanzen. (G. L. Addenbrooke, Electrician Bd. 68, 1912, S. 869. — L. Pungs, Arch. f. Elektrot. Bd. 1, 1912, S. 329. — F. Tank, Ann. d. Phys. (4) Bd. 48, 1914, S. 307.)

(51) Kapazität zweier Leiter gegeneinander ist das Verhältnis ihrer Ladung zu der zwischen ihnen herrschenden Spannung, wenn alle von dem einen Leiter aus-

1) Siehe die Ausführungen unter b).

gehenden Verschiebungslinien auf dem andern Leiter münden. Sind mehrere Leiter im Felde vorhanden, so ist die Ladung jedes einzelnen eine lineare Funktion der Spannungen aller Leiter gegen einen auszuwählenden.

(52) Werte von Kapazitäten.

Kapazität (Mikrofarad)

- 1. Zwei im Abstand d einander gegenüberstehende parallele Flächen von der Größe S (Leydener Flasche, Kondensatoren) $\left. \begin{array}{l} \frac{\epsilon S}{36\pi d} 10^{-5} \end{array} \right\}$
- 2. Eine zwischen zwei parallelen Flächen liegende dritte Fläche mit den Abständen d_1 und d_2 von den äußeren Flächen $\left. \begin{array}{l} \frac{\epsilon S}{36\pi} \cdot \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) 10^{-5} \end{array} \right\}$

Über Randkorrekturen vgl. M a g i n i , Phys. Z. S. Bd. 7, S. 844, 1906; Bd. 8, S. 136, 1907.

Ist die Zwischenschicht von der Dicke d zusammengesetzt aus parallelen Schichten aus verschiedenem Material von den Dicken $d_1, d_2, d_3 \dots$ und den Dielektrizitätskonstanten $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3 \dots$, so tritt an die Stelle von d/ϵ

$$\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d_3}{\epsilon_3} + \dots$$

- 3. Zylinder vom Radius r , der von einem Zylinder vom Radius r_1 umgeben ist (Kabel), für 1 km Länge $\left. \begin{array}{l} \frac{\epsilon}{18 \log \text{nat} \frac{r_1}{r}} \end{array} \right\}$
- 4. Zylinder vom Radius r , der im Abstände h mit seiner Achse parallel einer unendlichen Ebene liegt, wobei r klein gegen h (Draht im Abstand h über dem Erdboden), für 1 km Länge $\left. \begin{array}{l} \frac{\epsilon}{18 \log \text{nat} \frac{2h}{r}} \end{array} \right\}$
- 5. Zwei Zylinder mit den Radien r_1 und r_2 , die im (gegen r großen) Abstand a einander parallel liegen, für 1 km Länge $\left. \begin{array}{l} \frac{\epsilon}{18 \log \text{nat} \left(\frac{a^2}{r_1 r_2} \right)} \end{array} \right\}$
- 6. Desgl., $r_1 = r_2 = r$ (Doppelleitung, Drahtradius r) $\left. \begin{array}{l} \frac{\epsilon}{36 \log \text{nat} \frac{a}{r}} \end{array} \right\}$
- 7. Zwei konzentrische Kugeln mit den Radien r_1 und r_2 $\left. \begin{array}{l} \frac{\epsilon}{9} \frac{r_2 r_1}{r_2 - r_1} \cdot 10^{-5} \end{array} \right\}$

Maße der Längen und Flächen in cm und cm².

(53) Verschiedene Schaltungsweisen der Kondensatoren.

Sind die Kapazitäten $C_1, C_2 \dots C_n$ parallel geschaltet, so ist die Gesamtkapazität dieser Zusammenstellung

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

Sind diese Kondensatoren dagegen in Reihe geschaltet, so ist die Kapazität der Reihe aus der Beziehung $1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n$ zu berechnen. Ist $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C_0$, so wird $C = C_0/n$. Für zwei verschiedene hintereinander geschaltete Kondensatoren C_1 und C_2 ergibt sich

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

(54) Kapazität der Leitungen. Liegen im wesentlichen nur zwei Leiter (Hin- und Rückleitung) im elektrischen Felde, so wende man die entsprechende der vorstehenden Formeln (52) an. Liegen mehr Leiter im Felde, so kann man ihre Ladungen bei gegebener Spannungsverteilung so berechnen, als ob je zwei von ihnen

durch einen Kondensator verbunden wären¹⁾. Dessen Kapazität, die Teilkapazität der beiden Leiter gegeneinander, muß unter Berücksichtigung der Lage aller Leiter berechnet werden, wofür sich nur in besonderen Fällen einfache Formeln ergeben. Man tut im allgemeinen besser, die Ladungen aus den Spannungen unmittelbar nach einem einfachen Näherungsverfahren zu berechnen, das F. Breisig (ETZ 1898, S. 772; 1899, S. 127) und L. Lichtenstein (ETZ 1904, S. 126) entwickelt haben.

a) **Oberirdische Doppelleitungen**, die sich in einer gegenüber dem Leiterabstand großen Höhe über dem Erdboden befinden; die Kapazität ist nach (52), Formel 6 zu berechnen, wobei $\epsilon = 1$ ist. Die folgende Tafel erspart die Rechnung.

Kapazität oberirdischer Doppelleitungen in $\mu\text{F}/\text{km}$.

$\frac{a}{r}$	C	$\frac{a}{r}$	C	$\frac{a}{r}$	C	$\frac{a}{r}$	C
20	0,00927	80	0,00634	140	0,00562	250	0,00503
30	0,00817	90	0,00617	150	0,00554	300	0,00487
40	0,00753	100	0,00603	170	0,00541	400	0,00464
50	0,00710	110	0,00591	190	0,00529	500	0,00447
60	0,00679	120	0,00580	210	0,00520	1000	0,00402
70	0,00654	130	0,00571	230	0,00511	2000	0,00366

b) **Vielpaarige Fernsprechkabel** üblicher Bauart mit Doppelleitungen und Papier-Luftisolation für Leiter von

0,6 0,8 1,0 1,2 1,5 1,8 2,0 mm Stärke
0,031 0,033 0,035 0,037 0,040 0,041 0,042 $\mu\text{F}/\text{km}$

Für Fernsprechkabel des Weitverkehrs bei einer Leiterstärke von

0,9 mm (Stamm) 0,9 mm (Vierer) 1,4 mm (Stamm) 1,4 mm (Vierer)
0,0335 $\mu\text{F}/\text{km}$ 0,057 $\mu\text{F}/\text{km}$ 0,0355 $\mu\text{F}/\text{km}$ 0,059 $\mu\text{F}/\text{km}$.

c) **Telegraphenkabel** mit Guttaperchaisolierung; Kapazität etwa 0,2 $\mu\text{F}/\text{km}$.

d) Die **Teilkapazitäten von symmetrischen Dreileiterkabeln** (zur Übertragung hochgespannten Drehstromes) mit runden Leitern in marktgängiger Ausführung mit einer Isolation aus getränktem Papier gibt die folgende Tafel (S. 53), k ist die Teilkapazität zwischen Leiter und Bleimantel, c die Teilkapazität zwischen Leiter und Leiter, beide in $\mu\text{F}/\text{km}$ ausgedrückt (Abb. 23). Für Kabel mit sektorförmigem Leiterquerschnitt (Abb. 366f, S. 484) der aber nur für die Spannungen bis etwa 10000 V in Frage kommt, erhöhen sich die Kapazitäten um 15 bis 50%.

e) **Betriebskapazitäten**. Hängen die Spannungen der Leiter so voneinander ab, daß sie alle durch die Angabe einer einzigen bestimmt sind, und gehorchen sie und auch die Lage der Leiter gewissen Symmetriebedingungen (kein Leiter soll bevorzugt sein), so ist auch ein Mehrleitersystem elektrostatisch durch eine einzige Kapazitätsgröße gekennzeichnet. Diese, die Betriebskapazität, gilt aber nur für die vorausgesetzte Betriebsart. Beispiel: Die Betriebskapazität eines verselten Drehstromkabels, eines verselten vieradrigen Zweiphasenkabels. Fertige Formeln für einige Betriebskapazitäten sind in den genannten Aufsätzen von Breisig, Lichtenstein und Diesselhorst und E m d e enthalten.

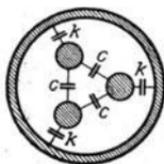


Abb. 23. Symmetrisches Dreileiterkabel mit runden Leitern.

Die Betriebskapazität einer symmetrischen Drehstromleitung ergibt das Verhältnis der La-

¹⁾ Der Gegenstand ist in den „Vorschlägen für die Definition der Eigenschaften gestreckter Leiter“ v. Diesselhorst und E m d e (ETZ 1909, S. 1155, 1184) ausführlicher erörtert.

dung eines Leiters zur Sternspannung. Sie ist doppelt so hoch wie die Kapazität der entsprechenden Doppelleitung [(52), Formel 6; (54) a]. Durch die Teilkapazitäten c und k ausgedrückt, lautet sie

$$C = k + 3c.$$

Teilkapazitäten von Dreileiterkabeln.

Betriebsspannung ¹⁾ in Volt	Leiterquerschnitt in mm ²	k	c	Betriebsspannung ¹⁾ in Volt	Leiterquerschnitt in mm ²	k	c
		$\frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$	$\frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$			$\frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$	$\frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$
5000	25	0,120	0,045	20000	25	0,070	0,023
	50	0,157	0,058		50	0,091	0,030
	95	0,195	0,073		95	0,114	0,039
	150	0,220	0,086		150	0,132	0,045
	240	0,235	0,096		25000	25	0,064
10000	25	0,090	0,035	50		0,083	0,026
	50	0,115	0,041	95		0,104	0,035
	95	0,145	0,052	150		0,120	0,041
	150	0,170	0,062	30000		50	0,073
	240	0,190	0,075		95	0,096	0,031
15000	25	0,077	0,029		150	0,110	0,036
	50	0,100	0,035				
	95	0,125	0,045				
	150	0,147	0,054				

(55) Gegenkapazität zwischen Hochspannungsanlagen und Fernmeldeleitungen.

Hochspannungsanlagen sind mit benachbarten oberirdischen Fernmeldeleitungen elektrisch gekoppelt (Kondensatorwirkung vgl. Abb. 24).

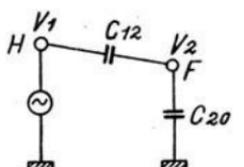


Abb. 24. Teilkapazitäten einer Fernmeldeleitung nach Erde und nach einer eindrähtigen Hochspannungsleitung (Einphasenbahn).

Diese Kopplung bewirkt, daß bei Einphasenbahnen betriebsmäßig und bei Drehstromanlagen im Erdschlußfalle ein Ladestrom über die Gegenkapazität C_{12} auf die Fernmeldeleitung übergeht (Influenz). Ist diese isoliert, so nimmt sie eine Ladespannung U_2 an (Leerlaufspannung), die angenähert aus der Beziehung

$$U_2 = U_1 \frac{C_{12}}{C_{20}}$$

zu berechnen ist. U_2 ist also von Länge und Frequenz unabhängig. Bei Freileitungen an Einphasenbahnen mit 15 kV Betriebsspannung sind Ladespannungen von rund 1500 V gemessen worden. Benachbarte geerdete Leitungen sowie sonstige mit Erde verbundene Gegenstände (Bäume) wirken spannungsenkend. Werte für C_{12} sind aus Abb. 25 ersichtlich.

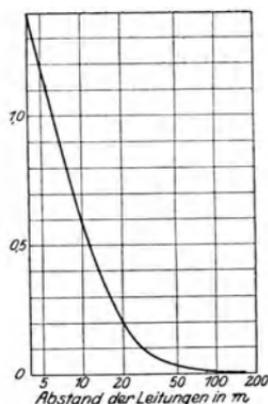


Abb. 25. Gegenkapazität von Einfachleitungen in 10^{-9} F/km, berechnet für $h_1 = h_2 = 6,5$ m; $r_1 = 53$ mm (Ersatzleiter für Fahrdraht und Aufhängung e. Wechselstromleitung); $r_2 = 2$ mm.

¹⁾ Gemeint ist die verkettete Drehstromspannung.

Der Ladestrom ist, wenn die Fernmeldeleitung geerdet ist, $I = C_{12} l \frac{dU}{dt} = U \omega l C_{12}$ für l km (Kurzschlußstrom), also abhängig von der Kreisfrequenz ω (Oberschwingungen) und l . Der Widerstand $1/\omega C_{12}$ ist gegenüber $1/\omega C_{20}$ so hoch, daß annähernd der gleiche Ladestrom übertritt, wenn die Fernmeldeleitung isoliert, d. h. nur über die Erdkapazität C_{20} (mindestens zehnmal größer als C_{12}) geerdet ist. In Freileitungen an der Bahn sind bei 15 kV Ladeströme von 1 bis 2 mA/km gemessen worden. Ladeströme über 2 mA werden beim Berühren der Leitung äußerst unangenehm empfunden; die Stromstärke wird durch den Körperwiderstand nicht merklich geändert, da auch dieser klein neben $1/\omega C_{12}$ ist.

Bei Drehstromanlagen (Abb. 26) sind angenähert die Ladespannung und der Ladestrom:

$$U_4 = \frac{1}{C_{40}} (U_1 C_{14} + U_2 C_{24} + U_3 C_{34})$$

$$I = \omega l (U_1 C_{14} + U_2 C_{24} + U_3 C_{34}).$$

Ist $|U_1| = |U_2| = |U_3|$ (Symmetrie der Hochspannungsanlage in sich selbst) und $C_{14} = C_{24} = C_{34}$ (Symmetrie der beiden Anlagen gegeneinander) so ist $U_4 = 0$ und ebenso I . Dies gilt für die Grundschwingung und die ungeraden Oberwellen, jedoch nicht für die dreizahligen Harmonischen.

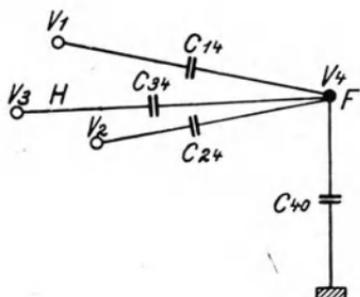


Abb. 26. Teilkapazitäten einer Fernmeldeleitung nach Erde und nach den Drähten einer Drehstromleitung.

Bricht die Spannung einer Phase infolge Erdschluß plötzlich zusammen, so entstehen außer den Wirkungen durch die

hohe Restspannung (etwa 8fache Influenz gegenüber dem normalen Betriebe in unverdrillten Anlagen; falls Anlage verdrillt, noch wesentlich höher, weil Verdrillung wirkungslos wird) Wanderwellen, deren Spannung durch wiederholte Reflexion um Vielfaches erhöht werden kann [146], ferner K. W. Wagner, ETZ 1914, S. 639, 677, 705]. Diese Wanderwellen erzeugen in den beeinflussten Fernsprechleitungen hohe Ladungen, die bei Spannungen von etwa 300 V ab über die Spannungssicherungen des a- und b-Zweiges zur Erde abfließen. Da aber beide Sicherungen nie genau gleichzeitig ansprechen, fließt die Ladung eines Zweiges über den Fernhörer zur Spannungssicherung ab und ruft nervenschädigende Knallgeräusche hervor. Wegen Maßnahmen gegen diese „Gefährdung“ s. Angaben unter (115).

„Störungen“ des Fernsprechbetriebes werden bei normalem Zustande der Hochspannungsanlage besonders durch Oberschwingungen (Generatoren, Motoren, Transformatoren) hervorgerufen. Abhilfe: Verdrillen der Hochspannungsanlage, Kreuzen der Fernsprechleitungen, Vermeiden sonstiger Unsymmetrien (Ableitung) s. auch Angaben unter (115).

Literatur: Brauns, Telegr.- u. Fernsprechtechnik, Jahrg. 8, S. 64; 1949; ETZ 1920, Heft 31; — Lieneemann, Telegr.- u. Fernsprechtechnik, Jahrg. 8, S. 173; Jahrg. 9, S. 53. 1920. — Jäger, ebenda, Jahrg. 9, S. 133, 151. Leitsätze des VDE zum Schutz von Fernsprech-Doppelleitungen gegen die Beeinflussung durch Drehstromleitungen.

(56) Die im elektrischen Felde aufgespeicherte Gesamtenergie wird richtig erhalten, wenn man jedem Punkt des Feldes eine Energiedichte $\frac{1}{2} \mathfrak{D} \mathfrak{E} = \varepsilon \mathfrak{E}^2 / 8\pi c^2$ zuschreibt. Für einen Kondensator von der Kapazität C , der Ladung Q und der Spannung U ergibt das einen Energiebetrag $\frac{1}{2} Q U = \frac{1}{2} C U^2 = Q^2 / 2C$.

(57) Die mechanischen Kräfte elektrischen Ursprungs lassen sich als Raumkräfte (a) oder als Oberflächenkräfte (b) darstellen.

a) Auf das mit der Dichte η geladene Raumteilchen dV wirkt die Kraft

$$\mathfrak{K} = (\eta \mathfrak{E} + \mathfrak{E}^2 \text{ grad } \varepsilon / 8\pi c^2) dV.$$

In einem homogenen Körper fällt das zweite Glied weg; das erste ist die aus dem Coulombschen Gesetz folgende Kraft. Das zweite Glied besagt: Die Körper suchen sich so zu stellen, daß der Verschiebungsfluß im ganzen möglichst groß wird. (Vgl. das entsprechende Verhalten des Eisens im Magnetfeld (125a).)

b) Die Wirkung des Feldes auf einen Körper wird erhalten, wenn man sich an jedem Punkt seiner Oberfläche eine Spannung \mathfrak{X} vom Betrag $\epsilon \mathfrak{E}^2 / 8\pi c^2$ angreifend denkt. Der Winkel zwischen \mathfrak{X} und der Oberflächennormale wird durch die Richtung von \mathfrak{E} halbiert. Die Kraft auf das Oberflächenelement ist der Unterschied der nach außen und der nach innen wirkenden Spannung.

Den Zusammenhang zwischen Spannung, Feldstärke und Neigungswinkel zwischen Feldstärke und Oberflächenelement hat F. E. M. de eingehend erörtert (Elektr. u. Maschb., Wien 1910, S. 35) und Modelle zur Veranschaulichung angegeben (ebenda, 1916, Heft 12 u. 13).

Spezialfälle (E. M. de, Elektr. u. Maschb. 1910, S. 33):

1. Zwischen zwei in einem homogenen Körper im Abstand r befindlichen elektromagnetisch gemessenen Punktladungen Q_1 und Q_2 wirkt die Kraft $Q_1 Q_2 c^2 / \epsilon r^2$ [Coulombsches Gesetz; vgl. (44)].

2. Hängt die Lage zweier Körper mit der Kapazität C nur von einer Koordinate (x) ab, so ist die zugehörige Kraftkoordinate bei konstanter Spannung $1/2 U^2 \partial C / \partial x$.

3. Auf das Oberflächenelement df eines Leiters wirkt die normale Zugkraft $\epsilon \mathfrak{E}^2 df / 8\pi c^2$.

4. Auf eine kleine ungeladene leitende Kugel vom Volum V wirkt im elektrischen Felde \mathfrak{E}_0 die Kraft $\epsilon V \text{grad } \mathfrak{E}_0^2 / 8\pi c^2$.

Durchbruchfeldstärke und Durchschlagspannung.

(58) Gase. Die Spannung, bei der eine Entladung in Luft einsetzt (Anfangsspannung), hängt in erster Linie von der Gestalt des elektrischen Feldes ab. Maßgebend ist nicht nur der Wert der elektrischen Feldstärke an den Elektroden, sondern auch ihr weiterer Verlauf in das Feld hinein.

Im homogenen Felde zwischen ausgedehnten ebenen Elektroden ist die Durchbruchfeldstärke eine Funktion der Schlagweite und nimmt mit wachsender Schlagweite ab. Bei 760 mm Barometerdruck und 20°C beträgt sie¹⁾ für den Elektrodenabstand

0,0005	0,001	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1	3	11 cm
700	400	180	103	63	44,5	37,5	31,7	29	26 kV/cm

Bei größeren Abständen nimmt sie nur wenig ab. Erklärt wird diese Erscheinung durch die Theorie der Ionisierung durch Stoß (96b).

Bei zylindrischen Elektroden ist die Durchbruchfeldstärke hauptsächlich vom Radius des Innenzylinders abhängig. Sie beträgt bei 760 mm und 20°C

für den Radius	0,1	1	15	cm
	etwa 62,2	40	30,6	kV/cm

Bei Kugeln ist die Durchbruchfeldstärke abhängig von Radius und Abstand. Bei kleinen Abständen ist sie sehr groß (wie bei ebenen Elektroden), durchläuft mit wachsendem Abstand ein Minimum und erreicht darnach ein Bereich langsam veränderlicher Werte. Sie nimmt auch mit wachsendem Radius ab. In dem erwähnten Bereich beträgt die Feldstärke (E. St. or ff) bei 760 mm und 20°C

für den Radius	1	5	12,5	cm
	46,7	34,9	31,9	kV/cm

sofern die Schlagweite bei großen Kugeln mindestens gleich dem Kugelradius, bei kleinen Kugeln mindestens gleich dem 2 bis 3fachen Kugelradius ist. Bei

¹⁾ Die angegebenen Werte sind Gleichspannungswerte und bei sinusförmigem Wechselstrom durch $\sqrt{2}$ zu dividieren.

kleineren Schlagweiten sind die Durchbruchfeldstärken geringer, bis sie schließlich bei kleinsten Abständen sehr stark ansteigen.

Die Durchschlagsspannungen sind proportional dem Luftdruck und umgekehrt proportional der absoluten Temperatur. Sie werden durch Regen stark (bei Kugelfunkenstrecken auf die Hälfte) herabgesetzt.

Die Kugelfunkenstrecke hat vor anderen den Vorteil, daß ihre Durchschlagsspannung bis zu sehr hohen Frequenzen hinauf konstant ist (Algermissen) und auch für kurzzeitige Impulse denselben Wert hat (Peek). Die Überschlagsspannung anderer Entladungsstrecken (z. B. von Hornableitern und namentlich von Spitzen) steigt dagegen bei kurzdauernden Impulsen stark an (Peek).

Die Spitzenfunkenstrecke wird ihrer Unzuverlässigkeit wegen nicht mehr angewendet; ihre Überschlagspannung hängt von der Schärfung der Spitzen, von der Feuchtigkeit, der Frequenz und Beanspruchungsdauer stark ab.

Literatur (dort auch Schlagweitenkurven): M. Toepfer, ETZ 1907, S. 998, 1025. — J. Algermissen, Ann. d. Phys. (4), Bd. 19, 1906, S. 1016. — J. S. Townsend, Theory of ionization of gases by collision, 1910. — W. Weicker, ETZ 1911, S. 436. — Weidig und Jaensch, ETZ 1913, S. 637, 679. — P. W. Peek jr., Proc. Am. Inst. of El. Eng. 1914, S. 889; 1915, S. 1695, 1857; 1919, S. 717. — ETZ 1916, S. 246. — W. Estorff, Diss. Berlin 1915; ETZ 1916, S. 60, 76.

Eine zusammenfassende Darstellung des Gesamtgebiets mit reicher Literaturangabe findet man bei W. O. Schumann, „Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen“, Berlin 1923.

(59) Flüssigkeiten. Als Isolieröle werden heute Mineralöle vorwiegend verwendet, die durch fraktionierte Destillation und zusätzliches Raffinieren aus Erdöl gewonnen werden. Über ihre Durchschlagsfestigkeit macht Rob. M. Friesel¹⁾ auf Grund langjähriger Versuche und Erfahrungen folgende Angaben.

Isolieröle haben eine große Neigung, Feuchtigkeit aus der Umgebung an sich zu reißen; geringe Spuren davon setzen die Durchschlagsfestigkeit stark herab. Diese ließ sich durch weitgehende Trocknung bis auf 230 kV/cm steigern. Sieht man ein solches Öl als wasserfrei an, so ergibt sich der folgende Zusammenhang zwischen der Durchschlagsfestigkeit E_d und dem Feuchtigkeitsgehalt w :

w in $\frac{\circ}{\infty}$	0	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1
E_d in $\frac{kV}{cm}$	230	140	76	42	31	26	23	22

Bei einem Feuchtigkeitsgehalt über 1 $\frac{\circ}{\infty}$ nimmt die Durchschlagsfestigkeit nicht mehr merklich ab. Diese Werte wurden durch Emulgierung wasserfreien Öles mit abgewogenen Mengen destillierten Wassers gewonnen, wobei das Wasser im Öl in Form kleiner Tröpfchen von etwa 0,01 mm nachweisbar war. Aus der Luft in Dampfform aufgesogenes Wasser ist in dem Öl mikroskopisch nicht mehr nachweisbar, also offenbar noch feiner verteilt; die Durchschlagswerte hierfür sind um einiges geringer als für emulgiertes Wasser. Entfeuchtete Isolieröle müssen unter luftdichtem Verschuß gehalten werden, wenn sie ihre hohe Isolierfestigkeit behalten sollen. In Betriebsräumen mittlerer Feuchtigkeit (etwa 50% rel. Feuchte) stellen sich nicht geschützte Isolieröle allmählich auf eine mittlere Durchschlagsfestigkeit von etwa 50 kV/cm ein. Von der Oberfläche her nehmen Isolieröle Feuchtigkeit schneller auf als vom Bodenwasser.

Durch Erhitzen (nicht über 120°!) oder durch Filtrieren läßt sich nasses Öl entfeuchten. In der Praxis erreicht man dabei Durchschlagsfestigkeiten von etwa 130—140 kV/cm.

Für die zahlenmäßige Festlegung der Durchschlagsfestigkeit ist nur der jeweils erste Durchschlagswert maßgebend; denn bei gut trockenem Öl liegen die fol-

¹⁾ „Über Durchschlagsfestigkeit von Isolierölen“, Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern. Bd. 1, 1921, S. 41.

genden Werte niedriger wegen der beim ersten Durchschlag gebildeten Zersetzungsprodukte, während bei feuchtem Öl zuweilen Trocknung eintritt, die die späteren Durchschlagswerte erhöht.

Mit zunehmendem Luftdruck wächst auch die Durchschlagsfestigkeit von Isolieröl nahezu linear; die Abhängigkeit kann z. B. für filtriertes Öl ($w = 0,01 \text{ } \text{‰}$) empirisch durch den Ausdruck

$$E_d = 86 + 0,08 B$$

dargestellt werden; B Barometerstand in mm Hg.

Alle Durchschlagswerte sind bei 50periodigem Wechselstrom mit sinusförmiger Spannungskurve bestimmt worden und als Effektivwerte angegeben; sie beziehen sich auf ein praktisch gleichförmiges elektrisches Feld und Schlagweiten von einigen Millimetern. Im ungleichförmigen Feld hängt die maximale Feldstärke beim Durchschlag flüssiger Isolierstoffe in ähnlicher Weise wie bei den Gasen von der Feldgestalt ab.

Die Kommission für Isolierstoffe des VDE hat „Vorschriften für Transformatoren- und Schalteröle“ entworfen (ETZ 1923, S. 600), in denen die Bedingungen, denen solche Öle hinsichtlich ihrer Beschaffenheit und Eigenschaften genügen müssen, sowie Prüfvorschriften festgelegt sind. Siehe auch den Aufsatz von W. Estorff, Behandlung und Überwachung von Isolierölen im Betriebe auf S. 29 der ETZ-Festschrift zur 29. Jahresversammlung des VDE 1923 (Verlag Jul. Springer).

(60) Feste Körper. Die Durchschlagsspannungen werden gewöhnlich mit hochgespanntem Wechselstrom bestimmt und als Effektivwerte angegeben. Zahlen für die Durchschlagsspannungen sind ziemlich unzuverlässig, da sie bei den meist inhomogenen Materialien von vielen Zufälligkeiten abhängen, auch gelten sie nur für die gerade gewählte Versuchsanordnung. Ohne genaue Angabe dieser sind Schlagweitengesetze wertlos. Viele Einzelangaben von Durchschlagsspannungen finden sich bei Turner und Hobart: „Die Isolierung elektrischer Maschinen“, Berlin 1906, und bei Petersen: „Hochspannungstechnik“, Stuttgart 1911. Siehe auch H. Zipp, Handb. d. elektr. Hochspannungstechnik, Leipzig 1917; A. Schwaiger, Lehrbuch der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien (Berlin 1919), Kap. III.

Einen Anhalt für die Größenordnung einiger Durchschlagsspannungen gibt die folgende Zusammenstellung; sie bezieht sich auf Stoffe, die zwischen parallelen Metallplatten mit 50-periodigem Wechselstrom durchgeschlagen wurden. Die obere Zahl bedeutet die effektive Durchschlagsspannung in Kilovolt, die untere die durchgeschlagene Dicke in mm.

Paraffin	$\frac{27}{1,0} \frac{39}{2,0} \frac{56}{4,0} \frac{68}{6,0} \frac{78}{8,0} \frac{87}{10,0} \frac{95}{12,0} \frac{102}{14,0}$	Ebonit	$\frac{14}{1,4}$
Hartporzellan	$\frac{15}{1,0} \frac{25}{2,0} \frac{44}{4,0} \frac{61}{6,0} \frac{77}{8,0} \frac{92}{10,0}$	Preßspan	$\frac{12}{1,0}$
Vulk. Gummi	$\frac{2,2}{0,14} \frac{6,8}{0,5} \frac{10}{1,0} \frac{16,8}{2,0} \frac{26}{4,0} \frac{40}{10,0}$	Rote Vulkanfiber	$\frac{5}{1,0}$
Glimmer	$\frac{1,75}{0,015} \frac{11,5}{0,1} \frac{19}{0,2} \frac{37}{0,5} \frac{52}{0,8} \frac{60}{1,0}$	Papierisolation für Kabel	$\frac{20}{1,0}$
Mikanit	$\frac{22}{1,0} \frac{42}{2,0} \frac{53}{3,0} \frac{58}{4,0}$	Transformatoröl	$\frac{6 \text{ bis } 10}{1,0}$
Imprägn. Jute	$\frac{2,2}{1,0} \frac{7}{6,0} \frac{10,2}{10,0} \frac{12,7}{14,0}$	Vaselinöl	$\frac{130}{10,0}$
Glas	$\frac{4,0}{0,1} \frac{6,4}{0,2} \frac{13}{0,5} \frac{18}{1,0}$	Petroleum	$\frac{95}{10,0}$

Wie diese Zahlen lehren, steigt die Durchschlagsspannung langsamer als die Dicke. Macht man die gleiche Zahl von Durchschlagproben mit großen und mit kleinen Elektrodenflächen, so ergeben die Versuche mit den großen Elektrodenflächen einen niedrigeren Mittelwert der Durchschlagsspannung, weil die Wahrscheinlichkeit, schlechte Stellen im Isolierstoff zu treffen, mit der Elektrodenfläche wächst. (Vgl. Gewecke und Krukowski, Arch. f. Elektrot. Bd. 3, 1915, S. 63). Kennt man die Streuung der für kleine Elektroden gültigen Durchschlagsspannungen um ihren Mittelwert, so kann man die mittlere Durchschlagsspannung für größere Elektroden nach H. Stahl berechnen.

Mit steigender Frequenz nimmt die Durchschlagsspannung der meisten festen Isolierstoffe nach Versuchen von K. W. Wagner und H. Dieterle mehr oder minder stark ab; z. B.:

Stoff	Durchschlagsspannung in kV für die Frequenz						
	0 (Gleichstrom)	0,5	10	50	500	5000	50 000
Glimmer, 0,015 mm	8,0	2,55	2,06	1,75	1,57	1,49	1,38
Glas, 0,108 mm . .	7 bis 8	8,3	rd. 5	4,25	4,0	3,9	3,2
Gummi, 0,143 mm .	3	2,6	—	2,17	1,7	—	1,5

Die angegebenen Durchschlagsspannungen beziehen sich auf Dauerbeanspruchung; bei kurzzeitiger Beanspruchung wird der Durchschlag erst bei höherer Spannung erreicht. Für jede Spannung oberhalb der Durchschlagsspannung für Dauerbeanspruchung läßt sich eine Zeit bestimmen, die bis zum Eintritt des Durchschlags verfließt. So ergab sich z. B.

a) Für vulkanisierten Gummi, 0,143 mm stark, bei Gleichstrom:

Zeit bis zum Durchschlag in min	∞	12	7	4	2,5	1,7	1	0,8	0,3
Spannung in kV	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	5,0

b) Für Glimmer, 0,015 mm stark, bei 0,5 Per/s:

Zeit bis zum Durchschlag in min	∞	25	13	7,5	3	1	0,3	
Spannung in kV	2,55	2,6	2,7	2,8	3,0	3,2	3,4	

c) Für Glimmer, 0,015 mm stark, bei 50000 Per/s:

Zeit bis zum Durchschlag in min	∞	24	12	6	2,8	0,5	
Spannung in kV	1,38	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	

Ist die Zeit der Beanspruchung hinreichend kurz (z. B. bei Sprungwellen), so widersteht ein fester Isolierstoff einem Vielfachen seiner gewöhnlichen Durchschlagsspannung.

Beim Vergleich verschiedener Spannungskurven hinsichtlich der Durchschlagsbeanspruchung fester Isolierstoffe ist der Effektivwert in Betracht zu ziehen (im Gegensatz zu den gasförmigen Isolierstoffen, bei denen der Scheitelwert maßgebend ist).

Mit steigender Temperatur nimmt die Durchschlagsspannung im allgemeinen ab; ebenso mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt; dieser ist insbesondere bei faserigen oder porösen Isolierstoffen von hohem Einfluß. (Vgl. W. S. Flight, The Electrical Review, Bd. 90, 1922, S. 39, 76.)

Nach K. W. Wagner lassen sich die Gesetze des Durchschlags von festen Isolierstoffen aus der Betrachtung des thermisch-elektrischen Gleichgewichts herleiten; der Durchschlag tritt ein, wenn dieses Gleichgewicht labil wird (Sitzungsber. d. Preuß. Akad. d. Wiss., phys.-math. Kl. 1922, S. 438; Journ. of the Amer. Inst. of El. Eng. 1922, S. 1034.)

Der elektrische Strom.

a) Metalle und metallisch leitende Körper.

(61) Eingeprägte Feldstärke. Im Innern homogener Leiter ist im Zustande des elektrischen Gleichgewichts (im elektrostatischen Felde) die Feldstärke $\mathfrak{E} = 0$. In chemisch oder thermisch heterogenen Leitern besteht eine „eingeprägte“ Feldstärke \mathfrak{E}_e , die von der Beschaffenheit des Leiters abhängt. Sie wird im Gleichgewichtszustand durch eine gleich große, aber entgegengerichtete elektrische Feldstärke \mathfrak{E} gerade aufgehoben: $\mathfrak{E} + \mathfrak{E}_e = 0$.

(62) Strömung, Ohmsches Gesetz. Jede Abweichung der Feldstärke von dem soeben angegebenen Gleichgewichtswert ruft eine Strömung von der Dichte

$$c = \frac{1}{\rho} (\mathfrak{E} + \mathfrak{E}_e)$$

hervor (Ohmsches Gesetz). ρ ist der spezifische Widerstand des Materials, $\kappa = 1/\rho$ der spezifische Leitwert oder die Leitfähigkeit. Die Stromlinien können nur dort entspringen oder münden, wo elektrische Ladungen sich ändern. An allen anderen Punkten ist also $\text{div } c = 0$.

(63) Energieumsatz. Die Strömung ist mit einer Erzeugung nichtelektrischer Energie verbunden, die in der Zeit dt

$$\Psi dt = dt \int \mathfrak{E}_e c dV = dt \int (\rho c^2 - \mathfrak{E}_e c) dV$$

beträgt. Darin entspricht ρc^2 der in der Raum- und Zeiteinheit entstehenden Stromwärme (Joulesches Gesetz (72)); sie ist stets positiv (irreversibler Energieumsatz). $\mathfrak{E}_e c$ ist die Abnahme der chemischen Energie bei galvanischen oder die verbrauchte Peltierwärme bei Thermoelementen; sie wechselt mit i das Vorzeichen (reversibler Energieumsatz).

(64) Potential. Auch das elektrische Feld einer stationären Strömung ist überall wirbelfrei; die Feldstärke \mathfrak{E} kann daher als Gefälle eines einwertigen Potentials dargestellt werden: $\mathfrak{E} = -\text{grad } \varphi$.

(65) Lineare Leiter sind solche, deren Querschnittsabmessungen klein gegen die Länge sind (Drähte u. dgl.). Wenn q den Querschnitt, $|c|q = I$ den Gesamtstrom, $\int_a^b \mathfrak{E} ds = \varphi(a) - \varphi(b) = U$ die Potentialdifferenz oder Spannung zwischen den Enden a und b des Leiters und $\int_a^b \mathfrak{E}_e ds = E$ die im Stücke ab tätige elektromotorische Kraft (EMK) bezeichnet, so nimmt das Ohmsche Gesetz hier die Form an

$$U = RI - E, \text{ mit } R = \int_a^b \frac{q |ds|}{q}.$$

R ist der Widerstand des Leiters ab , $G = 1/R$ sein Leitwert. Ist der Querschnitt überall derselbe, und ist l die Drahtlänge, so ist

$$R = ql/q.$$

Spezialfälle.

1. Für einen geschlossenen Kreis ist $U = 0$, daher $E = RI$.
2. An den Enden eines Leiters, in dem keine EMK wirkt, ist die Spannung $U = RI$ (Ohmscher Spannungsfall).

3. Die Klemmenspannung einer galvanischen Zelle (eines Sammlers) ist $U_k = E - R_i I$ bei der Entladung, $U_k = E + R_i I$ bei der Ladung; R_i ist der innere Widerstand der Zelle.

Die in der Zeiteinheit im linearen Leiter erzeugte nichtelektrische Energie ist

$$\Psi = R I^2 - E I$$

$R I^2$ ist die Joulesche Wärmeleistung, $-E I$ die Zunahme der chemischen Energie oder Peltierwärme. Ψ wächst auf Kosten der elektrischen Energie (oder der magnetischen Energie; abgesehen von bewegten Körpern). Im Falle stationärer Strömung sind diese Energien konstant, daher $\Psi = 0$ oder $R I^2 = E I$ (Joulesche Wärme = Abnahme der chemischen Energie oder der Peltierwärme).

(66) Die Kirchhoffschen Sätze über die Stromverzweigung beziehen sich auf ein aus linearen Leitern in beliebiger Weise zusammengeschaltetes Netz.

1. In jedem Verzweigungspunkte ist die Summe der ankommenden Ströme gleich der Summe der abfließenden: $\sum I = 0$ (folgt aus $\operatorname{div} \mathbf{c} = 0$).

2. Für jeden aus den Leitern zu bildenden geschlossenen Weg ist die Summe aller EMKe gleich der Summe aller Ohmschen Spannungsfälle: $\sum E = \sum R I$ (folgt aus dem Ohmschen Gesetz).

Aus diesen Sätzen folgt insbesondere:

a) eine aus den Widerständen R_1, R_2, \dots, R_n gebildete Reihe hat den Gesamtwiderstand $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.

b) Schaltet man die Einzelwiderstände parallel, so ist der Gesamtwiderstand aus $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n$ zu berechnen.

Ist $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_0$, so wird $R = R_0/n$.

(67) In körperlich oder flächenhaft ausgedehnten Leitern muß die Stromverteilung aus den in (61) bis (64) angegebenen Beziehungen berechnet werden. Von einem Widerstande solcher Leiter kann man nur dann sprechen, wenn Lage und Beschaffenheit der Stromzuführungsstellen (Elektroden) gegeben sind, und wenn diese so klein sind oder so wenig Widerstand haben, daß von einem bestimmten Potential der Elektroden geredet werden kann¹⁾.

(68) Widerstände einiger ausgedehnten Leiter. 1. Isolationswiderstand gestreckter Leiter (siehe auch (92)).

Die Ableitung $G = 1/R$ ist für ein *homogenes* Dielektrikum der Kapazität (51 bis 54) proportional; es gilt $G = 4\pi c^2 C / \epsilon \varrho_{\text{abs}}$, wobei alle Größen in absolutem elektromagnetischem Maß ausgedrückt sind. Wenn man R in Ohm, d. h. G in Siemens, und C in Mikrofarad ausdrückt, so ist

$$G = \frac{1}{R} = \frac{36 \cdot 10^9 \pi}{\epsilon \varrho_1} C,$$

ϵ = Dielektrizitätskonstante, ϱ_1 = spez. Widerstand für 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt = $10^4 \varrho$ in $\Omega\text{-cm} = 10^{-5} \varrho_{\text{abs}}$.

Sind mehr als zwei Leiter im Felde, so ergibt jede Teilkapazität nach dieser Formel die zugehörige Teilableitung.

2. Übergangswiderstände von Erdelektroden in einem unbegrenzten Medium

Kugel, Durchm. = d

$$R = \varrho / 2\pi d,$$

Kreisplatte, Durchm. = d

$$R = \varrho / 4d,$$

Zylindr. Walze, Durchm. = d

$$R = \frac{\varrho}{\pi d} \frac{\log \operatorname{nat} 2n}{2n},$$

Länge = nd

Rechteckige Platte, Länge der kleineren Seite a , der größeren Seite na

$$R \approx \frac{\varrho}{2a\pi\sqrt{N}} \log \operatorname{nat} \frac{n+1+\sqrt{N}}{n+1-\sqrt{N}}$$

¹⁾ Näheres bei Debye, Enzykl. d. Math. Wiss. Bd. V. Art. 17, § 6 bis 16, S. 401—425.

Dabei ist $N = (1+n)^2 - 8n/\pi$; Maße in cm; ρ für Grund-(Fluß-)Wasser, bezw. nassen Boden ca. $10^4 \Omega\text{-cm}$, für trocknen Boden ca. $10^6 \Omega\text{-cm}$, für Seewasser ca. $10^2 \Omega\text{-cm}$.

(69) Temperatureinfluß. Der Widerstand der Metalle und Legierungen befolgt in mäßigen Temperaturgrenzen mit praktisch ausreichender Genauigkeit das Gesetz

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) = R_{\vartheta} \left[1 + \frac{\alpha}{1 + \alpha \vartheta} (t - \vartheta) \right].$$

R_t, R_{ϑ}, R_0 = Widerstand bei $t, \vartheta, 0^\circ \text{C}$; α = Temperaturkoeffizient bei 0° ; er beträgt für die meisten Metalle etwa 0,0035 bis 0,0045, für die reinen ferromagnetischen Metalle etwa 0,0066, für Legierungen stets viel weniger. Für vollkommen reine Metalle hat der Temperaturkoeffizient die größten Werte (Zahlen bei L. H o l b o r n Z. S. f. Phys. Bd. 8. S. 62. 1921); geringe Verunreinigungen drücken ihn stark herab.

$\alpha_{\vartheta} = \alpha / (1 + \alpha \vartheta)$ ist der Temperaturkoeffizient bei der Temperatur ϑ . Aus dem vorstehenden Ausdruck ergibt sich

$$\frac{1}{\alpha_{\vartheta}} = \frac{1}{\alpha} + \vartheta.$$

Der Widerstand der reinen Metalle nimmt fast linear mit der Temperatur ab und verschwindet bei gewissen Metallen (z. B. Blei) nach Beobachtungen von K a m e r l i n g h O n n e s bei einer sehr tiefen, wenig über dem absoluten Nullpunkt liegenden Temperatur vollständig; bei dieser Temperatur kann man somit durch dünne Drähte beliebige starke Ströme schicken¹⁾.

Der spezifische Widerstand von Kohle, Siliziumkarbid, Karborund, Karbazolith, Silit u. dgl. nimmt mit wachsender Temperatur stark ab²⁾.

(70) Spezifischer Widerstand. Man beachte, daß der spezif. Widerstand von Metallen so sehr von Beimengungen abhängig ist, daß genaue Zahlen, die man für die ganz reinen Metalle kennt, oder Beispiele von Werten für verunreinigte Metalle oder für Legierungen hier nur verhältnismäßig geringen Wert haben.

Spezifischer Widerstand ρ und Temperaturkoeffizient α bei 20° .

	ρ	1000 α		ρ	1000 α
Aluminium	0,03—0,04	3,6	Silber	0,016	3,6
Aluminiumbronze .	0,12	1	Stahl	0,10—0,25	5,2
Antimon	0,45	4,1	Tantal	0,15	3,3
Blei	0,21	4,2	Wismut	1,2	4,2
Cadmium	0,076	4,0	Wolfram	0,055	4,1
Eisen	0,10—0,15	4,5	Zink	0,063	3,7
Elektron	0,063	2,2	Zinn	0,10	4,2
Gold	0,23	4,0	Kohle (Retorten-		
Iridium	0,053	4,1	kohle, Graphit) .	ca. 100	—0,2 bis —0,8
Kupfer	0,0175	3,9	Kohlenstifte für		
Magnesium	0,045	3,9	Bogenlampen:		
Messing	0,07—0,09	1,5	Homogenkohlen.	55—78	
Neusilber	0,15—0,40	0,2—0,6	Dochtkohlen . .	57—88	
Nickel	0,08—0,11	4,0	Kohlenfäden für		
Osmium	0,095	4	Glühlampen:		
Palladium	0,11	3,8	roh	35	
Platin	0,11—0,14	2 bis 3	mit Kohlenieder-		
Quecksilber	0,96	0,92	schlag	25	
Rhodium	0,06	4,4			

¹⁾ J. Dewar, Proc. Roy. Soc. Bd. 68, S. 360, 1901. — C. Niccolai, Atti della Acad. dei Lincei, 1907. — K a m e r l i n g h O n n e s, Communicat. Physical. Laborat. Leiden, namentlich Nr. 133c, 1913. — Zusammenfassende Darstellung bei C r o m m e l i n, Phys. ZS. Bd. 21, S. 274, 300, 331, 1920. Zahlenwerte und weitere Literatur in Landolt-Börnsteins physikal.-chem. Tabellen, 4. Aufl. 1912.

²⁾ Bis zu einem Minimum, nach J. Koenigsberger und O. Reichenheim, Phys. Zeitschr. Bd. 7, S. 570, 1906; J. Koenigsberger und K. Schilling Ann. Phys. Bd. 32, S. 179, 1910. Siehe ferner „Handwörterbuch der Naturwissenschaften“, Bd. 3, S. 351 ff. Jena 1913.

Drähte für Freileitungen.

	ϱ	Festigkeit kg*/mm ²		ϱ	Festigkeit kg*/mm ²
Hartkupfer . . .	0,017	42—45	Bronze	0,019—0,022	50—55
Bronze	0,018	46	Bronze	0,025—0,056	70—90

Legierungen als Widerstandsmaterialien¹⁾.

Nach Angaben der Fabrikanten. Die Messungen rühren größtenteils von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt her; sie gelten nur für die untersuchten Stücke genau, für die im Handel gelieferten Materialien aber nur angenähert.

Bezugsquelle	Nummer	Material	ϱ	α	spez. Gew.	Festigkeit kg*/ mm ²	feinster Draht mm	
Basse & Selve, Altena (Westf.)	1	Konstantan hart	0,51	—0,000005	8,89	hart 83	0,05	
		„ weich	0,49			weich 48	„	
	2	Nickelin	0,43	0,00023	8,71	hart 90	„	
		„ weich				weich 49	„	
	3	Nickelin-Neusilber	0,36	0,00031	8,71	hart 84	„	
		„ weich				weich 41	„	
Vereinigte Deutsche Nickelwerke Akt.-Ges. vormals Westfäl. Nickelwalzwerk, Fleitmann, Witte & Co., Schwerte, Westf.	4	Widerstandsdraht „Superior“	0,86	0,00073	8,5	—	0,10	
	5	„ Ia. Ia., hart	0,50	—0,00001	bis	75	0,05	
	6	„ „ „ weich	0,47	0,00001	9,0	40	„	
	7	Nickelin Nr. 1, hart	0,44	0,00008		70	„	
	8	„ „ „ weich	0,41	0,00017		40	„	
	9	„ Nr. 2, hart	0,34	0,00018		70	„	
	10	„ „ „ weich	0,32	0,00019		40	„	
	11	Neusilber 2a., hart	0,37	0,00020		65	„	
	12	„ „ „ weich	0,37			45	„	
	13	Blanca-Extra	0,48	0,00015		—	„	
	14	Chromin hart	0,82	0,00026		100	0,10	
		„ weich	0,85	0,00026		70	0,10	
	Dr. Geitners Argenta-fabrik, F. A. Lange, Auerhammer, Sachs.	15	Rheotan	0,48	0,00023	8,9		0,10
		16	Rheotan CN	0,48	—0,00003			0,10
17		Rheotan S	0,72	0,00004	bis		0,10	
18		Nickelin	0,40	0,00016			0,10	
19		Extra Prima Neusilber	0,30	0,00025	9,0		0,10	
Isabellenhütte bei Dillenburg	20	Manganin	0,43	$\pm 0,00001$	8,3	45	0,03	
	21	Resistin (nickelfrei)	0,50	$\pm 0,00002$	8,3	45	0,06	
Fried. Krupp, A.-G., Essen	22	Kruppsches Widerstands-material	0,85	0,00077 zw. 18 u. 150°	8,10	60	0,5	
	23	WTII-Widerstands-material für hohe Temperat.	1,00	0,00025	8,25	70	0,5	
C. Schniewindt, Neuenrade in Westfalen	24	Exzelsior I	0,86	0,0007	8,7		0,10	
	25	Konstantan	0,50	0,000005	bis		„	
	26	Rheostatin	0,48	0,000011	9,1		„	
	27	Nickelin	0,40	0,0001			„	
	28	Exzelsior II	0,058	0,0014			„	

Zusammensetzung einiger der angeführten Materialien nach Gewichtsprozenten (abgerundet).

Nr. 1: 58 Cu, 41 Ni, 1 Mn,
 „ 2: 54 Cu, 26 Ni, 20 Zn,
 „ 20: 84 Cu, 4 Ni, 12 Mn.

Man erhält den Widerstand eines linearen Leiters (65) nach der auf S. 59 angegebenen Formel $R = \varrho l/q$, wo ϱ aus den obigen Tafeln entnommen, R in Ω , l in m, q in mm² gemessen ist.

Der spezifische Widerstand wird häufig nach Mikrohm-Zentimeter gemessen; er ist dann gleich dem Widerstand eines Würfels von 1 cm Seite in Milliontel-Ohm =

¹⁾ Eine reichhaltige Zusammenstellung von Zahlenwerten findet man im Bulletin des Schweiz. Elektrot. Vereins, Jahrg. 1923. S. 525.

dem Hundertfachen der in den vorstehenden Tabellen unter ρ enthaltenen Werte. Multipliziert man diese mit 10^5 , so erhält man ρ in absoluten elektromagnetischen CGS-Einheiten.

(71) Widerstandskörper und -Drähte. C. S c h n i e w i n d t, Neuenrade i. W., liefert Widerstandskörper aus einem Gewebe bzw. Geflecht von Widerstandsdrähten oder Platte mit Asbestfäden in Form von Gittern, Bändern, Kordeln und Schläuchen.

Die Maximalbelastungen beziehen sich auf die günstigsten Abkühlungsverhältnisse; baut man die Bänder in Apparate ein, so wird man sie je nach der Dauer der Belastung und nach den Abkühlungsverhältnissen nur mit der Hälfte bis zu zwei Dritteln der angegebenen Stromwerte belasten dürfen. Für Widerstände mit sehr geringer Belastungsdauer (Anlasser, Überspannungsschutzwiderstände) setzt man die Bänder unter Öl und darf sie dann bedeutend stärker belasten.

Widerstandsbänder Nr. 42 aus Konstantandraht (Schniwindt).

Drahtdurchmesser mm	0,10	0,13	0,15	0,18	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
Maximalbelastung in A, ca.	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,75	1,0	3	5	6	7	8	9	10	11	12
Widerstand bei 100 mm Breite in Ω/m	7500	5200	2000	1500	1200	800	400	200	120	80	45	32	23	17	11	7
Widerstand bei 60 mm Breite in Ω/m	4500	3100	1200	900	750	480	240	120	72	48	27	19	14	10	6,5	4,2

Größte Fabrikationslänge 20 bis 50 m, je nach der Drahtstärke;
größte Fabrikationsbreite 1 m.

Die Widerstandskordel Nr. 60 wird mit einem Durchmesser von etwa 1,5 3 5 7 10 12 15 mm und mit einem Widerstand von etwa

minimal	16	1,0	1,5	2,4	3,5	4,0	4,5	Ω
maximal	800	1400	800	1100	1700	1900	2500	Ω

bei einer Belastung von etwa 0,04 bis 12 A geliefert.

H a r t m a n n & B r a u n Akt.-Ges. in Frankfurt (Main) liefern unter dem Namen „Haardrähte“ feine gezogene (nicht nach dem Wollastonverfahren hergestellte) Drähte von 0,2 bis herab zu 0,015 mm Durchmesser aus Silber, Kupfer, Aluminium, Zink, Gold, Messing, Nickel, Eisen, Platin, Platinsilber, Platiniridium, Phosphorbronze, Stahl, Manganin, Konstantan, Kulmitz, Kruppig, Neusilber, Nickelin. Die Widerstände gehen bis 2850 Ω/m . Außerdem werden Wismutdrähte von 0,06 bis 2 mm Durchmesser und sogenannte W o l l a s t o n drähte geliefert. Nach Wollaston umgibt man zur Herstellung feinsten Gold- und Platindrähte den auszuziehenden Draht mit einer Silberhülle und zieht ihn mit dieser durch Diamantlochsteine auf geringstmögliche Dicke. Die verbleibende Silberhülle ist vor Benutzung der Drähte auf chemischem Wege zu entfernen.

Durchmesser der Gold- oder Platin- seele, mm	0,0015	0,002	0,0025	0,003	0,004	0,005	0,0075	0,01
Äußerer Durch- messer, etwa mm	0,015	0,02	0,09	0,11	0,14	0,15	0,10	0,08

Die Leonischen Werke Roth-Nürnberg A.-G. in Nürnberg, liefern Flachdraht (Platte, Bänder) aus Widerstandsdraht Ia. Ia. von Fleit-

mann, Witte & Co. in Schwerte i. W. glatt und gewellt (gekrüpf) von 1 bis 700 Ω /m. Die stärkste Platte ist ca. 2,80 mm, die dünnste ca. 0,12 mm breit, und die Dicke beträgt $\frac{1}{25}$ — $\frac{1}{20}$ der Breite. Platte in denselben Abmessungen wird von C. Schie wind t, Neuenrade i. W. geliefert.

Hohe Widerstände zwischen 10^7 und $10^3 \Omega$ werden unter der Bezeichnung „M ult o h m“ (vgl. L i l i e n f e l d u. H o f m a n n ; ETZ 1920, S. 870) hergestellt; es sind Glasröhren, die innen eine dünne Schicht aus Kohlenstoff oder Metall-oxyden in spiralförmiger Belegung tragen.

(72) **Erwärmung von Leitungen** (J o u l e s G e s e t z). In einem Draht vom Widerstande R Ohm, durch den I Ampere fließen, entsteht während t Sekunden eine Stromwärme von

$$Q = 0,239 I^2 R t \text{ Grammkalorien}^1).$$

Wegen der Wahl des Leitungsquerschnitts mit Rücksicht auf die Erwärmung siehe den Abschnitt „Leitung und Verteilung“.

(73) **Das Wesen der Stromleitung in Metallen** wird nach E. Riecke, P. Drude, J. J. Thomson und H. A. Lorentz dadurch erklärt, daß in den metallisch leitenden Körpern freie Elektronen (Atome negativer Elektrizität) vorhanden sind, die sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes bewegen. Näheres bei M. A b r a h a m, Theorie d. Elektriz. Bd. II, S. 270, § 32, 1908; E. Riecke, Phys. Zeitschr. Bd. 10, S. 508, 1909, K. B a e d e k e r, „Elektrische Erscheinungen in metallischen Leitern“, Braunschweig 1911 und S i e b e l, „Die Elektrizität in Metallen“ Braunschweig 1922.

(74) **Thermoelektrische Kräfte**. Wenn in einem Leiter, der aus zwei oder mehreren verschiedenen Metallen (oder aus physikalisch verschieden beschaffenen Stücken desselben Metalls, z. B. einem harten und einem weichen Draht) besteht, die Verbindungsstellen der Metalle ungleiche Temperaturen besitzen, so entsteht eine EMK. Diese Kraft, Thermokraft, ist von der Natur der in Berührung gebrachten Metalle abhängig und wächst im allgemeinen mit der Temperaturdifferenz der Berührungsstellen. Bei sehr starken Erhitzungen (der einen Verbindungsstelle, während die andere abgekühlt bleibt) wird indes für viele Kombinationen von Metallen die EMK wieder geringer, ja sie kann ganz verschwinden und bei noch weiter gehender Erhitzung von neuem, aber mit entgegengesetzter Richtung auftreten.

Die Metalle und Metallegierungen lassen sich in eine thermoelektrische Spannungsreihe ordnen, welche zunächst nur für mäßige Erhitzungen gilt. Die Stellung der einzelnen Metalle in dieser Reihe ist aber von geringen Beimengungen, die sie enthalten können, abhängig. Die folgende Tabelle gibt die thermoelektrische Kraft eines Metallpaares, wenn die eine Lötstelle sich auf 0° , die andere auf 100° befindet, in Millivolt als Differenz der beigesetzten Zahlen.

Wismut 0	Quecksilber 6,7	Silber 7,4
Konstantan 3,0	Aluminium 7,1	Kupfer 7,4
Patentnickel 3,8	Blei 7,1	Zink 7,5
Nickel 5,1	Zinn 7,1	Cadmium 7,6
Palladium 6,1	Messing 7,1	Eisen 8,3
Platin 6,6	Gold 7,2	Antimon 10,0

Hieraus ergibt sich z. B. die thermoelektrische Kraft eines Kupfer-Konstantanelements zu $7,4 - 3,0 = 4,4$ mV für 100° Temperaturunterschied der beiden Lötstellen.

Der positive Strom fließt in der wärmeren Lötstelle in der Richtung Wismut—Antimon.

Zur Messung hoher Temperaturen ist das von der Firma Heraeus, Hanau, angefertigte Thermoelement nach L e C h a t e l i e r aus Platin und Platin-

¹⁾ Nach den neuesten Messungen der Phys. Techn. Reichsanstalt ergibt sich 0,2390; dieser Wert ist auch vom AEF angenommen worden.

Rhodium (10% Rh, 90% Pt) gebräuchlich. Befindet sich die eine Lötstelle auf 0° , die andere auf t° , so gilt im Mittel nach Holborn und Valentiner (Ann. d. Phys. (4) Bd. 22, 1907, S. 27)

$t = 100$	200	300	400	500	600	700	800°
EMK = 0,6	1,4	2,25	3,17	4,13	5,14	6,17	7,25 mV
$t = 900$	1000	1100	1200	1300	1400	1500°	
EMK = 8,34	9,47	10,62	11,8	13,0	14,1	15,3	mV

Richtlinien für die Brauchbarkeit verschiedener Thermolemente zur Messung hoher Temperaturen hat die Physikalisch-Techn. Reichsanstalt aufgestellt; Zeitschr. f. Instr. Bd. 38, 1918, S. 97.

Die Umwandlung der Wärme in elektrische Arbeit in einem Thermolement ist ein umkehrbarer Vorgang (63): das bei der Stromentnahme sich ausgleichende Temperaturgefälle entsteht von neuem, wenn man die Stromrichtung umkehrt; der Strom schafft sich dann selbst eine Gegen-EMK (Peltierwirkung).

Auch in vielen homogenen Leitern treten Thermokräfte auf, wenn ein Temperaturgefälle in ihnen besteht. Die Thermokraft ist diesem Gefälle proportional; in einigen Stoffen hat sie die Richtung des Temperaturgefälles, in anderen die entgegengesetzte (Thomsonwirkung).

b) Elektrolyte.

(75) **Elektrolytische Leitfähigkeit.** Salze, Säuren und Basen bzw. Oxyde (Leiter zweiter Klasse) leiten gelöst in Wasser (und einigen anderen Lösungsmitteln) sowie in geschmolzenem Zustande die Elektrizität unter gleichzeitiger chemischer Zersetzung. Für die elektrolytisch leitenden Substanzen gilt das Ohmsche Gesetz. Der Widerstand R ist proportional der Länge l (gemessen in cm) und umgekehrt

Leitfähigkeit wässriger Lösungen bei 18° .

Äquivalentleitvermögen				Leitfähigkeit. Länge und Querschnitt des Leiters in cm und cm^2 , Gehalt in Gewichtsprozenten		
1000 η	1,0	0,1	0,001	5%	10%	20%
KCl	98,27	112,03	127,34	0,069	0,136	0,268
NaCl	74,35	92,02	106,49	0,0672	0,1211	0,196
NH_4Cl	97,0	110,7	127,3	0,0918	0,1776	0,3365
KNO_3	80,46	104,79	123,65	0,0454	0,084	0,151
NaNO_3	65,86	87,24	102,85	0,044	0,078	0,130
AgNO_3	67,6	94,33	113,15	0,0256	0,0476	0,0872
$\frac{1}{2} \text{K}_2\text{SO}_4$	71,6	94,9	126,9	0,0458	0,0860	—
$\frac{1}{2} \text{Na}_2\text{SO}_4$	50,8	78,4	106,7	0,0409	0,0687	—
$\frac{1}{2} \text{BaCl}_2$	70,14	90,8	115,6	0,0389	0,0733	0,1331
$\frac{1}{2} \text{MgSO}_4$	28,9	49,7	99,8	0,0263	0,0414	0,0476
$\frac{1}{2} \text{CuSO}_4$	25,8	43,85	98,54	0,0189	0,0320	—
$\frac{1}{2} \text{ZnSO}_4$	(26,6)	45,34	98,40	0,0191	0,0321	0,0468
$\frac{1}{2} \text{CdSO}_4$	23,58	42,21	97,72	0,0146	0,0247	0,0388
KOH	184	213	(234)	—	—	—
NaOH	157,0	195,4	—	0,197	0,312	0,327 ¹⁾
HCl	301	351	(377)	0,395	0,6302	0,7615
HNO_3	310	350	(375)	—	—	—
$\frac{1}{2} \text{H}_2\text{SO}_4$	198	225	361	0,209	0,392	0,653

¹⁾ bei 15° .

proportional dem Querschnitte q , gemessen in cm^2 , sowie der Leitfähigkeit oder dem spezifischen Leitwert κ , also: $R = l/\kappa q$. Als Einheit der Leitfähigkeit gilt die Leitfähigkeit eines Körpers, dessen Würfel mit der Kantenlänge von 1 cm den Widerstand von 1 Ω besitzt. Die Leitfähigkeit nimmt in der Regel mit steigender Temperatur zu, und zwar etwa um 2% für 1°.

(76) Äquivalentleitvermögen (F. Kohlrausch). Enthält eine Lösung von der Leitfähigkeit κ in 1 cm^3 η Grammäquivalente des Elektrolyten, so ist ihr Äquivalentleitvermögen: $\Lambda = \kappa/\eta$. Zahlenwerte s. vorige Seite.

(77) Elektrolytische Dissoziation (Arrhenius). Die nichtleitenden Moleküle eines Elektrolyten sind in Lösung bis zu einem gewissen mit der Verdünnung zunehmenden Bruchteil (Dissoziationsgrad α) in elektrisch geladene, die Stromleitung besorgende Teilmoleküle (Ionen) gespalten. Das Verhältnis der Leitfähigkeit bei einer bestimmten Konzentration Λ_η zu der bei unendlicher Verdünnung Λ_∞ ergibt den Dissoziationsgrad, also: $\alpha_\eta = \Lambda_\eta/\Lambda_\infty$.

Ionen mit 1 oder mehr positiven Ladungen (Kationen) sind Wasserstoff, die Metalle und die Gruppe NH_4^+ . Ein- oder mehrfach negativ geladene Ionen (Anionen) sind die Halogene, die Säureradikale OH^- , NO_3^- , SO_4^{--} , ClO_3^- , NO_2^- , PO_4^{--} und viele andere. An Stelle der Zeichen + und — werden häufig an den chemischen Formeln die Zeichen \cdot und $'$ angebracht.

(78) Wirkungen des Stromes auf den Elektrolyten. Taucht man zwei metallisch leitende Elektroden in die Lösung eines Elektrolyten oder in einen geschmolzenen Elektrolyten und schickt diesen Strom hindurch, so wandern die Kationen in der Richtung des Stromes zur Kathode, die Anionen zur Anode und werden daselbst abgeschieden, wobei sie in den ungeladenen Zustand übergehen.

Erstes Gesetz von Faraday. Die abgeschiedene Menge m der Ionen ist proportional der durch den Elektrolyten hindurchgegangenen Elektrizitätsmenge Q (oder prop. der Stromstärke I und der Dauer t des Stromschlusses).

Zweites Gesetz von Faraday. Durch die gleiche Elektrizitätsmenge werden von verschiedenen Stoffen Mengen abgeschieden, welche im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte stehen.

Die Menge eines Körpers, die durch die Einheit der Elektrizitätsmenge abgeschieden wird, heißt sein elektrochemisches Äquivalent a . Die Konstante a z. B. für 1 mg/C erhält man, indem man das chemische Äquivalent durch $10^{-3} F = 96,5$ (Valenzladung; vgl. S. 16) dividiert. Dies ergibt für beide Gesetze den Ausdruck:

$$m = a \cdot Q = a \int I dt.$$

Die Faradayschen Gesetze werden zur Messung von Elektrizitätsmengen benutzt (siehe Voltmeter (179)). Zahlenwerte s. (79), folgende Seite.

(80) Überführungszahlen (Hittorf). Die Geschwindigkeit, mit der die Ionen unter dem Einflusse des Stromes wandern, hängt ab 1. von den spez. Beweglichkeiten u und v der Ionen und 2. von dem in der Lösung herrschenden Spannungsgefälle (V/cm), welch letzterem prop. sie wächst. Das Verhältnis der Zahl der Anionen (Kationen), d. h. der sich in der Richtung von der Kathode zur Anode (bzw. von der Anode zur Kathode) durch einen Querschnitt des Elektrolyten bewegenden Ionen zu der Gesamtzahl der ausgeschiedenen Anionen (Kationen) heißt die Überführungszahl des Anions ν (bzw. Kations $1 - \nu$). Das Verhältnis der Beweglichkeiten ist gleich dem Verhältnis der Überführungszahlen: $u/v = (1 - \nu) : \nu$.

(81) Unabhängige Wanderung der Ionen (Gesetz von Kohlrausch)¹⁾. Bei sehr großer Verdünnung ist die Summe der Ionengeschwindigkeiten gleich der Leitfähigkeit der Lösung: $\Lambda_\infty = u + v$. Für konzentriertere Lösungen, in denen die Dissoziation noch nicht vollständig ist, gilt $\Lambda_\eta = \gamma_\eta (u + v)$. Man kann hiernach

¹⁾ Wied. Ann. Bd. 6, S. 1 (1879); Bd. 26, S. 161 (1885).

aus den Beweglichkeiten gleichwertiger Ionen die Leitfähigkeit beliebiger Lösungen annähernd berechnen.

(79) Atom- und Äquivalentgewichte und elektrochemische Äquivalente.

Element	Zeichen	Atomgewicht	Valenz	Äquivalentgewicht	Elektrochem. Äquivalent	
					für 1 C. mg	für 1 Ah g
Aluminium	Al	27,1	3	9,03	0,0936	0,337
Blei	Pb	207,20	2	103,60	1,0735	3,865
Brom	Br	79,92	1	79,92	0,8282	2,982
Cadmium	Cd	112,40	2	56,20	0,5824	2,097
Chlor	Cl	35,46	1	35,46	0,3675	1,323
Eisen	Fe	55,84	2	27,94	0,2895	1,0425
„			3	18,627	0,1931	0,695
Gold	Au	197,2	3	65,7	0,681	2,452
Jod	J	126,92	1	126,92	1,3153	4,735
Kalium	K	39,10	1	39,10	0,4052	1,459
Kohlenstoff	C	12,00	4	3,001	0,0311	0,1119
Kupfer	Cu	63,57	1	63,57	0,6588	2,372
„			2	31,78	0,3294	1,186
Natrium	Na	23,00	1	23,00	0,2384	0,858
Nickel	Ni	58,68	2	29,34	0,3041	1,095
„			3	19,56	0,2027	0,730
Platin	Pt	195,2	4	48,80	0,5057	1,820
Quecksilber	Hg	200,6	1	200,6	2,0787	7,481
„			2	100,3	1,0393	3,742
Sauerstoff	O	16,000	2	8,000	0,0829	0,2985
Schwefel	S	32,07	2	16,035	0,1662	0,5981
Silber	Ag	107,88	1	107,88	1,11800	4,025
Stickstoff	N	14,008	3	4,67	0,0484	0,1742
Wasserstoff	H	1,008	1	1,008	0,01045	0,03762
Zink	Zn	65,37	2	32,685	0,3387	1,219
Zinn	Sn	118,70	2	59,35	0,614	2,214
„			4	29,67	0,307	1,107

Ionenbeweglichkeiten in wässriger Lösung bei 18° 1).

u und v in cm/s bei 1 V/cm Spannungsfälle.

Kationen				Anionen			
Ion	u	Ion	u	Ion	v	Ion	v
K	64,6	1/2 Sr	51	Cl	65,5	JO ₃	33,9
Na	43,5	1/2 Ca	51	Br	67,0	JO ₄	48
Li	33,4	1/2 Mg	45	J	66,5	C ₂ H ₃ O ₂	35,0
NH ₄	64	1/2 Zn	46	F	46,6	OH	174
Ag	54,3	1/2 Cd	46	NO ₃	61,7	1/2 SO ₄	68
H	315	1/2 Cu	46	ClO ₃	55,0	1/2 CrO ₄	72
1/2 Ba	55	1/2 Pb	61	ClO ₄	64,1	1/2 C ₂ O ₄	63

1) Nach Kohlrausch, Lehrbuch der prakt. Physik, 14. Aufl. 1923.

(82) Zersetzungsspannung (Le Blanc)¹⁾ ist die kleinste Spannung, bei welcher die Bestandteile des Elektrolyten an den Elektroden zur Abscheidung gelangen, und bei welcher der Strom mit wachsender Spannung stärker zunimmt als unterhalb derselben.

(83) Überspannung. Bei Gasentwicklung durch Strom ist auch an unangreifbaren Elektroden die Zersetzungsspannung von dem Material der Elektroden abhängig und kann die umkehrbare Spannung um mehrere Zehntel-Volt übertreffen. Nach Nernst²⁾ muß das abgeschiedene Gas, bevor es in Blasen entweichen kann, vorher bis zu einer von der Löslichkeit des Gases in dem Elektrodenmetall abhängigen Konzentration in die Elektrode hineingepreßt werden. Der Betrag dieser nicht umkehrbaren Überspannung steht in umgekehrtem Verhältnis zur Löslichkeit des Gases in der Elektrode.

Von praktischer Bedeutung ist die Überspannung z. B. beim Bleiakкумуляtor, wo sie das Eintreten schädlicher Lokalaktionen verhindert, da die Bleielektrode sich unter Wasserstoffentwicklung in Bleisulfat verwandeln müßte, wenn nicht die Überspannung der Wasserstoffentwicklung am Blei größer wäre als das Potential des Bleies gegen die Schwefelsäure. Wird die Überspannung durch Berühren der Bleielektrode mit einem Platindraht aufgehoben, so geht die Oxydation des Bleies unter lebhafter Wasserstoffentwicklung am Platin vor sich. Bei der elektrolytischen Darstellung chemischer Präparate können Reduktions- und Oxydationsvorgänge durch die Überspannung an geeignet gewählten Elektroden günstig beeinflusst werden.

(84) Polarisation. Wird ein Element (Akkumulator) oder ein Bad in der einen oder anderen Richtung von einem Strom durchflossen, so entsteht eine der stromliefernden entgegengesetzt gerichtete EMK, die sogenannte Polarisation, die durch Anwendung von Depolarisatoren beseitigt werden kann. Verursacht wird die Polarisation

1. durch Abscheidung von Stoffen, die der Lösung gegenüber ein anderes Potential haben als die Elektrode selbst,

2. durch Konzentrationsänderungen in dem Elektrolyten, die hauptsächlich infolge Auflösung der Elektroden bzw. Abscheidung an ihnen entstehen, die aber auch durch verschiedene schnelle Wanderung der Ionen bedingt werden können.

(85) Depolarisatoren sind gelöste, gasförmige oder feste Stoffe, welche die an den Elektroden auftretenden Produkte durch chemische Bindung bzw. durch Entfernung aus der Lösung elektromotorisch unwirksam machen oder welche eine Abnahme der Konzentration durch Nachlieferung verhindern und zwar in folgender Weise:

1. Oxydationsmittel verhindern den Übergang von Kationen in den elementaren Zustand. Solche sind a) O_2 , Cl_2 usw.

b) chemische Verbindungen (Superoxyde), welche leicht O_2 , Cl_2 usw. abgeben und die metallisch leiten (PbO_2 , MnO_2),

c) gelöste Salze von Metallen mit mehreren Oxydationsstufen, die unter Verringerung ihrer Valenzzahl und Abgabe positiver Ladungen oxydierende Elemente abgeben, z. B.: $2Fe^{+++} + 6Cl^- = 2Fe^{++} + 4Cl^- + Cl_2$.

2. Reduktionsmittel verhindern die Abscheidung von Anionen; solche sind

a) H_2 oder Anoden aus unedlem Metall,

b) chemische Verbindungen (Suboxyde), besonders auch organische Substanzen, welche leicht H_2 abgeben oder Anionen aufnehmen,

c) gelöste Salze von Metallen, die leicht von einer niederen Oxydationsstufe in eine höhere übergehen und dabei einen Teil des Metalls als Reduktionsmittel abgeben, z. B.: $2Sn^{++} + 4Cl^- = Sn^{++++} + 4Cl^- + Sn$.

¹⁾ Zeitschr. f. phys. Ch., 8, S. 299 (1891); 12, S. 333 (1892).

²⁾ Theoretische Chemie, VIII.—X. Aufl., 1921, S. 852.

Die Oxydations- bzw. Reduktionskraft einer Anzahl Substanzen ist in der folgenden Tabelle durch ihre Potentiale zahlenmäßig dargestellt, wobei das Potential des Wasserstoffs in normaler H -Ionenkonzentration als Nullpunkt gewählt ist.

3. In Elementen mit nur einer Lösung, welche ein Salz der einen Elektrode (Anode) enthält, muß die andere Elektrode (Kathode) von einem schwer löslichen Salze dieser letzteren umgeben sein, das für eine kleine, durch seine Löslichkeit bestimmte Konzentration an Kationen der zweiten Elektrode sorgt, die durch den Strom dauernd abgeschieden, immer wieder aus dem festen Salze ergänzt werden. Beispiele hierfür sind das Clark- und Westonelement, bei denen am Hg-Pol Merkursulfat als Depolarisator wirkt.

(86) Relative Reduktions- und Oxydationspotentiale¹⁾.

Oxydationsstufe		n	Volt	Oxydationsstufe		n	Volt
niedere	höhere			niedere	höhere		
H_2 gasf. + $2OH^-$	$2H_2O$	2	+ 0,82	$2H_2O$	O_2 gasf. + $4H^+$	4	- 1,23
$S^{=}$	S_{fest}	2	+ 0,55	Tl^+	Tl^{+++}	2	- 1,24
Cu^+	Cu^{++}	1	+ 0,18	Cr^{+++} + $4H_2O$	$HCrO_4^-$ + $7H^+$	3	- 1,3
Sn^{++}	Sn^{++++}	2	- 0,2	Mn^{++} + $2H_2O$	MnO_2 + $4H^+$	2	- 1,35
$Fe(CN)_6^{\equiv}$	$Fe(CN)_6^{\equiv}$	1	- 0,40	Cl^- + $3H_2O$	ClO_3^- + $6H^+$	6	- 1,44
Fe^{++}	Fe^{+++}	1	- 0,75	Pb^{++} + $2H_2O$	PbO_2 fest + $4H^+$	2	- 1,44
Hg_2^{++}	$2Hg^{++}$	2	- 0,92	MnO_2 fest + $2H_2O$	MnO_4^- + $4H^+$	3	- 1,63
NO + $2H_2O$	NO_3^- + $4H^+$	3	- 0,95	Pb^{++}	Pb^{+++}	2	- 1,8
$2OH^-$	H_2O_2	2	- 1,0	Co^{++}	Co^{+++}	1	- 1,8

(87) Umkehrbare Elektroden. Sollen die chemischen Umsetzungen, die in einem Elemente, einem Akkumulator oder bei einer Elektrolyse während des Stromdurchganges stattfinden, das Maximum der Arbeit leisten bzw. mit einem minimalen Aufwand an äußerer Arbeit bewerkstelligt werden, so müssen die Elektroden sogenannte umkehrbare Elektroden sein, d. h. es darf bei Umkehr der Stromrichtung durch die gleiche Elektrizitätsmenge und unter Aufwendung der gleichen Spannung nur gerade die Reaktion rückgängig gemacht werden, welche bei der anfänglichen Stromrichtung stattgefunden hat, und es dürfen außerdem keinerlei andere Umsetzungen eintreten. Man unterscheidet zwei Arten solcher Elektroden:

1. Elektroden erster Art (d. h. Elektroden, die in bezug auf das Kation umkehrbar sind): Das Elektrodenmetall taucht in eine Lösung eines seiner Salze, dessen Konzentration so groß ist, daß es die Stromleitung besorgen kann, und daß immer genug Metallionen in der Umgebung der Elektrode vorhanden sind, welche entladen und abgeschieden werden können.

2. Elektroden zweiter Art (d. h. Elektroden, die in bezug auf das Anion umkehrbar sind): Das Elektrodenmetall taucht in eine Lösung eines fremden Salzes, ist aber umgeben von einem festen schwerlöslichen Salze, das aus dem Metall der Elektrode und dem Anion des fremden Salzes zusammengesetzt ist. Bei Stromdurchgang in der einen oder anderen Richtung wird das Anion geladen oder entladen, während das Metall, ohne in Lösung zu gehen, direkt mit dem Anion reagiert.

Für jede umkehrbare Elektrode muß die Konzentration der umgebenden Lösung so gewählt werden, daß durch Lokalaktion kein anderes Kation auf der Elektrode niedergeschlagen wird, insbesondere daß keine Wasserzersetzung ein-

¹⁾ Siehe: Abhandl. d. deutsch. Bunsen-Gesellsch. Nr. 5 „Messungen elektromotorischer Kräfte galv. Ketten“ von R. Aebegg, Fr. Auerbach u. R. Luther; Halle 1911, Nr. 5 u. 1915 Nr. 8. — Die kursiven Zahlen der Tafel bedeuten unsichere Werte.

tritt, d. h. es muß der Ausdruck $\sqrt[n]{C/c}$ für die Elektrode und ihre Ionen kleiner sein als die entsprechende Größe für jedes andere in Frage kommende Ion. Die Tabelle (90) gibt hierfür einen guten Anhalt.

3. Normalelektroden sind umkehrbare Elektroden, die zur Untersuchung der Spannung einer Elektrode allein und unabhängig von dem Spannungsverluste (IR) in der Lösung dienen. Sie bestehen meist aus Hg, das von einem seiner schwerlöslichen Salze (Hg_2SO_4 in verdünnter H_2SO_4 , $HgCl$ in verdünnter KCl -Lösung) überschlachtet ist. Zum gleichen Zweck werden die Wasserstoffelektrode (Platin in verdünnter Säurelösung) und für technische Zwecke Zn in $ZnSO_4$ -Lösung von passender Konzentration gebraucht.

(88) Berechnung elektromotorischer Kräfte I. Thermodynamische Theorie. Die Arbeit, welche beim Stromdurchgange durch einen Elektrolyten gewonnen oder aufgewendet wird, beträgt für 1 Grammäquivalent $E \cdot F$ Wattsekunden (Spannung \times Elektrizitätsmenge/Äquivalent). Ganz allgemein gilt nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik (Gibbs, v. Helmholtz): $E = W/23063 + T \cdot dE/dT$, worin E die EMK, W die Wärmetönung des stromliefernden Vorganges, T die absolute Temperatur bedeuten. Der Faktor $23063 = 0,239 \cdot 96500$ ist das Produkt aus Wärmeäquivalent der elektrischen Energie mal F . Wenn die Peltierwärme $T \cdot dE/dT$ gleich 0 wird, so wird die EMK allein durch die Wärmetönung bestimmt. Ist andererseits die Wärmetönung verschwindend klein (wie bei Konzentrationsketten), so hat man $E = T \cdot dE/dT$, d. h. die EMK ändert sich proportional der absoluten Temperatur.

(89) Berechnung elektromotorischer Kräfte II. Osmotische Theorie (Nernst)¹⁾. Unter Zugrundelegung der Gasgesetze für verdünnte Lösungen (van't Hoff) gilt für die Potentialdifferenz eines Metalls gegen die Lösung eines seiner Salze: $E = (RT/nF) \times \ln C/c$ Volt, wo R die Gaskonstante ($= 8,316 W \times s$), n die chemische Wertigkeit, C die Lösungstension des Metalls und c die Konzentration seiner Ionen in Grammäquivalent/Liter bedeuten (oder: $E = 1,983 \cdot 10^{-4} T/n \times \log C/c$; für 18° : $E = 0,0577/n \times \log C/c$). Für Metalloide und Anionen gilt die Formel mit negativem Vorzeichen.

Zwischen zwei verschiedenen konzentrierten Lösungen ($c_1 > c_2$) desselben Salzes besteht die Potentialdifferenz (Nernst): $E = + (u - v)/(u + v) \times RT/nF \times \log c_1/c_2$, wo u und v die Beweglichkeiten des Kations bzw. des Anions bedeuten. Für eine Konzentrationskette mit zwei Elektroden gleichen Metalls (M) in verschiedenen konzentrierten Lösungen des gleichen Salzes (MS) nach dem Schema $M | MS \text{ verd.} | MS \text{ konz.} | M$ gilt:

$$E = RT/nF \times \left[\ln C/c_1 + \frac{u-v}{u+v} \ln c_1/c_2 - \ln C/c_2 \right] = -RT/nF \times \frac{2v}{u+v} \ln \frac{c_1}{c_2}$$

Der Sinn der EMK ist so gerichtet, daß der von ihr hervorgebrachte Strom die bestehenden Konzentrationsunterschiede auszugleichen strebt.

Bei einem galvanischen Element, das aus zwei verschiedenen Metallen mit den Tensionen C und C' und den Wertigkeiten n und n' besteht, die umgeben sind von Lösungen ihrer Salze mit den Konzentrationen c und c' , gilt unter Vernachlässigung der geringfügigen Potentialdifferenz an der Berührungsstelle der beiden Lösungen der einfache Ausdruck:

$$E = RT/F \times (1/n \ln C/c - 1/n' \ln C'/c') = 1,98 \cdot 10^{-4} T (1/n \log C/c - 1/n' \log C'/c')$$

Diese Formeln gelten zur Berechnung sowohl elektromotorischer Kräfte von Elementen als der bei der Elektrolyse auftretenden Polarisationen (Zersetzungsspannungen). Die folgende Tabelle enthält für eine Reihe positiver und negativer chemischer Elemente die Elektrodenpotentiale (P) bzw. Zersetzungsspannungen

¹⁾ Zeitschr. f. phys. Ch. 2, S. 613; 4, S. 129, (1889). — Wied. Ann., Bd. 40, S. 561, (1890).

in äquivalentnormalen Lösungen ihrer Ionen entsprechend der Formel $P = 1,98 \cdot 10^{-4} T/n \times \log C/c$ für $c = 1$, wobei das Potential der Wasserstoffelektrode gleich 0 gesetzt ist. Für andere (c') als normale Konzentrationen ist $-0,058/n \times \log c'$ hinzuzufügen.

(90) Elektrodenpotentiale P und Zersetzungsspannungen¹⁾ in äquivalentnormalen Lösungen der Ionen bei 18°.

Ion	P Volt	Ion	P Volt	Ion	P Volt
K	+ 2,92	Tl	+ 0,33	Ag	- 0,80
Na	+ 2,71	Co	+ 0,29	Hg	- 0,86
Mg	+ 1,55	Ni	+ 0,22	O ₂	- 0,41
Mn	+ 1,0	Pb	+ 0,12	J	- 0,54
Zn	+ 0,76	Sn	+ 0,10	Br ₂	- 1,08
Fe	+ 0,43	H ₂	± 0,00	Cl ₂	- 1,36
Cd	+ 0,40	Cu	- 0,34	F ₂	- 1,9

Literatur: W. Nernst, Theoretische Chemie, VIII.—X. Auflage, 1921. — S. Arrhenius, Lehrbuch der Elektrochemie, 1901. — Le Blanc, Lehrbuch der Elektrochemie, 1911. — F. Förster, Elektrochemie wässriger Lösungen, 2. Aufl. 1915. — Ferner: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 21 u. 23. — W. Hittorf, Über die Wanderung der Ionen während der Elektrolyse; Nr. 86 u. 87. — M. Faraday, Experimental-untersuchungen über Elektrizität, III. bis VIII. Reihe, Elektrolyse, Nr. 124. — H. v. Helmholtz, Abhandlungen zur Thermodynamik, Nr. 160. — S. Arrhenius, Untersuchungen über die galvanische Leitfähigkeit der Elektrolyte Nr. 160.

c) Isolierstoffe.

(91) Flüssigkeiten. Die Leitfähigkeit flüssiger Isolierstoffe ist eine im wesentlichen elektrolytische, herrührend von Verunreinigungen, die in großer Verdünnung in ihnen gelöst sind. Beim Stromdurchgang werden diese mehr und mehr auf den Elektroden niedergeschlagen, wodurch sich der Widerstand erhöht. Diese „elektrische Reinigung“ ist zuerst von H. Hertz am Benzin beobachtet worden (Ann. d. Phys. (3) Bd. 20, 1883, S. 283). Die Stromleitung in flüssigen Isolierstoffen ist von E. Warburg systematisch untersucht worden (Ann. d. Phys. (3) Bd. 54, 1895, S. 396).

Nach diesen Versuchen ändert sich die Verteilung der Ionen in der Flüssigkeit während des Stromdurchgangs, bis sich, bei konstant gehaltener Spannung an den Elektroden, endlich ein stationärer Zustand einstellt. In der Regel ist hierbei die Leitfähigkeit erheblich geringer als zu Anfang des Versuches. Ist die Spannung an den Elektroden nicht konstant, sondern sinusförmig veränderlich, so kann die Ionenverteilung den Spannungsänderungen um so weniger folgen, je höher die Frequenz ist. Die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen ist so gering, daß bereits bei den niedrigsten technisch verwendeten Frequenzen (16 in der Sekunde) der Wechselstrom keine nennenswerte Änderung der Ionenverteilung mehr hervorruft. Dies bedeutet, daß die Leitfähigkeit der flüssigen Isolierstoffe für die Wechselströme der Technik gleich dem Anfangswert der Leitfähigkeit für Gleichstrom zu setzen und jedenfalls von der Frequenz unabhängig ist. Diese Folgerung ist durch die Versuche von L. Pungs²⁾, G. L. Addenbrooke³⁾ und F. Tank⁴⁾ bestätigt worden. Insbesondere hat L. Pungs nachgewiesen, daß der Energieverbrauch in flüssigen Isolierstoffen in dem Frequenzgebiet $f = 15$ bis 75 unabhängig von der Frequenz ist (vgl. 50, b) während Addenbrooke gezeigt hat, daß die höhere Leitfähigkeit für raschen

¹⁾ Siehe: Abhandl. d. deutsch. Bunsen-Ges. I. c.

²⁾ L. Pungs, Archiv für Elekt. Bd. 1, S. 329, 1912.

³⁾ G. L. Addenbrooke, Proc. of the Phys. Soc. of London, Bd. 27, S. 291, 1915.

⁴⁾ F. Tank, Ann. d. Phys. (4) Bd. 48, S. 307, 1915.

Wechselstrom stetig in den niedrigeren Gleichstromwert übergeht., wenn man zu sehr niedrigen Frequenzen hinabsteigt.

Nach der oben vorgetragenen Ansicht über die Natur der Leitfähigkeit flüssiger Isolierstoffe muß sich die Leitfähigkeit durch sorgfältige Reinigung des Isolierstoffes weitgehend herabsetzen lassen. Es fragt sich, ob es auf diesem Wege möglich ist, die Isolationsfähigkeit eines flüssigen Isolierstoffes beliebig emporzutreiben. Bei vielen Stoffen gelingt die Reinigung nur bis zu einem gewissen Grade; die übrig bleibende Leitfähigkeit besitzt immer noch Kennzeichen ihrer elektrolytischen Natur. Dagegen ist es G. Jaffé¹⁾ gelungen, einige an sich sehr schlecht leitende Flüssigkeiten (Hexan, Heptan, Petroläther) durch vielfach wiederholtes sehr sorgfältiges Destillieren von den elektrolytisch leitenden Verunreinigungen so gut wie vollständig zu befreien. Die so behandelten Flüssigkeiten wiesen noch einen Rest von Leitfähigkeit auf, die sich in jeder Weise so verhielt, wie die Leitfähigkeit eines dichten Gases. Sie kann beschrieben werden durch die Annahme, daß die Flüssigkeit durch irgendeine Strahlungsquelle in geringem Maße ionisiert wird. Durch die Strahlung wird in der Zeiteinheit eine gewisse Zahl von Molekülen in Ionen zerspalten. Die Zahl der in 1 cm^3 und in 1 Sekunde erzeugten Ionen werde mit n bezeichnet; n ist als Maß für die auf der Strahlung beruhende Leitfähigkeit des Stoffes anzusehen. Bei kleinen Feldstärken befolgt die Stromleitung das Ohmsche Gesetz. Bei größeren Feldstärken nähert sich der Strom einem Sättigungswert, der gleich ne ist, wo e die Ladung des Ion (die Elementarladung) bedeutet ($e = 1,8 \cdot 10^{-19}$ Coulomb). Sättigung tritt ein, sobald die Zahl der durch das elektrische Feld auf den Elektroden niedergeschlagenen Ionen gleich der Zahl der Ionen ist, welche die Strahlung in der Flüssigkeit neu erzeugt. Bei weiterer Steigerung des Feldes kann der Strom nicht mehr anwachsen. Im Gegensatz zu den früher betrachteten Fällen ist die Leitfähigkeit hier von der Temperatur unabhängig.

Bei den Versuchen von Jaffé waren die Ströme bereits bei einer Feldstärke von 200 V/cm (entsprechend einer Spannung von 400 V zwischen den Elektroden) gesättigt. Heptan und Petroläther ergaben nahezu denselben Grenzwert der Leitfähigkeit wie gereinigtes Hexan.

Die die Ionisation hervorrufende Strahlung ist teils äußere, teils rührt sie von der Apparatur (insbesondere von den Gefäßwänden) her. Die Wandstrahlung hängt ab vom Material der Wand. Die äußere Strahlung läßt sich dadurch verringern, daß man das Meßgefäß mit einem starken Bleimantel umgibt.

Die von der natürlichen Strahlung durch Ionisierung hervorgebrachte Leitfähigkeit ist immer sehr gering. Man muß schon, wie es Jaffé getan hat, sehr schlecht leitende Stoffe verwenden und diese noch besonders reinigen, wenn man die Strahlungsleitfähigkeit rein beobachten will. Unter gewöhnlichen Verhältnissen überwiegt die von anderen Ursachen herrührende Leitfähigkeit bei weitem; aber bei einigen schlecht leitenden Stoffen kommt die Strahlungsleitfähigkeit neben anderen Arten der Leitfähigkeit in Betracht, so daß die beobachtete Gesamtleitfähigkeit ein verwickeltes Verhalten zeigt. An derartigen Stoffen kann man die Strahlungsleitfähigkeit dadurch hervortreten lassen, daß man eine stärkere künstliche Bestrahlung hinzufügt.

(92) Feste Körper. Durchgangswiderstand. Man scheidet die festen Isolierstoffe in zwei wesentlich verschiedene Klassen, nämlich:

1. Körper, deren Leitfähigkeit im Stoff selbst liegt;
2. Körper, die ihre Leitfähigkeit in der Hauptsache aufgesogener Feuchtigkeit verdanken.

Zur ersten Klasse gehören Gummi, Guttapercha, Hartgummi, Porzellan, trockener Glimmer u. dgl. In die zweite Klasse sind alle Faserstoffe zu rechnen, insbesondere Papier, Baumwolle und ähnliches. Bei jenen ist der „Isolationswiderstand“ (das Verhältnis der angelegten Spannung zum hindurchfließenden Strom)

¹⁾ G. Jaffé, Ann. d. Phys. (4) Bd. 28, S. 326, 1909.

unter sonst gleichen Umständen von der Spannung unabhängig; dagegen nimmt er im Laufe der Zeit nach dem Anlegen der Spannung zu, weil sich über den eigentlichen, von der Zeit unabhängigen Leitungsstrom der Nachwirkungsstrom überlagert, der allmählich abnimmt (vgl. K. W. Wagner, Arch. f. Elektrot., Bd. 3, S. 67, 1914).

Bei den feuchtigkeitshaltigen Isolierstoffen mit Faserstruktur hängt der Isolationswiderstand nicht nur von der Menge der aufgenommenen Feuchtigkeit ab, sondern auch von ihrer Verteilung in den kapillaren Räumen in und zwischen den Fasern. Die Verteilung der Feuchtigkeit ändert sich unter der Einwirkung des elektrischen Feldes; es wird mehr Flüssigkeit in die Kapillaren hineingesogen, da die Oberflächenspannung abnimmt. Daher nimmt der Isolationswiderstand mit zunehmender Spannung E ab, und zwar angenähert nach der Formel

$$R = \frac{\text{konst}}{\sqrt{E}}$$

Da ferner die Verteilung der Feuchtigkeit in den Kapillaren den Feldänderungen nicht sogleich folgen kann, beobachtet man hier auch eine zeitliche Nachwirkung. (S. Evershed, Journ. of the Inst. of El. Eng., London, Bd. 52, S. 51, 1913; ETZ 1914, S. 887.)

Die Höhe des Isolationswiderstandes hängt unter sonst gleichen Umständen von geringen Unterschieden in der Beschaffenheit und Zusammensetzung des Stoffes stark ab, so daß die Werte für verschiedene Proben desselben Stoffes oft im Verhältnis 1 : 10 bis 100 schwanken. Die folgenden Zahlen sind Mittelwerte von einer größeren Zahl von Proben nach Messungen von H. L. Curtis (Bull. of the Bur. of Standards, Washington 1915, Bd. 11, S. 359; ETZ 1916, S. 469).

Stoff	ρ in Ohm-cm bei 20°	Stoff	ρ in Ohm-cm bei 20°	Stoff	ρ in Ohm-cm bei 20°
Ambroid	$5 \cdot 10^{16}$	Italien. Marmor . .	$1 \cdot 10^{11}$	Porzellan, unglasiert	$3 \cdot 10^{14}$
Bienenwachs, gelb	$20 \cdot 10^{14}$	Glimmer:		Quarz, geschmolzen	über $5 \cdot 10^{18}$
" , weiß	$6 \cdot 10^{14}$	schwarzgefleckter		Kolophonium . . .	$5 \cdot 10^{16}$
Zelluloid, weiß . .	$2 \cdot 10^{10}$	afrikanischer . . .	$0,04 \cdot 10^{15}$	Siegellack	$8 \cdot 10^{15}$
Ceresin	über $5 \cdot 10^{18}$	hellbrauner afrik.	$2 \cdot 10^{15}$	Schellack	$1 \cdot 10^{16}$
Hartfaser	$20 \cdot 10^9$	farbloser afrik. .	$200 \cdot 10^{15}$	Schiefer	$1 \cdot 10^9$
Roter Faser	$5 \cdot 10^9$	rubinroter indischer,		Schwefel	$1 \cdot 10^{17}$
Deutsches Glas . .	$5 \cdot 10^{13}$	stark gefleckt	$0,05 \cdot 10^{16}$	Tetrachlornaphthalin	$5 \cdot 10^{13}$
Kavaliertglas . . .	$800 \cdot 10^{13}$	desgl., leicht gefleckt	$50 \cdot 10^{15}$	Holz, paraffiniertes:	
Opalglas	$0,1 \cdot 10^{13}$	Mikanit	$1 \cdot 10^{15}$	Mahagoni	$4000 \cdot 10^{10}$
Plattenglas	$2 \cdot 10^{13}$	Paraffin, rein . . .	über $500 \cdot 10^{16}$	Ahorn	$3 \cdot 10^{10}$
Glyptol ¹⁾	$1 \cdot 10^{16}$	" , technisch	$1 \cdot 10^{16}$	Pappel	$50 \cdot 10^{10}$
Hartgummi	$1 \cdot 10^{18}$				
Elfenbein	$2 \cdot 10^8$				

Werte der Leitfähigkeit von Gesteinen findet man bei H. Löwy, Ann. d. Phys. (4), Bd. 36, S. 125, 1911.

Nach Untersuchungen von Hodgson (Phil. Mag. (6), Bd. 18, S. 252, 1909) wird die Leitfähigkeit von guten Isolatoren durch radioaktive Strahlung stark erhöht. Dünne Platten aus festem Paraffin und Hartgummi, die mit Staniolbelägen versehen waren, wurden mit einem Radiumpräparat, das 5 mg reines Radiumbromid enthielt, aus einigen cm Abstand bestrahlt. Während vor der Bestrahlung kein meßbarer Strom durch den Isolierstoff floß, ergaben sich während der Bestrahlung die Werte für Paraffin $2,2 \cdot 10^{-13}$ A bei der Feldstärke 260 V/cm, für Hartgummi $1,5 \cdot 10^{-13}$ A bei der Feldstärke 520 V/cm.

Die durch diese kräftige Bestrahlung hervorgerufene Leitfähigkeit bildet sich während weniger Minuten aus. Nach beendeter Bestrahlung verschwindet sie

¹⁾ Künstl. Harz, hergestellt von der General Electric Co.

wieder nach und nach, und zwar die Hälfte davon innerhalb einer Stunde, während der Rest sehr viel langsamer verklingt.

(93) Temperatureinfluß. Die Isolationswiderstände nehmen mit steigender Temperatur stark ab, und zwar angenähert nach dem Gesetze

$$R_t = R_0 e^{-\beta t}$$

β zwischen 0,04 und 0,13; t in Celsiusgraden.

Für einige Isolierstoffe sind die Zahlen zur angenäherten Umrechnung des Isolationswiderstandes auf andere Temperaturen den folgenden Tafeln zu entnehmen.

Umrechnung von Isolationswiderständen.

Ist R_t der Widerstand bei der Temperatur t , so ist er bei 15° C:

$$R_{15} = c \cdot R_t$$

Guttapercha.

t	c	t	c	t	c	t	c
-4	0,081	4	0,233	12	0,672	20	1,94
-2	0,105	6	0,304	14	0,876	22	2,52
0	0,137	8	0,396	16	1,14	24	3,24
+2	0,179	10	0,516	18	1,44	26	4,29

Gummi, Papier, Faserstoff, Paraffin usw.

Die Umrechnungszahlen sind für anscheinend gleiche Stoffe sehr verschieden. Tritt die Notwendigkeit einer Umrechnung ein, so empfiehlt es sich, die liefernde Fabrik zu fragen. Zu Schätzungen können folgende Zahlen dienen:

	$t=0$	5	10	20	25
Gummi, Okonit, getrocknetes Papier	$c=0,4$	0,6	0,75,	1,4	2,0
Getränkter Faserstoff und Papier . .	0,4	0,5	0,6	2,5	7
Paraffin	0,2	0,3	0,5	2,2	4,5

(94) Oberflächenwiderstand. Neben der Stromleitung durch den Isolierstoff hindurch hat die Stromleitung über die Oberfläche hinweg praktische Bedeutung. An der Oberfläche bildet sich nämlich durch chemische Zersetzung unter dem Einfluß des Sauerstoffs und des Wasserdampfes der Luft eine besser leitende Haut; auch Staubteilchen und Schmutz können an ihrer Bildung beteiligt sein. Die Dicke dieser Haut beträgt etwa 10^{-6} bis 10^{-4} mm. Dadurch können zwischen den spannungführenden Elektroden leitende Brücken entstehen, die den sogenannten Kriechweg bilden. Man sucht diesen nach Möglichkeit durch geeignete Formgebung (Rillen) zu vergrößern.

Hartgummi erhält unter dem Einfluß des Lichtes eine verhältnismäßig gut leitende Haut (Bildung von Schwefelsäure). Durch Abspülen in verdünnter Ammoniaklösung und nachfolgendes gründliches Wässern läßt sich diese wieder beseitigen.

Über die Messung des Oberflächenwiderstandes vgl. (194; B 1).

Bei einer Änderung der Luftfeuchtigkeit von 25 auf 90% ändert sich der Oberflächenwiderstand der meisten Isolierstoffe um viele Zehnerpotenzen; die Luftfeuchtigkeit muß daher in jedem Falle mit angegeben werden. Bemerkenswert ist, daß diejenigen Stoffe, auf denen sich keine zusammenhängende Wasserhaut bilden kann, einen sehr hohen und von der Luftfeuchtigkeit nahezu unabhängigen Oberflächenwiderstand haben; z. B. Ceresin, Paraffin, Bienenwachs, Tetrachlornaphthalin, Siegellack und Kolophonium; nicht ganz so gut sind Schwefel, Bernstein und Zelluloid.

(95) Isolierwiderstand für Wechselstrom. Wegen des dielektrischen Energieverlustes (50) ist der mit Wechselstrom bestimmte Isolationswiderstand viel kleiner als der mit Gleichstrom gemessene. Bedeutet δ den in (50) definierten Winkel, f die Frequenz und C die Kapazität, so ist der zugehörige Isolationswiderstand

$$R = \frac{1}{2\pi f C \operatorname{tg} \delta}$$

Da sich δ mit der Frequenz wenig ändert, so nimmt R mit zunehmender Frequenz ab. Auch der Oberflächenwiderstand (94) ist bei Wechselstrom wesentlich kleiner als bei Gleichstrom, da für den Wechselstrom auch Wege gangbar sind, auf denen die Wasserhaut sich nicht völlig zu einer leitenden Brücke schließt.

d) Gase.

(96) Allgemeines. Selbständige und unselbständige Strömung. Den Strom in Gasen denkt man sich ähnlich wie in Elektrolyten durch Elementarladungen übertragen. Diese bewegen sich entweder für sich als freie Elektronen oder an Atome oder Atomgruppen gebunden als Ionen unter der Wirkung des elektrischen Feldes von einer Elektrode zur anderen. Näheres darüber besonders bei J. S t a r k , Die Elektrizität in Gasen. Leipzig 1902; J. J. T h o m s o n , Elektrizitätsdurchgang in Gasen, 1903; deutsch von E. M a r x . Leipzig 1906; Conduction of electricity through gases, 2d edition, Cambridge 1906; ferner nach dem neuesten Stande in dem G r a e t z s c h e n Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Bd. 3, 1919 und in dem mehrbändigen M a r x s c h e n Handbuch der Radiologie.

Unter gewöhnlichen Verhältnissen ist die Zahl der freien Ladungen in einem Gase sehr gering; infolgedessen kommt unter der Wirkung eines schwachen elektrischen Feldes nur ein sehr geringer Strom zustande. Mit anderen Worten: das Gas verhält sich wie ein guter Isolator. Eine Erhöhung des Stromes kann nur durch eine Steigerung der freien Ladungen hervorgerufen werden. Sie ist auf zwei grundsätzlich verschiedenen Wegen möglich:

a) Es werden neutrale Gasmoleküle durch fremde Einflüsse (Röntgenstrahlen, Radiumstrahlen u. dgl.) in je ein positiv und ein negativ geladenes Teilchen (Ion) gespalten oder es werden aus irgend einer Quelle elektrisch geladene Teilchen (Elektronen) in den Gasraum hineingeliefert, z. B. aus einem glühenden Metalldraht oder aus einer mit ultra-violettem Licht bestrahlten Metalloberfläche. Eine in dieser Weise hervorbrachte elektrische Strömung heißt eine „u n s e l b s t ä n d i g e“, weil sie nur so lange fortbesteht, als der ionenerzeugende oder ionenliefernde äußere Einfluß tätig ist.

b) Wenn die Stärke des elektrischen Feldes eine gewisse Größe übersteigt, so erlangen die vorhandenen Ionen in ihm eine so hohe Geschwindigkeit, daß sie befähigt werden, beim Aufprall auf neutrale Gasmoleküle diese in positive und negative Ionen zu spalten (Ionisierung durch Stoß; vgl. J. S. T o w n s e n d , Theory of ionization of gases by collision, 1910).

Der Strom wächst alsdann rasch, unter Umständen lawinenartig an. Diese Art der Strömung in Gasen nennt man eine „s e l b s t ä n d i g e“, weil sie ohne das Hinzutun äußerer Einflüsse fortbesteht. Je nach der Gasart, dem Gasdruck, der Temperatur, der Elektrodenform und den übrigen äußeren Bedingungen nimmt die selbständige Entladung sehr verschiedene Formen an; die wichtigsten sind die G l i m m e n t l a d u n g und der L i c h t b o g e n (Funken).

(97) Elektronenröhre. Eine wichtige technische Anwendung einer unselbständigen Strömung ist die hochevakuierte (gasfreie) Elektronenröhre mit Glühdraht. Dieser speit Elektronen in den Raum, der den Glühdraht umgibt. Befindet sich in der Röhre eine zweite Elektrode und legt man an diese den Pluspol einer Stromquelle, ihren Minuspol an den Glühdraht, so wandern die Elektronen nach jener Elektrode (der Anode), d. h. es fließt in der Röhre ein positiver Strom von der Anode zum Glühdraht. In der umgekehrten Richtung kann

kein Strom durch die Röhre fließen, sie wirkt somit bei Wechselstrom als Gleichrichter (Fleming, Dushman).

Durch die Anwendung der kinetischen Gastheorie auf Bewegung und Gleichgewicht der Elektronen an der Metalloberfläche hat Richardson (Phil. Trans. Bd. 201, S. 516, 1903) die folgende Beziehung zwischen der absoluten Temperatur T des Glühdrahtes und dem von 1 cm^2 seiner Oberfläche ausgehenden Elektronenstrom i abgeleitet

$$i = a \sqrt{T} e^{-\frac{b}{T}}$$

a und b sind Konstanten, die der folgenden Tabelle zu entnehmen sind. i ergibt sich in mA/cm^2 .

Stoff	a	b
Wolfram	$2,4 \cdot 10^{10}$	52500
Molybdän	$2,1 \cdot 10^{10}$	50000
Tantal	$1,1 \cdot 10^{10}$	50000
Thor	$20 \cdot 10^{10}$	38000
Oxydkathode	8 bis $24 \cdot 10^7$	19 bis $24 \cdot 10^3$

Diesen Strom i (den Sättigungsstrom) erhält man aber nur bei genügend hoher Spannung zwischen Glühdraht und Anode. Die von dem Glühdraht ausgespienen Elektronen laden nämlich die Umgebung des Drahtes negativ und erzeugen ein Gegenfeld, das den Austritt weiterer Elektronen verhindert. Diese von Langmuir und Schottky entdeckte Raumladung bewirkt, daß der Elektronenstrom bei kleineren Spannungen dem Gesetz

$$i = 14,65 \cdot 10^{-6} \frac{l}{r} \sqrt{E^3}$$

folgt, wobei E die angelegte Spannung, l die Länge, r der Radius einer den Glühdraht koaxial umgebenden zylindrischen Anode ist. Für andere Elektrodenformen gilt $i = k \sqrt{E^3}$, wobei k eine Konstante ist. Bei hoher Spannung zwischen Anode und Kathode erlangen die Elektronen große Geschwindigkeit und erzeugen beim Aufprallen auf die Gegenelektrode Röntgenstrahlen (Röntgenröhren nach Coolidge und Lilienfeld). Vgl. Marx, Handbuch der Radiologie Bd. V.

(98) Röhren mit 3 Elektroden. Bringt man in den Weg der Elektronen eine gitterartige dritte Elektrode, so kann man durch eine zwischen diese und den Glühdraht angelegte Spannung den Elektronenstrom beeinflussen. Hiervon macht man Gebrauch zur Verstärkung schwacher Ströme (Verstärkeröhre, von Lieben, Reisz, de Forest, Schottky, Rukop). Bei hoher Gitterspannung erlangen die Elektronen große Geschwindigkeit und lösen auf der Anode sekundäre Elektronen aus, deren Zahl in einem gewissen Bereich der Anodenspannung die Zahl der primären Elektronen übersteigt. Der Stromzweig Glühdraht-Anode wirkt dann wie ein negativer Widerstand (Dynatron von Hull).

Statt durch ein Gitter kann man die Bewegung der Elektronen auch mittels eines Magnetfeldes steuern (Magnetron von Hull).

Schaltet man in den Anodenkreis einer Röhre mit Hilfsgitter einen Schwingungskreis und läßt die in ihm entstehende Schwingung auf den Gitterkreis zurückwirken, so gewinnt man einen sich selbst erregenden Schwingungserzeuger (Schwingungsröhre, A. Meißner). Da der Elektronenstrom den Schwankungen der Gitterspannung praktisch trägheitslos folgt, kann man auf diesem Wege außerordentlich schnelle kontinuierliche Schwingungen erzeugen (bis 10^8 Per/s und mehr). Durch die Einführung der Schwingungsröhre hat die Hochfrequenztechnik eine vollständige Umwälzung erfahren.

In geeigneter Schaltung wirkt die Röhre mit Hilfsgitter zugleich als Gleichrichter und Verstärker und kann als Wellenempfänger (Detektor) benutzt werden (Audionschaltung nach de Forest).

Literatur: H. Barkhausen, Elektronenröhren. Leipzig 1923. — Moeller, Die Elektronenröhren und ihre technischen Anwendungen. 2. Aufl., 1922. — W. Schottky, Über Hochvakuumverstärker, Arch. f. Elektr. Bd. 8, S. 1, 299. — H. Rukop, Die Hochvakuum-Eingitterröhre, Jahrb. d. drahtl. Tel. Bd. 14, S. 110. — A. Meissner, Über Röhrensender, ETZ 1919, Heft 7 und 8. — H. D. Arnold, Röhren mit Oxydkathoden Phys. Review Bd. 16, S. 70, 1920. — Hull, Jahrb. f. drahtl. Tel. u. Tel. Bd. 14, S. 47 u. 157, 1919 (Dynatron); Journ. Am. Inst. of El. Eng. Bd. 40, S. 715, 1920 (Magnetron).

(99) Die Glimmentladung (Sprühen, Korona). Sie tritt in Luft von gewöhnlichem Druck immer dann auf, wenn das elektrische Feld sehr ungleichförmig ist und an gewissen Stellen große Werte erreicht, also namentlich an scharfen Kanten und Spitzen von Leitern und an dünnen Drähten. Die Feldstärke, bei der das Glimmen von Hochspannungsleitungen beginnt, ergibt sich nach Untersuchungen von Ryan, Watson, Whitehead, Peek, Petersen u. a. zu

$$\mathcal{E}_0 = 29,7 \left(1 + \frac{0,47}{\sqrt{d}} \right)$$

d = Drahtdurchmesser in cm. \mathcal{E}_0 ist die Feldstärke (bei Wechselstrom der Höchstwert der Feldstärke) an der Drahtoberfläche in kV/cm. Die zugehörige Betriebsspannung (bei Wechselstrom die effektive Betriebsspannung zwischen den Leitern), die sogenannte Anfangsspannung ist

$$E_0 = A \mathcal{E}_0 d \ln \frac{2a}{d}$$

- $A = 1$ für Gleichstrom,
 $= 0,707$ für sinusförmigen Wechselstrom,
 $= 0,611$ für sinusförmigen Dreiphasenstrom,
 a = Abstand der Drähte in cm.

Die vorstehende Formel gilt für saubere Drähte mit glatter Oberfläche. Durch kleine Unregelmäßigkeiten der Oberfläche, Kratzer, Beulen, Häkchen, ferner auch durch Nässe, Regen, Nebel, Schnee und Eisbildung wird die Anfangsspannung herabgesetzt. Auch bei Drahtseilen und Litzen ist die Anfangsspannung niedriger als beim massiven Draht. Man kann diese Einflüsse zum Teil durch Hinzufügung eines „Unregelmäßigkeitsfaktors“ m_0 auf der rechten Seite der vorstehenden Formel berücksichtigen, wobei für polierte Drähte $m_0 = 1$, für gewöhnliche Drähte $m_0 = 0,98$ bis $0,95$, für siebendrätige Seile $m_0 = 0,87$ bis $0,83$ zu setzen ist.

(100) Glimmverluste. Durch das Glimmen der Leitungen entstehen Energieverluste, die beim Einsetzen des Glimmens gering sind, aber mit zunehmender Spannung rasch anwachsen. Peek gibt die folgende Formel zur Berechnung der Glimmverluste an Leitungen für hochgespannten Wechsel- oder Drehstrom:

$$N = 344 \frac{1}{\delta} f \sqrt{\frac{d}{2a}} \left[\frac{E - \delta E_0}{2} \right]^2 10^{-5}$$

N in kW für 1 km einfacher Leitungslänge. E ist die effektive Spannung zwischen den Leitern in kV; bei Drehstrom ist für $(E - \delta E_0)/2$ zu setzen $(E - \delta E_0)/\sqrt{3}$. f ist die Frequenz, d der Drahtdurchmesser in cm, a der Drahtabstand in cm,

$\delta = \frac{3,92 b}{273 + t}$, worin b der Barometerstand in cm, t die Temperatur ist.

Nach Versuchen von Weidig und Jaensch (ETZ 1913, S. 637) hat die Form der Spannungskurve, vor allem in der Nähe des Scheitelwertes, großen Einfluß auf die Höhe der Verluste. Ferner ergab sich, daß die Verluste zwar linear, aber nicht proportional mit der Frequenz wachsen. Die gemessenen Verluste weichen namentlich bei Spannungen, die wenig über der Anfangsspannung liegen,

wesentlich von den nach der P e e k schen Formel berechneten ab. Diese Formel erlaubt daher nur eine rohe Vorausberechnung der Glimmverluste.

(101) Die Glimmentladung in verdünnten Gasen. In verdünnten Gasen von nicht allzu niedrigem Druck geht der Strom gewöhnlich in Form der Glimmentladung über. Dabei gerät das Gas in ein mildes Leuchten, dessen Farbe von der Gasart abhängt. Diese Erscheinung wird beim Moorelicht und in der Glimmlampe von P i n t s c h (mit Neonfüllung) technisch angewandt. Unter geeigneten Bedingungen bedeckt sich die Kathode mit einer Lichthaut, deren Ausdehnung der Stromstärke proportional ist. Hiervon wird beim Glimmlicht-Oszillograph nach G e h r c k e Gebrauch gemacht.

Eine Glimmlichtöhre vermag unter bestimmten Bedingungen in einem ihr parallel geschalteten Schwingungskreise dauernde elektrische Schwingungen zu erregen (G e h r c k e, Reichenheim u. Wertheimer, DRP. 270610, 273534 u. 295761. Literatur über die Glimmentladung in den Artikeln von G e h r c k e und Seeliger in Marx' Handbuch der Radiologie, Bd. 3.)

(102) Der Lichtbogen. Tritt in der Gasstrecke auf dem ganzen Weg zwischen den Elektroden eine so starke Ionisierung auf, daß die Kathode durch den Aufprall der positiven Ionen bis zur Weißglut erhitzt wird, so nimmt die Entladung die Form des Lichtbogens oder Funkens an. In Luft von gewöhnlichem Druck geschieht das, wenn das Feld zwischen den Elektroden einigermaßen gleichförmig ist, und wenn der innere Widerstand der Stromquelle nicht allzu hoch ist, sogleich beim Einsetzen der Ionisierung durch Stoß, indem sich die Ionenlawine über die ganze Entladungsstrecke ausbreitet; die Anfangsspannung ist alsdann identisch mit der Funkenspannung (Überschlagspannung). Auch die Glimmentladung geht bei hinreichender Spannungssteigerung in den Lichtbogen über.

Für den Lichtbogen versagt ebenso wie für die übrigen Formen der Strömung in Gasen das Ohmsche Gesetz vollständig.

Man ist darauf angewiesen, die Strom-Spannungs-Charakteristik $[U = f(I)]$ für die betreffende Entladungsform experimentell festzustellen. Die Charakteristik des Gleichstromlichtbogens ist nach A y r t o n („The electric arc“) von der Form:

$$U = a + \frac{b}{I}$$

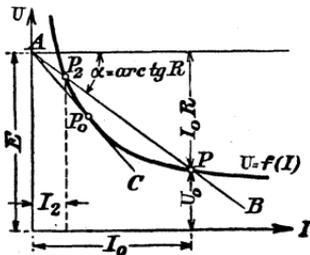


Abb. 27. Fallende Charakteristik des Lichtbogens.

Den Strom I_0 , den ein Lichtbogen mit einem Vorschaltwiderstande R einer Spannungsquelle E entnimmt, bestimmt man bei gegebener Charakteristik graphisch (Abb. 27). Man trägt auf der Spannungsachse die Strecke E ab und zieht in ihrem Endpunkt A die Widerstandslinie AB mit dem Neigungswinkel $\alpha = \text{arctg } R$. Sie schneidet die Charakteristik im Punkte P , der den Strom I_0 bestimmt. Die Richtigkeit der Konstruktion ergibt sich aus dem Ohmschen Gesetze (angewandt auf den Stromkreis außerhalb der Lichtbogenstrecke):

$$E = U_0 + R I_0$$

Es gibt noch einen zweiten Schnittpunkt P_2 , der einen kleineren Strom I_2 ergeben würde. In diesem Punkte ist aber der Zustand des Stromkreises nicht stabil. Denn wenn es auch gelänge, den Strom I_2 in dem gegebenen Stromkreise auf irgendeine Weise einmal herzustellen, so würde doch, wie sich zeigen läßt die geringste zufällige Abnahme des Stromes I_2 sich bis zum Erlöschen des Bogens steigern; und umgekehrt müßte nach der geringsten zufälligen Zunahme der Strom bis auf den Wert I_0 anwachsen. (W. Kaufmann, Ann. d. Phys. (4) Bd. 2, S. 158, 1900.) Ein Punkt, in dem die

Widerstandslinie die Charakteristik von oben schneidet, bestimmt einen stabilen Zustand.

Wenn man R steigert, so verläuft die Widerstandslinie immer steiler; in der Grenzlage AC erlischt der Bogen.

Der Stabilität wegen kann ein Lichtbogen nur mit Vorschaltwiderstand brennen; auch der Nernstbrenner muß einen solchen erhalten, damit er bei einer zufälligen Spannungssteigerung nicht durchbrennt. (H. Th. Simon, ETZ 1905, S. 819, Abb. 20.)

Für schnell veränderliche Zustände (Wechselstromvorgänge) treten an Stelle der statischen sogenannte dynamische Charakteristiken, die sich für den Lichtbogen in vielen Fällen nach der Theorie von H. Th. Simon¹⁾ vorausberechnen lassen.

Der Funken ist nichts weiter als ein kurz dauernder Lichtbogen.

In einem ihm parallel geschalteten Schwingungskreise vermag der Lichtbogen dauernde elektrische Schwingungen zu erregen (Dudell, Poulsen, Simon, Rein).

Eine eingehende Bearbeitung der Lichtbogenscheinungen findet man bei Hagenbach in Marx' Handbuch der Radiologie, Bd. 4.

Das magnetische Feld elektrischer Ströme.

(103) Grundlegende Beziehungen. Magnetische Umlaufspannung. Im Felde permanenter Magnete verschwindet das Linienintegral der magnetischen Feldstärke, die magnetische Spannung, längs jeder geschlossenen Kurve:

$$\oint \mathfrak{H} ds = 0, \text{ oder } \operatorname{rot} \mathfrak{H} = 0$$

\mathfrak{H} kann daher als Gefälle eines einwertigen Potentials ψ dargestellt werden: $\mathfrak{H} = -\operatorname{grad} \psi$.

Ein magnetisches Feld ist auch mit jeder elektrischen Strömung verbunden. Wenn der Strom in leitend geschlossenen Bahnen fließt (Gleichstrom, langsamer — quasistationärer — Wechselstrom), so befinden sich die Wirbel des magnetischen Feldes nur innerhalb der Stromleiter.

Es gilt

$$\operatorname{rot} \mathfrak{H} = 4\pi c$$

c = Stromdichte. Daraus folgt, daß längs jedes geschlossenen Weges l die magnetische Umlaufspannung gleich dem 4π -fachen Stromfluß durch irgendeine von dem Wege berandete Fläche F ist:

$$\oint_l \mathfrak{H} ds = 4\pi \int_F c_n df$$

df ist ein Flächenelement von F , c_n die zu df normale Komponente der Stromdichte. Dabei muß die Randlinie l im Uhrzeigersinne umlaufen werden, wenn man in Richtung der Normalen n blickt (oder: l und n verhalten sich wie Drehungs- und Fortschreitungsinn einer Rechtsschraube²⁾). Für alle Umläufe, bei denen kein durchströmter Leiter durchschnitten oder umkreist wird, wird hiernach die magnetische Spannung Null. In stromlosen Räumen kann man also wie im Felde permanenter Magnete (36) $\mathfrak{H} = -\operatorname{grad} \psi$ setzen. Jedoch ist nun das Potential nur dann noch einwertig, wenn in dem stromlosen Raum Wege, die mit dem Stromleiter verschlungen sind, unmöglich sind oder durch passend angebrachte

¹⁾ Phys. Zeitschr. Bd. 6, S. 297, 1905; ETZ 1905, S. 818, 839. Siehe auch K. W. Wagner, Der Lichtbogen als Wechselstromerzeuger. Leipzig 1910 (S. Hirzel).

²⁾ Diese Richtungsbestimmung entspricht den Ampèreschen Regeln der älteren Elektrodynamik.

Sperrflächen unmöglich gemacht werden. An diesen Sperrflächen erleidet das Potential einen Sprung.

(104) **Das Vektorpotential.** In Räumen, in denen die Permeabilität μ räumlich konstant ist, kann \mathfrak{H} von einem Vektorpotential \mathfrak{A} abgeleitet werden:

$$\mathfrak{H} = \text{rot } \mathfrak{A} \qquad \mathfrak{A} = \int \frac{c \, d\mathbf{v}}{r}$$

c = Stromdichte im Raumteil $d\mathbf{v}$, r dessen Abstand von dem Punkt, in dem das Vektorpotential gesucht ist.

(105) **Lineare Leiter.** Ist I der Strom, $d\mathbf{s}$ ein Linienelement des Leiters, so wird ($\text{grad } \mu = 0$)

$$\mathfrak{A} = I \int \frac{d\mathbf{s}}{r} \qquad \mathfrak{H} = \text{rot } \mathfrak{A} = I \int \frac{[d\mathbf{s} \, \mathbf{r}]}{r^3}$$

(Biot-Savarts Gesetz). Man drückt das oft so aus: Jedes Stromelement $I \, d\mathbf{s}$ liefert zur Feldstärke einen Beitrag $|d\mathfrak{H}| = \frac{I \, d\mathbf{s} \sin(\angle d\mathbf{s}, \mathbf{r})}{r^2}$; doch hat dieser Satz nur für geschlossene Strombahnen und konstantes μ einen Sinn. Dagegen ist die Grundgleichung

$$\oint \mathfrak{H} \, d\mathfrak{s} = 4\pi \Sigma I$$

auch für veränderliches μ richtig. ΣI ist der mit dem Integrationsweg für \mathfrak{H} verkettete Gesamtstrom (die Durchflutung) in absolutem Maß (d. h. in Dekaampere). $4\pi \Sigma I$ nennt man auch die auf den magnetischen Kreis wirkende magnetomotorische Kraft (MMK).

(106) **Beispiele.** 1. Geschlossenes Ringsolenoid mit w gleichmäßig eng gewickelten Windungen. Ein merkliches Feld ist nur im Ringinnern vorhanden. Die Kraftlinien verlaufen in konzentrischen Kreisen um die Ringachse. Für den Kreis vom Radius r wird

$$\oint \mathfrak{H} \, d\mathbf{s} = 2\pi r \mathfrak{H} = \mathfrak{H} l = 4\pi w I, \quad I \text{ in CGS}$$

daraus $\mathfrak{H} = 0,4\pi w I/l$, I in Ampere

2. Geradliniges Solenoid, Länge l , Durchmesser $2r$. Das Feld in einem Punkt der Achse innerhalb der Spule (Abstand von der Mittelebene $x < 1/2 l$) ist

$$\mathfrak{H} = 0,2\pi w \frac{I}{l} \left[\frac{1/2 l - x}{\sqrt{r^2 + (1/2 l - x)^2}} + \frac{1/2 l + x}{\sqrt{r^2 + (1/2 l + x)^2}} \right]$$

I in Ampere. Sofern $l \gg r$, ist das Feld im Innern praktisch homogen von der Stärke¹⁾

$$\mathfrak{H} = 0,4\pi w I/l, \quad I \text{ in Ampere}$$

(Ein streng homogenes Feld entsteht im Innern eines gleichmäßig bewickelten Ellipsoids.)

3. Kreisstrom (Tangentenbusssole) vom Radius r ; die Feldstärke in einem Punkt der Achse mit dem Abstand x von der Kreisebene wird

$$\mathfrak{H} = \frac{\pi r^2 w I}{5 \sqrt{(x^2 + r^2)^3}}, \quad I \text{ in Ampere}$$

4. Langer gerader Draht. In der Nähe des Drahtes sind die Kraftlinien Kreise um die Drahtachse; im Abstand r von der Achse wird

$$\mathfrak{H} = 2I/r, \quad I \text{ in CGS}, \quad = I/5r, \quad I \text{ in Ampere}$$

¹⁾ Genaue Formeln bei P. Debye, Bd. V, Art. 17, § 22 (S. 437) der Enzyklopädie der Math. Wiss. Leipzig 1910. — Messungen hat A. Salb ausgeführt (Z. f. techn. Phys. 1923, S. 369).

Das gilt für Punkte außerhalb des stromerfüllten Drahtes; im Innern ist, wenn der Strom gleichmäßig auf den Querschnitt verteilt ist,

$$\mathfrak{H} = \frac{2Ir}{a^2}, \quad I \text{ in CGS, } = \frac{Ir}{5a^2}, \quad I \text{ in Ampere, } a = \text{Drahtradius in cm.}$$

(107) **Angenäherte Berechnung der magnetischen Spannung.** In Dynamomaschinen, Transformatoren und anderen Apparaten mit einem nahezu geschlossenen Eisenweg kann man, abgesehen von der Streuung, den Verlauf der Induktionslinien (\mathfrak{B}) und bei gegebenem Induktionsfluß $\Phi = \int \mathfrak{B}_n \, d\mathfrak{f}$ auch die Stärke der Induktion \mathfrak{B} in jedem Querschnitt q annähernd bestimmen: $\mathfrak{B} = \Phi/q$. Hieraus folgt die Feldstärke $\mathfrak{H} = \Phi/\mu q$. Setzt sich der magnetische Kreis aus angenähert zylindrischen Teilen von den Längen l_1, l_2, \dots und den Querschnitten q_1, q_2, \dots zusammen, so wird die magnetische Umlaufspannung

$$\oint \mathfrak{H} \, ds = \sum_n \mathfrak{H}_n l_n = \Phi \sum_n \frac{l_n}{\mu_n q_n}$$

I. W.: Die magnetische Umlaufspannung und mithin auch die magnetomotorische Kraft ist gleich dem Induktionsfluß Φ (Magnetstrom), multipliziert mit der Summe der magnetischen Widerstände $l_n/\mu_n q_n$ der einzelnen Teile des Kreises (sogenanntes Ohmsches Gesetz für den magnetischen Kreis). Auf jeden Teil des Kreises wirkt die magnetische Spannung $\mathcal{H}_n = \Phi_n l_n / \mu_n q_n$. Die MMK ergibt nach (105) die Durchflutung $\mathcal{L} = \sum I$, die mit dem Kreis verkettet sein muß, damit das berechnete magnetische Feld zustande kommt. Vgl. (307, 310).

(108) **Die magnetische Energie.** Der allgemeine Ausdruck für die in einem elektromagnetischen Felde enthaltene magnetische Energie

$$W_m = \frac{1}{8\pi} \int \mathfrak{B} \mathfrak{H} \, dV = \frac{1}{8\pi} \int \mu \mathfrak{H}^2 \, dV = \frac{1}{2} \int \mathfrak{H} c \, dV$$

geht für das Feld linearer Stromschleifen ($I_1, I_2, I_3 \dots$) über in

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + \frac{1}{2} L_3 I_3^2 + \dots \\ + M_{12} I_1 I_2 + M_{13} I_1 I_3 + M_{23} I_2 I_3 + \dots,$$

L_1, L_2, L_3, \dots heißen die Selbstinduktivitäten der Schleifen 1, 2, 3, ...; M_{12} ist die Gegeninduktivität der Schleifen 1 und 2, M_{13} diejenige der Schleifen 1 und 3 und so fort.

Die magnetische Energie zweier miteinander verketteter linearer Stromschleifen

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + M I_1 I_2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2$$

läßt sich auch in der Form schreiben

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_{1\mu}^2 + \frac{1}{2} L_2 \sigma I_2^2 \dots \dots \dots (1)$$

Darin bedeutet
$$I_{1\mu} = I_1 + \frac{M}{L_1} I_2 \dots \dots \dots (2)$$

den auf die Schleife 1 bezogenen „Magnetisierungsstrom“,

$$\sigma = 1 - M^2/L_1 L_2$$

die „Streu ziffer“. $L_1 I_{1\mu}$ ist der auf die Schleife 1 bezogene Hauptfluß, $L_2 \sigma I_2$ ist der zugehörige Streufluß. Der erste Summand auf der rechten Seite von Gl. (1) ist die Energie des magnetischen Hauptfeldes, der zweite Summand ist die Energie des magnetischen Streufeldes.

Bei gewöhnlichen Transformatoren und Induktionsmotoren ist die Streuung σ klein; der Magnetisierungsstrom ist viel kleiner als die Belastungsströme I_1 und

$I_2 M / L_1$. Dann ist also nach Gl. (2) angenähert $I_1 \approx -M I_2 / L_1$ und die Energie des Streufeldes $\frac{1}{2} L_2 \sigma I_2^2 \approx \frac{1}{2} L_1 \sigma I_1^2$.

(109) Selbstinduktivitäten¹⁾.

1. Einfacher Drahtkreis vom Radius R und dem Drahtradius r . Sehr angenähert ist (R a y l e i g h und N i v e n, Rayleighs Collected Papers, Bd. 2, S. 15):

$$L \approx 4\pi R \left[\left\{ 1 + \frac{r^2}{8R^2} \right\} \log \text{nat} \frac{8R}{r} - \frac{7}{4} + \frac{r^2}{24R^2} \right]$$

2. Kurze einlagige Spule von der Länge l (einschließlich der Isolation der ersten und der letzten Windung) und dem Radius R , die w Windungen hat. Nach R a y l e i g h und N i v e n (Proc. Roy. Soc. Bd. 32, S. 104, 1881) ist sehr angenähert

$$L \approx 4\pi R w^2 \left\{ \log \text{nat} \frac{8R}{l} - \frac{1}{2} + \frac{l^2}{32R^2} \left(\log \text{nat} \frac{8R}{l} + \frac{1}{4} \right) \right\}$$

Genauere Formeln bei G l a g e, Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Teleph. Bd. 2, S. 503, 1909.

3. Lange Spule von der Länge l und dem Radius R , welche eine Lage von w Windungen hat (W e b s t e r u. H a v e l o c k):

$$L = 4\pi^2 w^2 \frac{R^2}{l} \left(1 - \frac{8R}{3\pi l} + \frac{1R^2}{2l^2} - \frac{1R^4}{4l^4} + \frac{5R^6}{16l^6} - \frac{35R^8}{64l^8} \dots \right)$$

Den Wert K des Klammerausdrucks hat N a g a o k a für die Werte von $2R/l = 0,01$ bis 10 berechnet. Die ausführliche Tafel ist in dem in der Fußnote genannten Aufsatz von R o s a u. G r o v e r auf S. 224 ff. abgedruckt; wir geben hier nur einen Auszug, und zwar gleich die Werte von $k = 4\pi^2 R K / l$, so daß die Formel in der Gestalt erscheint

$$L = k R w^2$$

$\frac{2R}{l}$	k	$\frac{2R}{l}$	k	$\frac{2R}{l}$	k	$\frac{2R}{l}$	k
0,05	0,9663	0,55	8,719	1,10	14,49	2,60	23,74
0,10	1,893	0,60	9,339	1,20	15,34	2,80	24,60
0,15	2,781	0,65	9,937	1,30	16,14	3,00	25,42
0,20	3,632	0,70	10,514	1,40	16,90	3,20	26,18
0,25	4,449	0,75	11,070	1,50	17,62	3,40	26,90
0,30	5,234	0,80	11,608	1,60	18,30	3,60	27,59
0,35	5,987	0,85	12,128	1,80	19,58	3,80	28,24
0,40	6,710	0,90	12,631	2,00	20,75	4,00	28,85
0,45	7,406	0,95	13,117	2,20	21,82	4,50	30,28
0,50	8,075	1,00	13,589	2,40	22,81	5,00	31,57

Für sehr genaue Berechnungen ist an den Formeln unter 2 und 3 wegen des nicht vom Strom erfüllten Raumes zwischen benachbarten Drähten eine Korrektur anzubringen, die in den Aufsätzen von R o s a und G r o v e r (S. 122, 197—199) und von G l a g e (S. 506) angegeben ist.

Die Formeln unter 2 und 3 gelten angenähert auch für mehrlagige Spulen, wenn unter w die gesamte Windungszahl, unter R der mittlere Spulenradius verstanden wird. Für genaue Berechnungen muß man eine Korrektur wegen der endlichen (radialen) Dicke der Wicklung anbringen, die bei R o s a und G r o v e r auf S. 138 und 200, bei G l a g e auf S. 510 angegeben ist.

¹⁾ Siehe auch P. D e b y e, Bd. V, Art. 17, § 32, S. 464 der Enzyklopädie der Math. Wiss., Leipzig 1910. — E. O r l i c h, Kapazität und Induktivität, S. 63—92. Braunschweig 1909. — G. G l a g e, Jahrb. der drahtl. Telegr. und Telephonie Bd. 2, S. 501, 593. — E. B. R o s a und F. W. G r o v e r, Bull. Bureau of Standards, Vol. 8, Nr. 1, Washington 1911. (Kritische Zusammenstellung von Formeln und Zahlentafeln.)

4. Ringspule, Ringradius a , Windungsradius r , Windungszahl w

$$L = 2\pi w^2 (a - \sqrt{a^2 - r^2})$$

5. Kurze flache Spule, Wicklungsquerschnitt ein Rechteck von den Seitenlängen b und c , mittlerer Spulenradius R , äußerer und innerer $R + \frac{1}{2}c$ und $R - \frac{1}{2}c$, Windungszahl w (Stefan, Ann. d. Phys. (3), Bd. 22, S. 107, 1884; Weinstein, Ann. d. Phys. (3), Bd. 21, S. 329, 1884; Hemmeter, Arch. f. Elektrot. Bd. 11, S. 155, 268, 1922):

$$L = 4\pi R w^2 \left[\left(1 + \frac{3b^2 + c^2}{96R^2} \right) \log \text{nat} \frac{8R}{\sqrt{b^2 + c^2}} - y_1 + \frac{b^2}{16R^2} y_2 \right] \text{ für } b \geq c$$

Für $b \leq c$ ist das letzte Glied in der Klammer zu ersetzen durch $c^2 y'_2 / 16R^2$. Die Werte von y_1 , y_2 und y'_2 sind der Tabelle zu entnehmen; darin bedeutet x diejenige der Zahlen b/c und c/b , die ≤ 1 ist

x	y_1	y_2	y'_2	x	y_1	y_2	y'_2
0	0,500	0,125	0,597	0,6	0,818	0,384	0,705
0,1	0,592	0,132	0,602	0,7	0,833	0,474	0,722
0,2	0,665	0,155	0,615	0,8	0,842	0,576	0,760
0,3	0,722	0,192	0,631	0,9	0,847	0,690	0,791
0,4	0,765	0,242	0,654	1,0	0,848	0,816	0,816
0,5	0,796	0,307	0,677				

Für $b=c$ kann man mit Weinstein schreiben

$$L = 4\pi R w^2 \left[\left(1 + \frac{b^2}{24R^2} \right) \log \text{nat} \frac{8R}{b} - 1,195 + 0,03657 \frac{b^2}{R^2} \right]$$

Ein Minimum des Widerstandes erhält man für $R=1,85b$; führt man diesen Wert ein, so folgt, wenn auf eine Lage von 1 cm Länge K Windungen gehen

$$L = 19,4 R w^2 = \frac{35,9}{K} w^{5/2}$$

Diese Formeln gelten für einen Draht von Quadratquerschnitt. Für Drähte mit Kreisquerschnitt ist zu dem L als Korrektionsglied zu addieren:

$$4\pi R w \left(\log \text{nat} \frac{d}{r} + 0,155 \right)$$

d = Drahtabstand, r = Drahradius. Die Konstante 0,155 hängt, genau genommen, etwas von der Windungszahl ab; sie steigt von 0,144 bei 2 Windungen auf 0,156 bei unendlich vielen Windungen (Rosa u. Grover, S. 140).

6. Flachspule (Kreisring), mit w Windungen, äußerer Radius R , innerer Radius r , Höhe vernachlässigbar (J. Spielrein, Arch. Elektr. Bd. 3, S. 187, 1915)

$$L = k R w^2$$

k ist der folgenden Tafel zu entnehmen:

$\frac{r}{R}$	k	$\frac{r}{R}$	k	$\frac{r}{R}$	k
0	6,970	0,45	17,23	0,88	42,99
0,05	7,716	0,50	18,97	0,90	45,74
0,10	8,556	0,55	20,89	0,91	47,31
0,15	9,488	0,60	23,01	0,92	49,04
0,20	10,51	0,65	25,39	0,93	50,97
0,25	11,63	0,70	28,09	0,94	53,18
0,30	12,86	0,75	31,21	0,95	55,75
0,35	14,19	0,80	34,92	0,99	77,65
0,40	15,65	0,85	39,53	1,00	∞

7. Zur Berechnung der Induktivität zylindrischer Spulen mit rechteckigem Wicklungsquerschnitt, mit etwa $\pm 3\%$ Genauigkeit sind die von K o r n d ö r f e r (ETZ 1917, S. 521) angegebenen Formeln $L = 10,5 w^2 D(D/U)^k$ sehr bequem. D = mittlerer Spulendurchmesser, U = Umfang des Wicklungsquerschnitts. $k = 3/4$, wenn $0 < D/U < 1$; $k = 1/2$, wenn $1 < D/U < 3$.

8. Formeln und Zahlentafeln zur Berechnung der Selbstinduktivität von Zylinderspulen und von Flachspulen mit rechteckigen Windungen hat A. E s a u angegeben (Jahrb. d. drahtl. Tel. Bd. 14, S. 271 und 386, 1919).

9. Rechteckige Spule mit rechteckigem Wicklungsquerschnitt; a und b Seiten des Rechtecks, α und β Höhe und Breite des Wicklungsquerschnitts. Nach S u m e c (ETZ 1906, S. 1175) ist angenähert

$$L \approx 9,2 w^2 \left\{ a \log \text{vulg} \frac{b}{(\alpha + \beta)_a} + b \log \text{vulg} \frac{a}{(\alpha + \beta)_b} + 3(a + b) \right\}$$

Voraussetzung: Der Wicklungsraum wird vom Stromleiter vollkommen erfüllt.

10. Spulen hoher Selbstinduktivität werden durch Verwendung von Eisenkernen erhalten; bei ihnen hängt L (wegen der Veränderlichkeit von μ) von der Stromstärke ab.

11. Einfachleitung, Rückleitung durch die Erde; Drahtradius r , Länge l

$$L = 2l \left(\log \text{nat} \frac{2l}{r} - \alpha \right)$$

$\alpha = 3/4$ bis $7/4$ je nach der Verteilung der Rückströme im Erdboden (nach F. B r e i s i g, Theoret. Telegraphie, § 120, S. 168; Braunschweig 1910).

12. Doppelleitung; Länge l .

a) Zwei Drähte vom Radius r_1 bzw. r_2 im Abstand d

$$L = l(\alpha + 4 \log \text{nat} [d/\sqrt{r_1 r_2}])$$

$\alpha = \mu$ (in Luft = 1), wenn der Strom den Drahtquerschnitt gleichmäßig erfüllt (niedere Frequenz).

$\alpha = 0$, wenn der Strom merklich auf eine dünne Oberflächenschicht beschränkt ist (hohe Frequenz).

b) Leiter vom beliebigen Querschnitt F_1 bzw. F_2 .

$$L = 2l \log \text{nat} g_{12}^2 / g_{11} g_{22}$$

g_{12} = mittlerer geometr. Abstand¹⁾ der Fläche F_1 von F_2 ;

g_{11} = „ „ „ „ „ F_1 von sich selbst;

g_{22} = „ „ „ „ „ F_2 von sich selbst.

$$\log \text{nat} g_{12} = \frac{1}{F_1 F_2} \iint_{F_1 F_2} dF_1 dF_2 \log \text{nat} Z$$

Z = Abstand der Flächenelemente dF_1 und dF_2 . (Näheres bei E. O r l i c h, ETZ 1908, S. 310.)

In sämtlichen Formeln sind die Längen in cm einzusetzen; L wird in absolutem Maß (cm) erhalten; 1 Henry = 10^9 cm.

c) Zur angenäherten Berechnung der Induktivität oberirdischer Doppelleitungen kann man gemäß (146) die Formel

$$L = 1/Cc^2$$

verwenden. Darin ist $c = 3 \cdot 10^5$ km/s die Lichtgeschwindigkeit, C die Kapazität, die der Tabelle in (54) zu entnehmen ist; man erhält L in H/km, wenn C in F/km eingesetzt wird.

¹⁾ M a x w e l l, Elektrizität und Magnetismus Bd. 2, Art. 691, 692, deutsche Ausgabe 1883.

Die Induktivität der Kabel beträgt etwa

bei Starkstromkabeln	0,4 mH/km
bei vieladrigen Fernsprechkabeln	0,7 mH/km
bei Telegraphenkabeln mit Rückleitung durch die Erde	2,5 mH/km
bei Fernsprechkabeln mit Eisendraht oder -bandbespin- nung nach Krarup	8 bis 20 mH/km

Der von der Eisenschicht herrührende Zuwachs der Induktivität beträgt für die Doppelleitung

$$k\mu \frac{8\delta}{d} \cdot 10^{-4} \text{ Henry/km}$$

Darin ist d der Durchmesser des Leiters, δ die Dicke der Eisenschicht, μ die magnetische Permeabilität, k der Füllfaktor der Eisenschicht, $k = \pi/4$ für runde Eisendrähte, k etwas kleiner als 1 für rechteckige Drähte oder Bänder.

(110) Gegeninduktivitäten.

1. Zwei gleich lange einfache Drahtlagen, die mit den Windungszahlen K_1 und K_2 für 1 cm auf denselben Zylinder gewickelt sind, und die die Fläche S umschließen:

$$M = 4\pi K_1 K_2 l S$$

2. Zwei Kreisdrähte von den Radien R und r in parallelen Ebenen, deren Abstand x zugleich der Mittelpunktsabstand der beiden Kreise ist. Sehr angenähert ist¹⁾

$$M = 4\pi \sqrt{Rr} \left[A \log \text{nat} \frac{8}{\sqrt{p}} - B \right]$$

wobei

$$p = \frac{x^2 + (R-r)^2}{Rr}$$

$$A = 1 + \frac{3}{16} p - \frac{15}{1024} p^2 + \dots \quad B = 2 + \frac{1}{16} p - \frac{31}{2048} p^2 + \dots$$

ist (Havelock, Phil. Mag. Bd. 15, S. 332, 1908).

3. Schleifen aus parallelen geraden Drähten von der Länge l . Besteht die eine Schleife aus den Drähten 1 und 2, die andere aus den Drähten 3 und 4, von denen 1 und 3 als Hinleitung dienen, und bezeichnen r_{12} , r_{13} usw. die entsprechenden Drahtachsenabstände, so ist

$$M = 2l \log \text{nat} (r_{23}r_{14}/r_{13}r_{24})$$

4. Schleifen mit gemeinsamer Rückleitung (Drehstromleitung). Bezeichnet man die Drähte wie im vorigen Beispiel, und fallen 2 und 4 zusammen, so gilt

$$M = 2l \left(\log \text{nat} \frac{r_{12}r_{23}}{r_{13}r} + \frac{1}{4} \right)$$

r = Drahtradius der gemeinsamen Rückleitung.

5. Zwei Einfachleitungen mit Erde als Rückleitung (z. B. Einphasenbahn — Telegraphenleitung, oder verschiedene Adern eines Telegraphenkabels) (F. Reising, Theoret. Telegraphie, § 117 bis 119; Braunschweig 1910.) l = Länge, d = Abstand der Leiter

$$M = 2l \left(\log \text{nat} \frac{2l}{d} - \alpha \right)$$

¹⁾ Die genaue Formel nebst Tafeln zur Berechnung findet man in den „Funktions-tafeln“ von E. Jahnke und F. Emde, S. 76, Leipzig 1909. Siehe auch Rosa und Grover, Bull. of the Bur. of Standards, Washington 1911, Bd. 8, S. 6.

$\alpha = 1$ bis 3, in Ausnahmefällen noch höher, je nach dem Verlauf der Ströme in der Erde.

Längen in cm; M in cm; 1 Henry = 10^9 cm.

(111) Rasch veränderliche Felder. Verschiebungsstrom. Dort, wo Stromlinien einmünden, nehmen die Ladungen entsprechend zu: — $\text{div } \mathfrak{c} = \partial \eta / \partial t$. Weil nun von jeder Ladungseinheit eine Verschiebungslinie ausgeht ($\eta = \text{div } \mathfrak{D}$; also — $\text{div } \mathfrak{c} = \text{div } \partial \mathfrak{D} / \partial t$), so entspricht jeder einmündenden Stromlinie ein Wachstum des Verschiebungsflusses um eine Linie in der Sekunde. Die Zunahme des Verschiebungsflusses in der Sekunde wird **Verschiebungsstrom** genannt. Zu jeder irgendwo einmündenden Stromlinie gehört also eine von ebendort ausgehende Verschiebungsstromlinie. Durch die Zusammensetzung des Leitungsstroms \mathfrak{c} und des Verschiebungsstromes $\partial \mathfrak{D} / \partial t$ entsteht somit ein wahrer Strom \mathfrak{C}

$$\mathfrak{C} = \mathfrak{c} + \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial t}$$

dessen Linien nirgends Anfangs- und Endpunkte haben ($\text{div } \mathfrak{C} = 0$). Nach Maxwell erzeugt ein Verschiebungsstrom genau dasselbe Magnetfeld wie ein ebenso verteilter Leitungsstrom, und es gilt ganz allgemein (in allen Körpern und für beliebig rasche Änderungen)

$$\text{rot } \mathfrak{H} = 4\pi \mathfrak{C} = 4\pi (\mathfrak{c} + \partial \mathfrak{D} / \partial t)$$

Für Gleichstrom geht dies in die frühere Gleichung $\text{rot } \mathfrak{H} = 4\pi \mathfrak{c}$ (103) über; auch bei langsamem — quasistationärem — Wechselstrom kann man die magnetischen Wirkungen des Verschiebungsstromes im allgemeinen vernachlässigen; im Innern von Metallen ist der Verschiebungsstrom stets unmeßbar klein.

Das Induktionsgesetz.

(112) Das Grundgesetz von Faraday-Maxwell. Denkt man sich eine beliebige Fläche F mit der Randlinie l , so ist das Linienintegral der elektrischen Feldstärke — die induzierte EMK E_i — längs l gleich der Abnahme, die der über die Fläche F berechnete Induktionsfluß $\Phi = \int_F \mathfrak{B}_n \, d\mathfrak{s}$ in der Sekunde erfährt:

$$E_i = \oint_l \mathfrak{C} \, d\mathfrak{s} = - \frac{d}{dt} \int_F \mathfrak{B}_n \, d\mathfrak{s} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Dabei soll durch die Flächennormale \mathfrak{n} und den Umlaufssinn von l der Fortschreitungs- und Drehsinn einer Rechtsschraube bestimmt werden. Außerdem soll bei bewegten Körpern die Randlinie l an die Körperelemente gebunden sein.

Der Induktionsfluß durch eine Fläche kann sich ändern: 1. dadurch, daß das Feld zeitlich schwankt (Transformator); 2. dadurch, daß sich bei konstantem Feld die Fläche ändert (durch Bewegung der Körper). Diese zweite Flußänderung wird stets dadurch richtig erhalten, daß man die von der Randlinie¹⁾ in der Sekunde geschnittene Kraftlinienzahl (besser: den von ihr in 1 s überstrichenen Induktionsfluß) berechnet²⁾. (Rotierende glatte Dynamoanker, Unipolarmaschinen). In der Differentialform des Induktionsgesetzes

¹⁾ Weil die Induktionslinien nirgends enden, $\text{div } \mathfrak{B} = 0$, so kann sich hier der Fluß bei festgehaltener Randlinie nicht ändern, wieviel man auch die Fläche sonst deformieren mag.

²⁾ Diese Berechnungsart der EMK gilt also für einen speziellen Fall, ist aber kein allgemeines Gesetz. Vgl. F. E m d e, Elektrot. und Maschinenbau (Wien) 1908, Heft 46 ff.; 1909, Heft 34.

$$\operatorname{rot} \mathfrak{E} = -\frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t} - \operatorname{rot} [\mathfrak{B} \mathbf{v}]$$

(\mathbf{v} = Geschwindigkeit, $\partial/\partial t$ = Änderung am festen Raumpunkt)

kommt diese Zerlegung der Flußschwankung auch äußerlich zum Ausdruck.

(113) **Beispiele.** 1. **Transformator.** Als Randlinie l sei die Achse des Wicklungsdrahtes gewählt; die Enden der Wicklung mögen irgendwie verbunden sein, jedoch so, daß der Verbindungsdraht allein kein nennenswertes Magnetfeld umschließt. Dann besteht die vom Fluß durchsetzte Fläche im wesentlichen aus der von den w Transformatorwindungen berandeten Fläche, die gleich wq ist (q = Kernquerschnitt), daher

$$E_i = \oint \mathfrak{E} \, ds = -wq \frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t},$$

\mathfrak{B} = Induktion im Transformator Kern. $q \mathfrak{B}$ heißt in diesem Falle der Windungsfluß, $wq \mathfrak{B}$ der Spulenfluß. Ein Modell zur Veranschaulichung der von den w Windungen berandeten Fläche hat F. E m d e angegeben (Elektr. u. Maschb., Wien 1912, Heft 47).

2. **Prinzip des Wechselstromdynamometers.** Ein Drahtrechteck (Seiten a, b) dreht sich in einem homogenen Magnetfeld \mathfrak{B} um seine zu den Kraftlinien senkrechte Mittelachse (parallel a) mit der Winkelgeschwindigkeit ω . Dann ist der Fluß durch das Rechteck $\Phi = \mathfrak{B} a b \cos \omega t$, daher

$$E_i = -\partial \Phi / \partial t = \omega \mathfrak{B} a b \sin \omega t$$

Oder: Nur die zur Drehachse parallelen Seiten a schneiden Induktionslinien. Ihre Geschwindigkeiten $|\mathbf{v}| = 1/2 \omega b$ bilden mit den Induktionslinien einen Winkel $180^\circ - \omega t$. Daher ist

$$E_i = \oint \mathfrak{E} \, ds = -\int [\mathfrak{B} \mathbf{v}] \, ds = \mathfrak{B} \frac{\omega b}{2} 2a \cdot \sin \omega t = \omega \mathfrak{B} a b \sin \omega t, \text{ wie vorher.}$$

3. **Unipolare Induktion.** Versuch: Ein Magnetstab M (Abb. 28) drehe sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω um seine Achse AB . Der Punkt B der leitend gedachten Achse sei durch ein Galvanometer G mit einer Schleifbürste C auf dem Umfang des Stabs verbunden. G zeigt dann einen Gleichstrom an.

Erklärung: Man wähle als Randlinie $EBGCDE$. Da die Randlinie an die Körperelemente gebunden ist, so wird das Stück EDC bei der Drehung mitgenommen und gelangt nach einer gewissen Zeit nach ED_1C_1 . Es überstreicht also einen gewissen Induktionsfluß, weil das Feld am festen Raumpunkt von der Drehung des Magnets nicht abhängt. Oder auch: Zur Fläche $EBGCDE$ tritt durch die Drehung der Sektor EDD_1 und das Mantelstück DD_1C_1C hinzu. Der gesamte Induktionsfluß hat sich also um den diesen Teilen angehörenden Betrag vermehrt. Man kann sich vorstellen, daß die von $EBGC_1D_1E$ berandete Fläche bei der Drehung unbegrenzt wächst, indem sie sich wie eine Haut auf den Magnet aufwickelt. Ist Φ der Fluß durch den Querschnitt des Magnets bei C , so wird $E_i = \omega \Phi / 2\pi$. Tiefere Einsicht in die hier vorliegenden Verhältnisse liefert die Erkenntnis der Verteilung der elektrischen Wirbel.

Aus der Grundgleichung $-\operatorname{rot} \mathfrak{E} = \partial \mathfrak{B} / \partial t + \operatorname{rot} [\mathfrak{B} \mathbf{v}]$ folgt, daß hier nur „Flächenwirbel“ (Sprünge der Tangentialkomponenten von \mathfrak{E}) auftreten, und zwar in der Grenzfläche Magnet-Luft (8). Flächenwirbel von \mathfrak{E} erscheinen in jeder Gleitfläche zweier Körper, die von \mathfrak{B} -Linien durchsetzt wird. (Vgl. A. S z a r r a s s i, Ann. d. Phys. (4) Bd. 23, S. 73, 1907.)

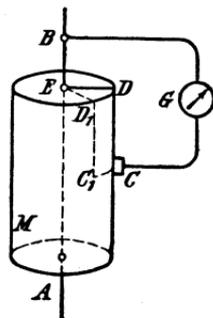


Abb. 28. Unipolare Induktion.

4. Glatte Ring- und Trommelanker.

$$E_i = pz\Phi \frac{n}{60} 10^{-8} \text{ Volt}$$

Φ = von einem Pol zum Anker übertretender Induktionsfluß; z = Zahl der wirklichen Ankerdrähte, n = Umdrehungszahl in der Minute. Bei reiner Parallelschaltung der Ankerzweige ist $p = 1$; bei reiner Reihenschaltung ist p gleich der Polpaarzahl.

5. In Nutenankern pflegt man die EMK nach den für glatte Anker gültigen Formeln zu berechnen. Diese gelten aber hier nur angenähert; denn der physikalische Vorgang ist ein wesentlich anderer, was schon daraus hervorgeht, daß die Ankerdrähte sich stets in dem sehr schwachen Nutenfelde bewegen. Die Verhältnisse in Nutenankern sind von R. Rüdénberg klargestellt worden (Elektrot. u. Maschinenbau 1907, Heft 31, 32).

(114) **Lineare Leiter.** Wird das veränderliche magnetische Feld von merklich linearen¹⁾ (und quasistationären) Strömen I_1, I_2, \dots erzeugt, so ergibt das Induktionsgesetz, wenn man die einzelnen Stromkreise nacheinander als Randlinien wählt:

$$E_1 = I_1 R_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M_{12} \frac{dI_2}{dt} + M_{13} \frac{dI_3}{dt} + \dots$$

$$E_2 = I_2 R_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + M_{21} \frac{dI_1}{dt} + M_{23} \frac{dI_3}{dt} + \dots$$

und so fort. Darin sind die E_1, E_2, \dots die eingepprägten (oder äußeren) EMKe, die R_1, R_2, \dots die Widerstände, die L_1, L_2, \dots die Selbstinduktivitäten der entsprechend bezeichneten Kreise. Die $M_{\alpha\beta} = M_{\beta\alpha}$ sind die Gegeninduktivitäten. Die Größen $-L_\alpha dI_\alpha/dt$ heißen die selbstinduzierten EMKe; $-M_{\alpha\beta} dI_\beta/dt$ ist die vom Strom I_β im Kreis α induzierte EMK (gegenseitige Induktion). Diese Gleichungen können auch auf ein zusammenhängendes Leiternetz angewandt werden, wenn man sich dieses in lauter einfache Schleifen aufgelöst denkt; vgl. Cohn, Das elektromagn. Feld, S. 141 u. 321.

(115) **Gegeninduktion zwischen Starkstromanlagen und Fernmeldeleitungen.** Starkstromanlagen sind mit benachbarten gleichlaufenden Fernmeldeleitungen magnetisch gekoppelt (Transformatorwirkung). Diese Kopplung ist praktisch von besonderer Bedeutung, wenn es sich beiderseits um Einzellösungen mit Rückleitung durch die Erde handelt. Solche Verhältnisse liegen bei Einphasenbahnen betriebsmäßig und bei Drehstromanlagen im Falle des Doppelerdschlusses vor. Die Gegeninduktivität ist nach (110,5) zu berechnen. Die induzierte EMK ergibt sich aus $E = I\omega M$; darin ist der I der Strom in der Starkstromleitung, ω die Kreisfrequenz. Die Induktionsstörungen können sich wegen der logarithmischen Abnahme von M noch in Fernmeldeleitungen nachteilig bemerkbar machen, die einen Abstand von 1 km und mehr haben (s. Abb. 29).

Bei Wechselstrombahnen (16 $\frac{2}{3}$ Per/s) sind für 100 Akm in Fernmeldeleitungen am Bahnkörper ohne Schienenbinder 6 bis 10 V, mit Schienenbindern 4 bis 5 V gemessen worden. Die ausgleichende Wirkung des induzierten Schienenstromes spielt dabei eine wesentliche Rolle. Bei fehlenden Bindern ist der Schienenstrom namentlich vom Schienenstoßwiderstand abhängig (nasses Wetter günstig). Unterirdische Führung der Einzellösungen ist der oberirdischen Führung hinsichtlich magnetischer Beeinflussung nur dann überlegen, wenn der Kabelmantel gut leitend durchverbunden ist, so daß starker induzierter Kabelmantelstrom fließen kann, der schützende Wirkung besitzt. Bei überschläglichen Rechnungen kann im allgemeinen der Fahrstrom I für den Betrieb etwa mit 200 A, im Kurzschlußfall mit etwa 1000 A eingesetzt werden.

Bei Drehstromanlagen (50 Per/s) ergeben sich für den Fall des Doppelerdschlusses entsprechend der Frequenz höhere Werte, so in eindräftigen Fern-

¹⁾ Streng lineare Leiter gibt es nicht; für solche Leiter würden auch die Induktivitäten ihren Sinn verlieren.

meldeleitungen im Abstand einer Straßenbreite 25 bis 30 V für 100 Akm. Hierbei ist I etwa dreifacher Vollaststrom; die erste Spitze kann beträchtlich höher sein.

Die durch Kurzschlüsse an Einphasen- und Doppelleitungen an Drehstromanlagen hervorgerufene „Gefährdung“ benachbarter Fernmeldeleitungen besteht namentlich in dem Auftreten von Knallgeräuschen (Fernsprech-Betriebsunfällen), die schon bei 200 V induzierter Spannung einsetzen können und schwere Nervenstörungen verursachen. Völlig zuverlässiger Schutz dagegen ist auf der Seite der Fernmeldeleitung noch nicht vorhanden (Fritter, Edelgas-Quersicherung, s. F. Schröter, Zeitschr. f. techn. Physik, Bd. 4, S. 208, 1923). Wegen Schutzmaßnahmen durch zweckmäßige bauliche Anordnung der Drehstromanlagen s. ETZ 1923 S. 468 „Leitsätze zum Schutze von Fernmeldeleitungen gegen die Beeinflussung durch Drehstromleitungen.“

Bei betriebsmäßigem Zustand können Ein- und Dreiphasenanlagen in benachbarten Fernsprechleitungen „Störungen“ des Sprechverkehrs durch die Oberschwingungen der Stromerzeuger und Verbraucher hervorrufen, die sich sowohl infolge der vielfach unvermeidlichen Unsymmetrien der Fernsprechleitungen als auch der Drehstromanlagen (Verdrillen) geltend machen. Daher ist anzustreben, Generatoren und Motoren möglichst Oberschwingungsfrei (Nuten), Transformatoren mit geringem Leerlaufstrom zu bauen (vgl. hierzu auch H. S. Osborne, Proc. of the Amer. Inst. of El. Eng. 1919, S. 1). Wegen baulicher Schutzmaßnahmen gegen Störungen s. ebenfalls die genannten Leitsätze.

Verkabeln beeinflusster Fernmeldeleitungen unter gleichzeitigem Doppeln ist hinsichtlich der Gefährdung nur ein bedingter Schutz, weil jeder Einzeldraht über seine Kapazität Erdverbindung hat. Um Knallgeräusche zu vermeiden, betreibt man solche Leitungen zweckmäßig ohne Spannungssicherungen nach Erde. Durch geeignete Unterteilung der Fernsprechleitungen durch Übertrager kann man die Berührungsspannung vermindern. Störungen sind nur bei vollkommener Symmetrie der Kabeldoppelleitung und ihrer Betriebschaltung zu verhüten.

(116) Lenzsches Gesetz. Aus dem Induktionsgesetz ergibt sich, daß die induzierten Ströme stets so gerichtet sind, als wollten sie durch ihr eigenes magnetisches Feld die Feldänderung verhindern (elektromagnetische Trägheit).

(117) Wirbelströme. Wenn sich das magnetische Feld im Innern eines Leiters ändert, so werden in dem Leiter EMKe induziert, die eine Strömung im Leiter hervorrufen. Da sie sich im Leiter selbst schließt, so hat man sie Wirbelströmung genannt. Sie wirkt nach dem Lenzschen Gesetz entmagnetisierend; auch ist sie mit einer Entwicklung Joulescher Wärme verbunden (Energieverlust). In den Wirbelstrombremsen macht man von diesem Energieumsatz Gebrauch¹⁾. Zur Verminderung der Wirbelstromverluste baut man Eisenteile, die einen veränderlichen Induktionsfluß führen sollen, aus dünnen Blechen oder Drähten auf²⁾.

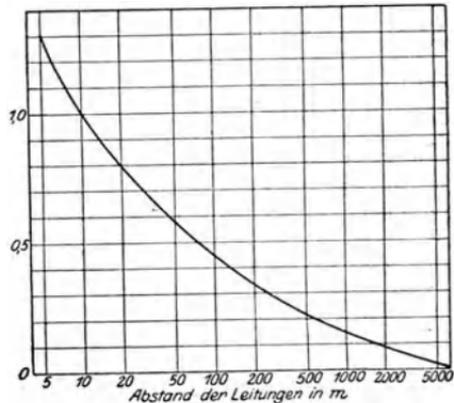


Abb. 29. Gegeninduktivität von Einfachleitungen in mH/km aus Messungen an Ein- und Dreiphasenleitungen verschiedener Länge.

¹⁾ Siehe R. Rüdtenberg, Energie der Wirbelströme. Stuttgart 1906.

²⁾ Näherungsformeln für Wirbelströme in massivem Eisen bei E. Rosenberg, ETZ 1923, S. 513.

(118) **Wirbelströme in Blechen** von der Dicke d (cm), dem spezifischen Widerstand ϱ , der Permeabilität μ bei der Frequenz $f = \omega/2\pi$ und der maximalen Induktion \mathfrak{B} . Der Joulesche Energieverlust im cm^3 für die Sekunde ist (J. J. Thomson, The Electrician, Bd. 28, S. 594, 599, 1892)

$$Q = \frac{\mathfrak{B}^2 d^2 \omega^2}{24 \varrho} \cdot \frac{6}{\alpha^3} \frac{\sin \alpha - \alpha \cos \alpha}{\cos \alpha + \alpha \sin \alpha} \quad \text{mit } \alpha = d \sqrt{2\pi \mu \omega / \varrho}$$

Der Faktor

$$\frac{6}{\alpha^3} \frac{\sin \alpha - \alpha \cos \alpha}{\cos \alpha + \alpha \sin \alpha} = 1 - 1,596 \left(\frac{\omega \mu d^2}{\varrho} \right)^2 - \dots$$

kann für niedere Frequenzen (α klein) durch 1 ersetzt werden. Dann wird (C. P. Feldmann, Wechselstromtransformatoren, S. 155, 1894)

$$Q = \mathfrak{B}^2 d^2 \omega^2 / 24 \varrho = \beta \mathfrak{B}^2 d^2 f^2$$

Für gewöhnliches Eisenblech erhält man, d in mm eingesetzt,

$$Q = 1,6 \mathfrak{B}^2 d^2 f^2 10^{-13} \text{ Watt/cm}^3$$

Eine weitere Folge der Wirbelströme ist eine mit ω und d zunehmende Abschirmung des Feldes aus dem Blechinnern. Schon bei $f = 50$, $d = 1/2$ mm, $\mu = 1000$ sinkt \mathfrak{B} in Richtung der Blechdicke vom Rande bis zur Mitte um 7,85 % (doppelseitige Hautwirkung).

Bei hoher Frequenz (großes α) wird

$$Q = \frac{\mathfrak{B}^2}{8\pi d} \sqrt{\frac{f \varrho}{\mu^3}}$$

Die vorstehenden Beziehungen sind unter der Annahme unendlicher Blechbreite hergeleitet; Feldverteilung und Wirbelströme in einem Blechstreifen von endlicher Breite sind von P. Debye (Zeitschr. f. Math. u. Phys., Bd. 54, S. 418, 1906) berechnet worden.

(119) Wirbelströme in Ankerstäben¹⁾ (Abb. 30).

a) **Wechselstrommaschinen.** Der Joulesche Wärmeeffekt in einem Stab vom Gleichstromwiderstande R_0 ist

$$Q = R_0 [I_0^2 \varphi(x) + I_1 (I_1 + I_0) \psi(x)]$$

I_0 = Strom in dem betreffenden Stabe, I_1 = Gesamtstrom aller darunter liegenden Stäbe.

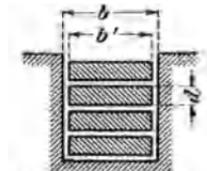


Abb. 30. Wirbelströme in Ankerstäben.

$$x = d \sqrt{2\pi \mu \omega / \varrho} \sqrt{b'/b}$$

ϱ = spez. Widerstand in Ohm.cm. Führt man statt dessen die spezifische Leitfähigkeit κ in Siemens, bezogen auf einen Stab von 1 m Länge und 1 mm^2 Querschnitt ein, so erhält man (mit $\mu = 1$)

$$x = d \sqrt{\frac{f}{50}} \cdot \sqrt{\frac{b'}{b}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{50}} = \alpha d$$

Für handwarmes Kupfer ist $\kappa = 50$, und für die Frequenz $f = 50$ hiermit $\alpha \approx 1$.

¹⁾ A. B. Field, Proc. Am. Inst. of El. Eng. Bd. 24, S. 659; 1905. — F. Emde, Elektrot. und Maschinenbau 1908, Heft 33, 34. — W. Rogowski, Arch. f. Elektrot. Bd. 2, S. 84, 1913; Bd. 4, S. 293, 1916. — R. Richter, Arch. f. Elektrot. Bd. 2, S. 518 1914; Bd. 3, S. 175, 1915; Bd. 4, S. 1, 1915; Bd. 5, S. 1, 1916; Bd. 5, S. 335, 1917. — W. Hillebrand, Arch. f. Elektrot. Bd. 3, S. 114, 1915. — H. Rikli, E. u. M., Wien 1917, S. 249. — L. Fleischmann, Arch. f. Elektrot. Bd. 8, S. 203, 1919.

Für die Funktionen φ und ψ gelten die Ausdrücke:

	x beliebig	x klein	x groß
$\varphi(x) =$	$x \frac{\sin 2x + \sin x}{\cos 2x - \cos x}$	$1 + \frac{x^4}{11,25}$	x
$\psi(x) =$	$2x \frac{\sin x - \sin x}{\cos x + \cos x}$	$\frac{x^4}{3}$	$2x$

Die Wirbelstromverluste treten in dem in der Nut eingebetteten und vom Nutenstreifen durchsetzten Teil des Stabes ein. Bezeichnet l_n die Länge des Stabteils in der Nut, l_s die Länge des Stabteils außerhalb der Nut (in den Stirnverbindungen), λ das Verhältnis l_s/l_n , so ist das Verhältnis des Wechselstromwiderstandes r zum Gleichstromwiderstand r_0 des p -ten Stabes (p vom Nutengrund aus gezählt, alle Stäbe vom gleichen Strom durchflossen)

$$K_p = \frac{r}{r_0} = \frac{k_p + \lambda}{1 + \lambda}$$

mit

$$k_p = \varphi(x) + (p^2 - p)\psi(x)$$

Daraus folgt der Gesamtwiderstand aller Stäbe in einer Nut, wenn z die Zahl der übereinanderliegenden Stäbe ist, und wenn jeder Stab denselben Gesamtstrom führt, ausgedrückt in Teilen des Gleichstromwiderstandes, zu

$$K_z = \frac{R}{R_0} = \frac{k_z + \lambda}{1 + \lambda}$$

mit

$$k_z = \varphi(x) + \frac{z^2 - 1}{3} \psi(x)$$

Die Folge der Wirbelströme ist eine Zusammendrängung der Stromlinien an der oberen (äußeren) Kante des Stabquerschnittes (einseitige Hautwirkung)¹⁾.

Wird bei gegebener Stabzahl die Stabhöhe d vergrößert, so sinkt der Widerstand bis auf ein Minimum, um dann wieder anzusteigen. Das Widerstandsminimum tritt bei der sog. kritischen Stabhöhe

$$d_0 = \frac{1,3}{\alpha \sqrt{z}} \sqrt[4]{1 + \lambda}$$

ein und beträgt das 1,33fache des Gleichstromwiderstandes.

Wird bei gegebener Nuttiefe $D = zd$ die Stabzahl z erhöht, und wird wieder dafür gesorgt, daß jeder Stab den gleichen Strom führt, so kann das Widerstandsverhältnis zunächst wachsen, um erst bei weiterer Unterteilung des Leiters zu sinken. Die ungünstigste Stabzahl beträgt $z_u = 0,55 \alpha D$; man erhöht die Zahl der Stäbe zweckmäßig auf $z_k = 0,58 \alpha^2 D^2$, wobei das Widerstandsverhältnis gleich 1,33 wird.

Die Gleichheit der Ströme in den einzelnen Stäben ist bei Hintereinanderschaltung der Stäbe von selbst gegeben; bei der Parallelschaltung erreicht man sie durch Verschränkung der Stäbe (nach Hillebrand) oder durch magnetische Hilfskreise (nach Richter).

b) Gleichstrommaschinen. In jedem Ankerstabe fließt ein Wechselstrom, der bei richtiger Stromwendung nahezu trapezförmig verläuft. Die Wirbelstromverluste sind bei dieser Stromform größer als bei sinusförmigem Wech-

¹⁾ W. Steidinger (Arch. f. Elektrot. Bd. 12, S. 149, 1923) hat auch die Stromverdrängung an den radialen Seitenflächen des Stabes berechnet; ihr Einfluß ist aber unter den gewöhnlichen Verhältnissen gering.

selbststrom; im übrigen gelten in beiden Fällen ähnliche Beziehungen. Näheres bei L. Dreyfus, E. u. M. (Wien) 1914, S. 281 ff.; Arch. f. Elektrot. Bd. 3, S. 273, 1915.

c) Einankerumformer. Hier liegen die Verhältnisse ähnlich wie unter b); vgl. L. Dreyfus, Arch. f. Elektrot. Bd. 4, S. 42, 1915.

(120) Wirbelströme in zylindrischen Spulen¹⁾. Infolge der Wirbelströme wird die Stromdichte auf der dem Spulennern zugewandten Seite des Drahtes höher, auf der Außenseite niedriger als die mittlere (einseitige Hautwirkung). Die Widerstandserhöhung ist nach den unter (119a) angegebenen Formeln zu berechnen, wobei für b die Ganghöhe g einzusetzen ist. Ferner ist $\lambda = 0$ und $b' = d$. Bei runden Drähten vom Radius r hat man $d = 1,78 r$ zu setzen.

Zur Verminderung der Widerstandserhöhung wickelt man die Spule aus Litzendraht. Die Litze muß so hergestellt sein, daß jeder Einzeldraht gleich oft an jeder Stelle des Litzenquerschnitts liegt (z. B. durch mehrfache Verdrillung nach Dolezalek). Für eine Spule aus Litze mit rundem Querschnitt, die aus z Einzeldrähten vom Radius r besteht, ergibt sich das Widerstandsverhältnis mit

$$x = 1,78 \alpha r \quad \alpha = \frac{1}{50} \sqrt{f x \sqrt{z} \frac{1,78 r}{g}}$$

zu

$$k = \frac{R}{R_0} = \varphi(x) + \frac{w^2 z - 1}{3} \psi(x)$$

Die Funktionen φ und ψ haben die unter (119) angegebene Bedeutung; w ist die Zahl der Wicklungslagen.

Aus Untersuchungen Lindemanns sowie aus den vorstehenden Formeln ergibt sich, daß bei der Unterteilung des Drahtes zur Litze unter Umständen der Widerstand zuerst wächst und erst bei weiterer Unterteilung abnimmt. Der Grund ist derselbe wie bei den unter (119a) behandelten Ankerstäben.

(121) Wirbelströme in einem geraden Draht (Radius r in cm). Hier verursachen die Wirbelströme ein Zusammendrängen der Stromlinien am Rand des Querschnitts (allseitige Hautwirkung). Feldverteilung und effektiver Widerstand

werden durch eine einzige Größe $x = r \sqrt{f} \sqrt{\mu/q}$ bestimmt. $f = \pi \sqrt{\mu/q}$ ($= \pi \sqrt{\frac{\mu 10^{-5}}{\rho_1}}$,

wenn ρ_1 in Ohm für 1 m und 1 mm² ausgedrückt ist).

Für Cu mit $\rho_1 = 0,0175$ ist $f = 0,075$

„ Al „ $\rho_1 = 0,035$ „ $f = 0,053$

„ Zn „ $\rho_1 = 0,063$ „ $f = 0,040$.

Der Wirkwiderstand ergibt sich aus der Formel

$$\frac{R}{R_0} = x \sqrt{2} \frac{u_0 v_0' - u_0' v_0}{u_1^2 + v_1^2}$$

Darin bedeutet R_0 den Gleichstromwiderstand; die Größen u und v sind Funktionen von x , die durch die Gleichungen definiert sind:

$$\begin{aligned} \mathfrak{J}_n(2\sqrt{2} x \sqrt{-i}) &= u_n + i v_n \\ d\mathfrak{J}_n/d(2\sqrt{2} x) &= u_n' + i v_n' \end{aligned}$$

\mathfrak{J}_n ist die Besselsche Funktion erster Art von der n -ten Ordnung.

Zur angenäherten Berechnung des Wirkwiderstandes sind die folgenden Näherungsformeln bequem:

¹⁾ A. Sommerfeld, Ann. d. Phys. (4) Bd. 15, S. 687, 1904 — R. Lindemann, Verh. d. Deutsch. phys. Ges. 1910, S. 572. — W. Rogowski, Archiv f. Elektrot. Bd. 3, S. 264, 1915; Bd. 4, S. 61, 1915.

$$\begin{aligned} \text{für } x=0 \text{ bis } 0,8 & \quad \frac{R}{R_0} = 1 + \frac{x^4}{3} - \frac{4}{45} x^8 \\ \text{für } x=1,5 \text{ bis } 10 & \quad \frac{R}{R_0} = 0,997x + 0,277 \\ \text{für } x > 2 & \quad \frac{R}{R_0} = x + \frac{1}{4} + \frac{3}{64x} \end{aligned}$$

In dem Bereich $x=0,8$ bis $1,5$ ist keine dieser Formeln anwendbar; der Wirkwiderstand ist der folgenden Tafel zu entnehmen.

x	R/R_0								
0,70	1,07	0,90	1,18	1,10	1,35	1,25	1,50	1,40	1,66
0,75	1,09	0,95	1,22	1,15	1,40	1,30	1,56	1,45	1,72
0,80	1,11	1,00	1,26	1,20	1,45	1,35	1,61	1,50	1,77
0,85	1,14	1,05	1,31						

Zahlentafeln und Formeln der Besselschen Funktionen finden sich in den „Funktionentafeln“ von J a h n k e und E m d e, 1909.

Laufen Hin- und Rückleitung in geringem Abstände einander parallel (z. B. in Kabeln), so tritt eine einseitige Hautwirkung auf, die Stromlinien drängen sich auf den einander zugekehrten Seiten der beiden Querschnitte zusammen (G. M i e, Ann. d. Phys. (4) Bd. 2, S. 201, 1900).

Nach J. R. C a r s o n (Phil. Mag. Bd. 41, S. 607, 1921) läßt sich der Einfluß des benachbarten Rückleiters auf den Wirkwiderstand durch einen Korrektionsfaktor C berücksichtigen, der wie folgt zu berechnen ist.

Es sei r der Radius der beiden parallelen Leiter, d der Abstand ihrer Achsen, $y = r/d$. Ferner seien x , u_n , v_n und R die vorher erklärten Größen; also R der Wirkwiderstand eines Leiters mit konzentrischer oder weit entfernter Rückleitung, und CR der Wirkwiderstand eines Leiters der Doppelleitung von geringer Schleifenbreite. Dann berechne man die Hilfsgrößen

$$\begin{aligned} s &= (1 - \sqrt{1 - 4y^2})/2y^2 & w_n &= \frac{u_n v_n' - u_n' v_n}{u_n^2 - v_n^2} \\ g &= \frac{1}{2x} \frac{u_1(u_0 + v_0) - v_1(u_0 - v_0)}{u_0^2 + v_0^2} \\ S_1 &= \sum_{n=1}^{\infty} w_n y^2 s^{2n} & S_2 &= \sum_{n=1}^{\infty} n w_n y^2 s^{n+1} \end{aligned}$$

Hiermit ergibt sich der gesuchte Korrektionsfaktor

$$C = 1 + \frac{2\sqrt{2}f\rho}{rR} [S_1 - 2gy^2 S_2]$$

Die Werte der Funktion g können der folgenden Tabelle, die Werte der Funktionen w_n für $n = 1$ bis 4 (höhere n kommen gewöhnlich nicht in Betracht) können der Abb. 31 entnommen werden.

x	g	x	g	x	g	x	g
0	2,00	0,14	1,66	0,5	0,92	1,5	0,335
0,07	1,90	0,20	1,46	0,7	0,72	2,0	0,255
0,1	1,81	0,30	1,20	1,0	0,495	2,3	0,22

Für Werte von $x \cong 1,75$ ist näherungsweise

$$C \approx 1 + 2\sqrt{2} \left(1 - \frac{1}{4x}\right) \left(S_1 - \frac{y^2}{x} S_2\right)$$

Für noch größere Werte von x nähert sich C einer oberen Schranke

$$C_m = \frac{1 + y^2 s^2}{1 - y^2 s^2}$$

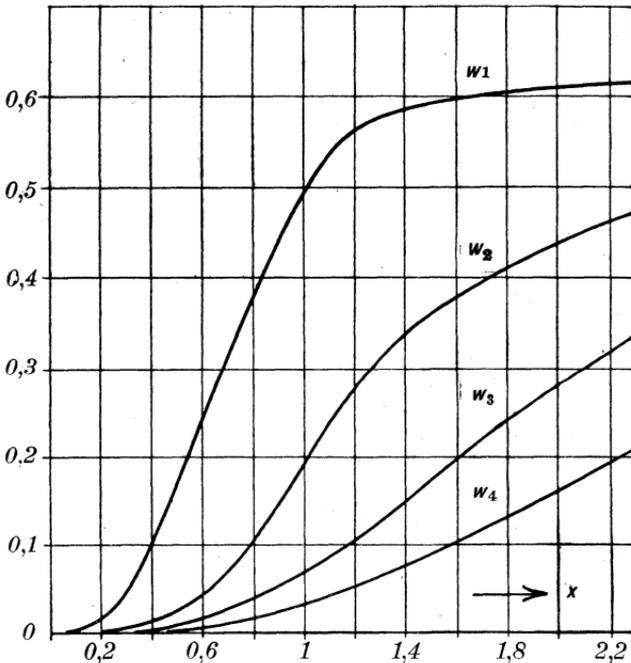


Abb. 31. Zur Berechnung der Hautwirkung.

und zwar asymptotisch nach der Formel

$$C \approx C_m (1 - A/x)$$

mit

$$A = \frac{y^2 s^2}{1 - y^4 s^4} \left[1 + 2 y^2 \left(\frac{1 - y^2 s^2}{1 - y^2 s} \right)^2 \right]$$

Der Höchstwert des Korrekturfaktors beträgt hiernach

für $y =$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
$C_m =$	1,020	1,050	1,092	1,155	1,25	1,40	1,67

In allen Fällen wächst die Wirbelstromwärme (der effektive Widerstand) zunächst — bei geringer Frequenz — proportional dem Quadrat der Frequenz; dann langsamer; zuletzt nur proportional der Quadratwurzel aus der Frequenz.

Die Stromverdrängung hat neben der Erhöhung des Widerstandes auch eine Verringerung der Induktivität zur Folge (Formeln bei Jahnke u. Emde,

a. a. O. S. 142 ff.); um diese Wirkung der Wirbelströme zu vermeiden, müssen Normalrollen für Selbstinduktion aus sehr dünnem Draht oder aus feindrähtigen Litzen hergestellt werden.

Für Leitungen aus Eisen sind die vorstehenden Formeln nicht anwendbar, weil die Permeabilität von der Stromstärke abhängt. Eingehende Versuche über die Widerstandserhöhung von Eisenleitungen bei Wechselstrom sind auf Veranlassung des Verbandes Deutscher Elektrotechniker ausgeführt und in seinen „Ausnahmebestimmungen während des Krieges“ (4. Aufl. 1917) abgedruckt worden (s. auch ETZ 1914, S. 1109; 1915, S. 44). Hiernach steigt das Widerstandsverhältnis R/R_0 mit zunehmender Stromdichte bis auf ein Maximum an, das für 3 bis 6 mm dicke Drähte bei 0,5 bis 1 A/mm² erreicht wird, um dann wieder abzunehmen. Der größte Widerstandszuwachs beträgt je nach der Drahtstärke 50 bis 150 % und hängt bei Litzendrähten (Seilen) auch von der Art der Vorseilung ab. Ferner wurde die Stromverdrängung in Eisenadrähten von G. Hilpert und H. Schleicher (Arch. f. Elektrot. Bd. 7, S. 144, 1918), L. Truxa (ebenda, Bd. 8, 1919, S. 137; Bd. 12, S. 354, 1923) und K. Zickler (Elektrot. u. Masch., Wien 1919, S. 449 und 1920, S. 165) untersucht.

Über die Wirbelströme im Bleimantel von Starkstromkabeln vgl. Allen, Electrician Bd. 89, S. 504, 1922.

(122) Wirksamer Widerstand. Der im vorhergehenden (119 bis 121) verwendete Begriff des wirksamen oder effektiven Widerstandes R eines Leiters für Wechselstrom von bestimmter Frequenz ist diejenige Größe, die mit dem Quadrat des Gesamtstromes multipliziert die gesamte Joulesche Stromwärme ergibt. Ein Gleichstrom verteilt sich so über den Querschnitt des Leiters, daß die Stromwärme möglichst klein wird; daher ist R stets größer als der Gleichstromwiderstand R_0 .

Der Begriff des wirksamen Widerstandes läßt sich noch weiter ausdehnen. Wenn z. B. Wechselstrom in einer Spule mit Eisenkern fließt, so daß außer in der Wicklung auch in dem Eisenkern elektromagnetische Energie nichtumkehrbar in Wärme verwandelt wird (durch Wirbelströme und Hysterese), so nennt man wirksamen Widerstand der Spule diejenige Größe R , die mit dem Quadrat des Stromes multipliziert, den gesamten vom Strome unmittelbar oder mittelbar (durch Vermittlung seines Magnetfeldes) hervorgerufenen Wärmeeffekt ergibt. Ganz allgemein kann man den wirksamen Widerstand R eines Stromzweiges durch die Gleichung

$$N = RI^2$$

bestimmen; darin ist I die Stromstärke, N die durch den Strom I dem Zweige zugeführte Leistung; dabei ist wesentlich, daß in dem Zweig keine fremde d. i. vom Strom unabhängige EMK wirkt.

(123) Widerstandszuwachs eines Krarupleiters. Nach dem Vorschlag von Krarup¹⁾ kann man die Induktivität von Leitungen (z. B. zum Telegraphieren und Fernsprechen) dadurch erhöhen, daß man den Leitungsdraht mit dünnem Eisendraht oder Eisenband umwickelt²⁾. In der Eisenhülle entstehen Wirbelströme; diesen entspricht nach dem vorhergehenden Absatz ein Widerstandszuwachs ΔR . Er beträgt für ein Eisenband der Dicke d und der Breite b , das um einen Leiter vom Radius r gewickelt ist

$$\Delta R = \frac{2}{3} F \left(1 - \frac{d}{2r}\right) \left(1 - 0,630 \frac{d}{b}\right) \frac{\text{Ohm}}{\text{km}}$$

¹⁾ ETZ 1902, S. 344; vgl. ferner das Engl. Pat. Nr. 27 265 v. J. 1903 von O. Lodge und A. R. Hardie.

²⁾ Formeln zur Berechnung des von der Eisenhülle herrührenden Induktivitätszuwachses in (109, 12 c).

Darin ist

$$F = \frac{\pi \mu^2 \omega^2 d^3}{\rho r} \cdot 10^{-4}$$

μ bedeutet die Permeabilität, ρ den spezifischen Widerstand des Eisens in absoluten elektromagnetischen Einheiten ($\rho \approx 1,2 \cdot 10^4$); ω ist die Kreisfrequenz. d und r sind in cm einzusetzen.

Besteht die Bewicklung aus Eisendraht, so ist in der Formel für $\mathcal{A}R$ zunächst $d = b$ zu setzen und dann noch der Füllfaktor $\pi/4$ hinzuzufügen.

Für Doppelleitungen ist der nach dem vorstehenden berechnete Widerstandszuwachs noch zu verdoppeln.

Energiebeziehungen im elektromagnetischen Felde; mechanische Kräfte.

(124) **Energiebeziehungen im Felde linearer Ströme**¹⁾. Das Energiegesetz nimmt hier die Form an (wenn man die Änderungen der elektrischen Energie vernachlässigt)

$$\delta A + \Psi dt = -dW_m$$

δA = Arbeit, die die mechanischen Kräfte elektromagnetischen Ursprungs bei einer unendlich kleinen Verschiebung und Gestaltsänderung der Stromkreise oder bei der Bewegung der Eisenmassen leisten.

$\Psi dt = \sum_{\alpha} I_{\alpha}^2 R_{\alpha} - E_{\alpha} I_{\alpha}$, die Zunahme der nichtelektromagnetischen Energie

[Joulesche Wärme + chemische Energie usw., (63) und (65)].

$-dW_m$ = Abnahme der magnetischen Energie (108) $dW_m = \partial_I W_m + \partial_B W_m$.

$\partial_I W_m$ = Teilzunahme von W_m bei festgehaltener Lage der Stromkreise wegen der Änderung der Ströme.

$\partial_B W_m$ = Teilzunahme von W_m bei konstanten Strömen wegen der Bewegung.

Grundgesetz. Es ist²⁾ $\delta A = +\partial_B W_m$.

Mechanische Arbeit = Teilzunahme der magnetischen Energie wegen der Lagenänderung bei konstant gedachten Strömen (auch wenn sich die Ströme bei der Bewegung tatsächlich ändern).

Beispiel. Für zwei Stromkreise ist

$$\begin{aligned} W_m &= \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + M_{12} I_1 I_2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 \\ \partial_B W_m &= \frac{1}{2} I_1^2 dL_1 + I_1 I_2 dM_{12} + \frac{1}{2} I_2^2 dL_2 \\ \partial_I W_m &= (L_1 I_1 + M_{12} I_2) dI_1 + (L_2 I_2 + M_{12} I_1) dI_2 \end{aligned}$$

(125) **Die mechanischen Kräfte** können oft einfach aus der Arbeit δA (124) bei einer virtuellen Verrückung der betreffenden Körper ermittelt werden. Manchmal sind sie aber auch bequem unmittelbar zu berechnen.

a) **Als Raumkräfte**. Ist \mathfrak{B} die Induktion, \mathfrak{H} die magnetische Feldstärke, μ die Permeabilität, c die Stromdichte im Raumteil dV , so wird die Kraft

$$\mathfrak{K} = \int dV \left\{ [c \mathfrak{B}] - \frac{1}{8\pi} \mathfrak{H}^2 \text{grad } \mu \right\}$$

$[c \mathfrak{B}]$ ist die Kraft auf einen homogenen Stromleiter; für einen vom Strom I Ampere durchflossenen und zum Magnetfeld senkrecht stehenden linearen Leiter von l cm Länge wird z. B. $\mathfrak{K} = 0,1 \mathfrak{B} I l$ dyn $\approx \mathfrak{B} I l \cdot 10^{-4}$ g*. \mathfrak{K} steht auf der Strom- und der Feldrichtung senkrecht. Das Glied $1/8\pi \cdot \mathfrak{H}^2 \text{grad } \mu$ ist die Kraft auf Eisen; sie sucht es so zu stellen, daß der Induktionsfluß möglichst groß wird.

¹⁾ Über die Anwendung dieser Beziehungen bei der Berechnung der Elektromagnete siehe F. E m d e, Elektrot. und Maschinenbau, 1906, S. 945; ETZ 1908, S. 817.

²⁾ Streng genommen nur, wenn μ konstant ist, d. h. im eisenfreien Felde; vgl. E. C o h n, Das elektromagn. Feld, S. 524 bis 526.

Wenn μ von \mathfrak{H} abhängt, so lautet dieses Glied¹⁾ $-\frac{1}{4\pi} \int_0^{\mathfrak{H}} (\mathfrak{H} \, d\mathfrak{H}) \operatorname{grad} \mu$.

b) Als Flächenkräfte, ebenso wie in (57, b). Der Betrag von \mathfrak{I} (s. 57, b) ist hier $\mu \mathfrak{H}^2 / 8\pi$; der Winkel zwischen der Flächennormalen und \mathfrak{I} wird durch \mathfrak{H} halbiert. Wendet man diese Darstellung auf ein Stück weiches Eisen an, so ergibt sich, daß jedes Oberflächenelement df einen senkrecht nach außen gerichteten Zug von der Stärke

$$df \left\{ \frac{\mathfrak{B}_n^2}{8\pi} \frac{\mu-1}{\mu} + \frac{\mathfrak{H}_t^2}{8\pi} (\mu-1) \right\} = df \frac{\mu-1}{8\pi} \mathfrak{H}_{\text{Eisen}} \mathfrak{H}_{\text{Luft}} = -\frac{df}{8\pi} \mathfrak{H}_{\text{Eisen}} \mathfrak{H}_{\text{Luft}} \cdot \operatorname{Grad} \mu$$

erfährt²⁾. \mathfrak{B}_n = Normalkomponente der Induktion. \mathfrak{H}_t = Tangentialkomponente der Feldstärke an der Oberfläche. Die häufig gebrauchte Näherungsformel $df \cdot \mathfrak{B}^2 / 8\pi$ ist also nur richtig, wenn μ groß ist und \mathfrak{H} auf der Oberfläche genau senkrecht steht; schon eine verhältnismäßig kleine Komponente \mathfrak{H}_t verursacht bei großem μ einen erheblichen Fehler der Näherungsformel³⁾.

(126) Der Energiestrom. Ist (56, 108)

$$W = \frac{1}{8\pi c^2} \int_V dV \varepsilon \mathfrak{E}^2 + \frac{1}{8\pi} \int_V dV \mu \mathfrak{H}^2$$

die gesamte in einem Raum V enthaltene elektromagnetische Energie, $Q = \int_Q c^2 dV$ die daselbst in der Sekunde entwickelte Joulesche Wärme (63), so ist die Abnahme der elektromagnetischen Energie $-\partial W / \partial t$ gleich der erzeugten Jouleschen Wärme, vermehrt um den durch die Oberfläche F des Raumes V austretenden elektromagnetischen Energiestrom $\int_F df \mathfrak{E}_n$:

$$-\frac{\partial W}{\partial t} = Q + \int_F df \mathfrak{E}_n$$

Es findet nämlich im elektromagnetischen Felde eine Energieströmung von der Dichte

$$\mathfrak{E} = \frac{[\mathfrak{E}, \mathfrak{H}]}{4\pi}$$

statt. Ihr Betrag ist gleich dem $\frac{1}{4\pi}$ fachen Inhalt des aus \mathfrak{E} und \mathfrak{H} konstruierten

Parallelogramms; ihre Richtung steht auf der elektrischen und magnetischen Feldstärke senkrecht. Wendet man diesen Satz z. B. auf eine elektrische Kraftübertragung an, so findet man, daß der Energiestrom im wesentlichen in dem Luftraum zwischen Hin- und Rückleitung (beim Kabel im Dielektrikum), und zwar parallel zu den Drahtachsen verläuft; nur ein geringer Teil des Energiestroms biegt seitlich ab und wandert in die Drähte hinein, um den Energieverlust durch Joulesche Wärme zu decken. Bei Dynamomaschinen beginnt der elektromagnetische Energiestrom auf der Ankeroberfläche und fließt dann zwischen den Drähten über den Kollektor nach dem Netze; vgl. Emde, Elektrot. u. Maschb. (Wien) 1909, Heft 40.

¹⁾ E. C o h n, Das elektromagnetische Feld (Leipzig 1900), S. 517; derselbe, ZS. f. Phys. 1923, Bd. 13, S. 48.

²⁾ F. E m d e, Elektrot. und Maschinenbau (Wien) 1906, S. 976, Fußnote; ebenda, 1910, S. 35; 1916, Heft 12 u. 13; Elektr. Kraftb. u. Bahnen, 1910, Heft 27. — W. K a u f m a n n, Müller-Pouillet's Lehrbuch d. Phys., 10. Aufl., Bd. 4, Abt. 1, S. 87. Braunschweig 1908.

³⁾ Vgl. hierzu die Dissertationen von K. E u l e r, Untersuchung eines Zugmagneten für Gleichstrom, Berlin 1911, und die Besprechung hierüber in der ETZ 1911, S. 1269, und von P. K a l i s c h, Beiträge zur Berechnung der Zugkraft von Elektromagneten, Breslau 1913, auch Archiv f. Elektrot. 1913, Bd. 1, S. 394, 458, 476. Ferner: F. E m d e, Auszüge aus J. C. M a x w e l l s Elektrizität u. Magnetismus, Braunschweig 1915, S. 121 ff.

(127) Elektromagnetische Wellen. Wenn sich in einem begrenzten Gebiete V die elektrische Feldstärke \mathfrak{E} oder die magnetische Feldstärke \mathfrak{H} ändert, so wird auch die Umgebung dieses Störungsgebietes nach und nach in Mitleidenschaft gezogen. t Sek. nach einer Feldänderung in V hat sich ein elektromagnetisches Feld außerhalb von V in einem Raum V_1 ausgebildet. Ist der Raum um V homogen und isotrop, so enthält V_1 alle Punkte, deren Entfernung von irgendeinem Punkte in V den Wert

$$s = vt \text{ cm} \left(v = 3 \cdot 10^{10} / \sqrt{\varepsilon \mu} \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right)$$

nicht überschreitet¹⁾. Die Grenze des Raumes V_1 ist die Fläche, die sämtliche Kugeln vom Radius s cm umhüllt, deren Mittelpunkte auf der Oberfläche von V liegen. V_1 wird also mit der Zeit immer größer und nähert sich mehr und mehr einer Kugel vom Radius vt , deren Mittelpunkt im Raum V liegt.

Daraus ergibt sich: Wenn die Feldstärken in V periodisch schwanken, so bildet sich eine mit der Geschwindigkeit v von V fortteilende elektromagnetische Welle aus, die in größerer Entfernung von ihrem Ursprung mehr und mehr in eine Kugelwelle übergeht. In der Kugelwelle steht die elektrische und die magnetische Feldstärke überall auf dem Radius senkrecht; der Energiestrom \mathfrak{S} (126) ist radial nach außen gerichtet.

Der Vorgang der Wellenausbreitung läßt sich durch die Anwendung des Induktionsgesetzes (112) und des Gesetzes vom magnetischen Kreis (103) in einfacher Weise erklären (K. W. Wagner, ETZ 1913, S. 1053).

Die elektromagnetischen Wellen wurden von H. Hertz zuerst experimentell nachgewiesen (1887), nachdem lange vorher Maxwell aus den Gesetzen des elektromagnetischen Feldes ihr Dasein erschlossen hatte. Maxwell hat auch zuerst erkannt, daß Wärme- und Lichtstrahlen elektromagnetische Wellenstrahlen von sehr kurzer Periodendauer (kleiner Wellenlänge) sind.

Die kürzesten bekannten elektromagnetischen Wellen sind die Röntgenstrahlen und die γ -Strahlen radioaktiver Elemente. Sie geben Kunde von den Störungen, die das elektromagnetische Feld im Innern des Atoms erfährt, wenn dieses entweder durch ein aufprallendes Elektron von hoher Geschwindigkeit (einen Kathodenstrahl) oder durch die explosionsartige Loslösung eines Elektrons aus dem Atomverband heftig erschüttert wird. (Vgl. A. Sommerfeld, Atombau u. Spektrallinien, 3. Aufl., Braunschweig 1923).

Die allseitige Ausbreitung elektromagnetischer Störungen in einem homogenen Raume wird beeinträchtigt, wenn man in diesen Raum Leiter hineinbringt; die Wellen gleiten in diesem Falle vorzugsweise an den Leitern entlang. So wirkt die leitende Erdoberfläche als Führung für die Wellen der drahtlosen Telegraphie. Die Führung ist um so vollkommener, je besser der führende Körper leitet; an Metalldrähten (Leitungen, Kabeln) geschieht deshalb die Wellenausbreitung im wesentlichen nur in Richtung der Drahtachse (146).

(128) Werte einiger Wellenlängen (in Luft).

Benennung der Erscheinung	Frequenz	Wellenlänge
Technischer Wechselstrom	50	6000 km
Sprachströme von	300	1000 km
bis	5000	60 km
im Mittel	800	375 km
Hochfrequenztelephonie auf Drähten		
von	6700	45 km
bis	50000	6 km

¹⁾ Birkeland, Archives de Genève, 1895, Bd. 34, S. 1; E. Cohn, Das elektromagn. Feld. S. 412.

Benennung der Erscheinung	Frequenz	Wellenlänge
Funktelegraphie von	13000	23000 m
bis	2 · 10 ⁷	15 m
Hertzsche Wellen, 1888	5 · 10 ⁸	60 cm
Schnellste elektrische Schwingungen Tear und Nichols, 1923 . . .	1,2 · 10 ¹²	0,025 cm
Längste bekannte Wärmestrahlen Quarzquecksilberlampe (Rubens und von Baeyer, 1911) . .	rd. 10 ¹²	im Mittel 0,0313 cm
Auerstrumpf (Rubens und Holl- nagel, 1910)	3 · 10 ¹²	0,01 cm
Rotes Licht	4 · 10 ¹⁴	7,5 · 10 ⁻⁵ cm
Violettes Licht	8 · 10 ¹⁴	3,8 · 10 ⁻⁵ cm
Kürzeste bekannte ultraviolette Strahlen (Millikan)	2,2 · 10 ¹⁶	1,4 · 10 ⁻⁶ cm
Röntgenstrahlen:		
Weichste bisher bekannte Eigen- strahlung (L-Serie des Kupfers)	2,3 · 10 ¹⁷	13 · 10 ⁻⁸ cm
Technische Röntgenstrahlung von . bis	3 · 10 ¹⁸ 5 · 10 ¹⁹	1 · 10 ⁻⁸ cm 0,06 · 10 ⁻⁸ cm
Härteste bekannte Eigenstrahlung (K-Serie, α ₁ -Linie des Urans) .	2,7 · 10 ¹⁹	0,11 · 10 ⁻⁸ cm
γ-Strahlen des Radiums und Meso- thoriums (Compton 1921) . .	1 · 10 ²⁰	0,03 · 10 ⁻⁸ cm

Lehrbücher der Theorie des elektromagnetischen Feldes.
 J. C. Maxwell, Treatise on electricity and magnetism, 2 vol., Oxford 1873; deutsch von Wein stein, Berlin 1883. — E. Mascart u. J. Joubert, Leçons sur l'électricité et le magnétisme, 2 vol., Paris 1882. — H. Poincaré, Electricité et optique, Paris 1890. — A. V as ch y, Traité d'Electricité et de Magnétisme, 2 vol., Paris 1890. — O. Heaviside, Electrical papers, 2 vol., London 1892. — Derselbe, Electromagnetic theory, 3 vol., London 1893, 1899, 1912. — J. J. Thomson, Notes on recent researches in electricity and magnetism. Oxford 1893. — E. Cohn, Das elektromagnetische Feld, Leipzig 1900. — A. Brahm - F ö p p l, Theorie der Elektrizität, Bd. 1, Leipzig 1894, 1904, 1907, 1912, 1918. — F. E m d e, Auszüge aus J. C. Maxwells Elektrizität und Magnetismus, Braunschweig 1915. — M. Planck, Einf. i. d. Theorie d. Elektrizität u. d. Magnetismus, Leipzig 1922.
 Elementare: J. Zenneck, Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie, Stuttgart 1905. — W. Kaufmann, Bd. 4, Abt. 1 von Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik, 10. Aufl., Braunschweig 1909. — G. Mie, Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Stuttgart 1910.

Veränderliche Ströme.

(129) **Wechselströme.** Über die Berechnung der Stärke, der Spannung und Leistung von Strömen wechselnder Stärke oder Richtung lauten die „Bestimmungen zur Ausführung des Gesetzes, betr. die elektrischen Maßeinheiten“ folgendermaßen:

- a) Als wirksame (effektive) Stromstärke — oder, wenn nichts anderes festgesetzt ist, als Stromstärke schlechthin — gilt die Quadratwurzel aus dem zeitlichen Mittelwerte der Quadrate der Augenblicksstromstärken;
- b) als mittlere Stromstärke gilt der ohne Rücksicht auf die Richtung gebildete zeitliche Mittelwert der Augenblicksstromstärken;
- c) als elektrolytische Stromstärke gilt der mit Rücksicht auf die Richtung gebildete zeitliche Mittelwert der Augenblicksstromstärken;
- d) als Scheitelstromstärke periodisch veränderlicher Ströme gilt deren größter Augenblickswert;
- e) die unter a) bis d) für die Stromstärke festgesetzten Bezeichnungen und Berechnungen gelten ebenso für die elektromotorische Kraft oder die Spannung;
- f) als Leistung gilt der mit Rücksicht auf das Vorzeichen gebildete zeitliche Mittelwert der Augenblicksleistungen.

Bezeichnet also I die Augenblicksstromstärke, T die Periodendauer, t_0 einen beliebigen festen Zeitpunkt, dt ein Zeiteilchen, so ist die

<p>effektive Stromstärke:</p> $I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} I^2 dt}$	<p>mittlere Stromstärke:</p> $I_{mittel} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} I dt$	<p>elektrolytische Stromstärke:</p> $I_{elektrolyt} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} I dt$
--	---	--

Die effektive Stromstärke ist der von Hitzdraht- und dynamometrischen Instrumenten angezeigte Wert und heißt darum im allgemeinen „Stromstärke“ schlechthin. Sie ist gleich derjenigen Gleichstromstärke, die in den genannten Instrumenten denselben Ausschlag hervorbringen würde wie der Wechselstrom. Die auch zur Messung der effektiven Stromstärke benutzten Ferraris- und Weich-eiseninstrumente können nur für eine Frequenz und für eine bestimmte Kurvenform genau geeicht werden; bei fester effektiver Stromstärke ändert sich ihr Ausschlag mit der Frequenz und mit der Kurvenform.

Ist E die Augenblicksspannung, so ist die Leistung des Wechselstromes

$$N = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} E I dt$$

(130) Sinusförmige Ströme. Für viele Fälle genügt es anzunehmen, daß Spannungen und Stromstärken sinusförmig verlaufen. Bei einem sinusförmigen Strom verhalten sich wirksame Stromstärke, mittlere Stromstärke und Scheitelstromstärke wie

$$\frac{1}{2} \sqrt{2} : \frac{2}{\pi} : 1 = 0,707 : 0,637 : 1$$

$$= 1,110 : 1 : 1,570 = 1 : 0,901 : 1,414$$

Eine sinusförmige EMK wird dargestellt durch die Gleichung

$$E = E_0 \sin \omega t, \text{ wo zur Abkürzung}$$

$$\omega = 2\pi f \text{ gesetzt ist.}$$

Darin bedeutet t die veränderliche Zeit, f die Zahl der Perioden in der Sekunde, d. i. die Frequenz, E_0 die Scheitelspannung, ω heißt die Kreisfrequenz.

Besitzt der Strom die Phasenverschiebung φ gegen diese Spannung, so ist er darstellbar in der Form

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

Ist φ positiv, so eilt der Strom in der Phase der Spannung voraus, ist φ negativ, so bleibt er um diesen Winkel in der Phase hinter der Spannung zurück.

Die Leistung eines Wechselstroms, dessen Spannung und Stromstärke dargestellt werden durch

$$E_0 \sin \omega t \text{ und } I_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

beträgt

$$\frac{1}{2} E_0 I_0 \cos \varphi - \frac{1}{2} E_0 I_0 \cos(2\omega t + \varphi)$$

also im Mittel

$$N = \frac{1}{2} E_0 I_0 \cos \varphi = E_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi$$

$\cos \varphi$ nennt man den Leistungsfaktor.

(131) Wechselströme von beliebiger Kurvenform. In der Regel wird die Form eines Wechselstromes innerhalb einer Periode nicht sinusförmig sein. Ein derartiger Wechselstrom von beliebiger Kurvenform läßt sich stets durch eine Fouriersche Reihe darstellen; diese hat allgemein die Form

$$I = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + I_2 \sin(2\omega t + \alpha_2) + I_3 \sin(3\omega t + \alpha_3) + \dots$$

d. h. der Strom kann angesehen werden als zusammengesetzt aus einer Gleichstromkomponente I_0 und aus Wechselströmen von verschiedenen Periodenzahlen,

die sich wie 1 : 2 : 3 ... verhalten. Diese nennt man auch die *h a r m o n i s c h e n* *K o m p o n e n t e n* des Wechselstromes; die langsamste Schwingung heißt *G r u n d s c h w i n g u n g*, die übrigen heißen die *O b e r s c h w i n g u n g e n*. Die Gleichstromkomponente I_0 hat auf den Verlauf der Wechselströme — von gewissen Ausnahmefällen abgesehen — keinen Einfluß und werde daher im folgenden außer Betracht gelassen. Die geradzahigen Komponenten können ausgelassen werden, wenn die positiven und negativen Hälften der Kurve spiegelbildlich gleich sind [d. h. wenn $I(t) = -I(t + \frac{1}{2}T)$ ist]; bei technischen Wechselströmen trifft dies meistens zu. Der Effektivwert des Stromes ist:

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2} (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots)}$$

Der Strom I sei von einer EMK E erzeugt von der Gleichung

$$E = E_1 \sin(\omega t + \beta_1) + E_2 \sin(2\omega t + \beta_2) + E_3 \sin(3\omega t + \beta_3) + \dots$$

Dann ist die Leistung

$$N = \frac{1}{2} [E_1 I_1 \cos(\alpha_1 - \beta_1) + E_2 I_2 \cos(\alpha_2 - \beta_2) + E_3 I_3 \cos(\alpha_3 - \beta_3) + \dots]$$

Wie man sieht, liefert eine Spannungs-komponente nur mit einer Stromkomponente von gleicher Frequenz einen Beitrag zur Leistung. Man setzt $N = k \cdot E_{eff} \cdot I_{eff}$ und nennt k den Leistungsfaktor. Dieser ist kleiner als 1 und kann daher rechnungsmäßig gleich $\cos \varphi$ gesetzt werden; man nennt dann φ die wirksame Phasenverschiebung. Nur wenn $\alpha_1 = \beta_1, \alpha_2 = \beta_2, \dots$ und $E_1 : I_1 = E_2 : I_2 = \dots$ ist, wird $k = 1$. (Vgl. E. O r l i c h, Theorie der Wechselströme, Leipzig 1912, Abschnitt 13 und 16.)

(132) Bestimmung der harmonischen Komponenten eines Wechselstromes.

a) Liegt ein analytischer Ausdruck für die Stromkurve vor, etwa $I = F(t)$, wobei F eine periodische Funktion mit der Periode T sein soll, so wünscht man I in der Form

$$I = F(t) = A_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + \dots \\ + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + \dots$$

darzustellen. Dabei ist $\omega = \frac{2\pi}{T}$, ferner (vgl. 131)

$$I_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad \text{tg } \alpha_k = \frac{A_k}{B_k} \quad \text{oder} \\ A_k = I_k \sin \alpha_k \quad B_k = I_k \cos \alpha_k$$

Die Koeffizienten A_k und B_k ergeben sich nun wie folgt

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt \\ A_k = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos k\omega t dt \quad B_k = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin k\omega t dt$$

Besitzt die Kurvenform $F(t)$ gewisse Symmetrien, so lassen sich diese Ausdrücke noch vereinfachen.

b) Ist die Stromkurve empirisch gegeben, etwa als Oszillogramm, so teile man das Periodenintervall in eine Anzahl r gleicher Teile und bestimme die zugehörigen Ordinaten y_λ ($\lambda = 1, 2, \dots, r$); dann ist

$$A_0 = \frac{1}{r} \sum_{\lambda=1}^r y_\lambda \\ A_k = \frac{2}{r} \sum_{\lambda=1}^r y_\lambda \cos k \frac{2\pi \lambda}{r} \quad B_k = \frac{2}{r} \sum_{\lambda=1}^r y_\lambda \sin k \frac{2\pi \lambda}{r}$$

Die Zahl r der Teile muß gleich oder größer sein als $2k+1$.

(133) Darstellung verschiedener periodischer Kurven durch Fouriersche Reihen.

(Abb. 32a bis m.)

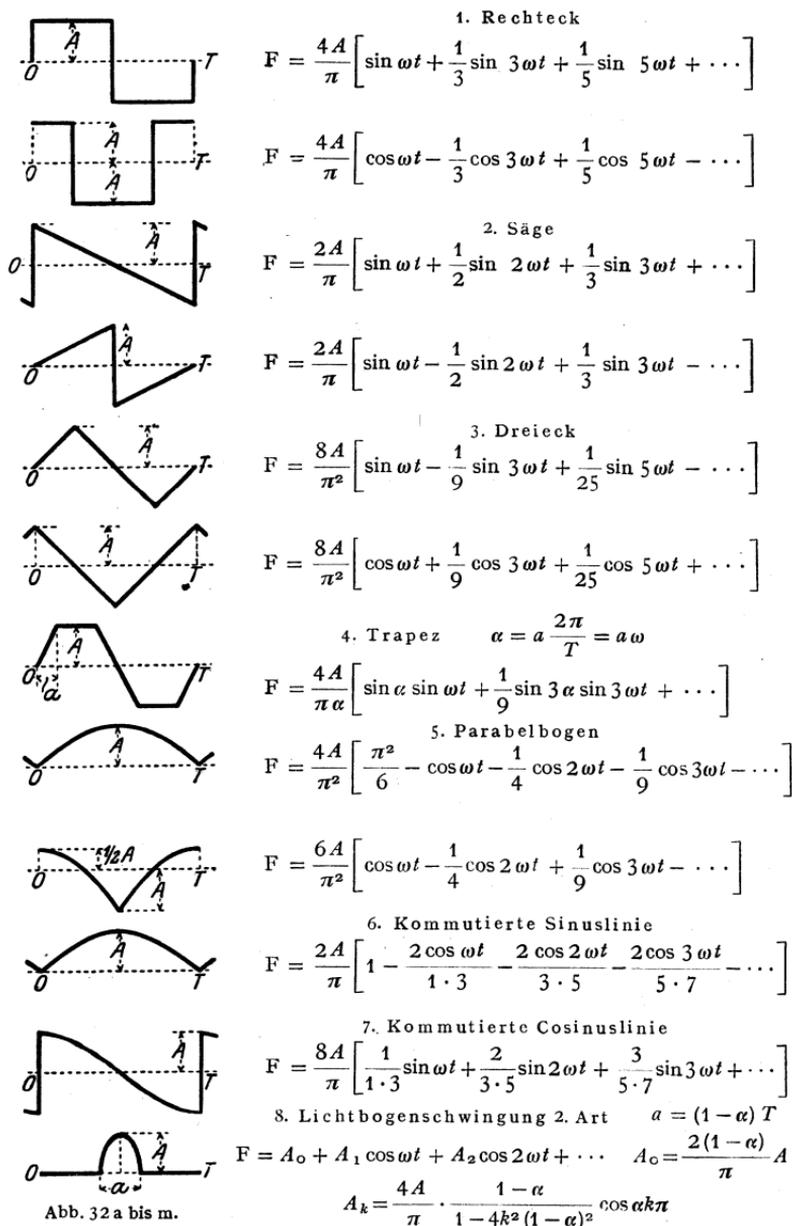


Abb. 32a bis m.

9. Reihenentwicklungen von Kurven, die sich aus Bögen von Hyperbelfunktionen zusammensetzen, findet man bei L. Dreyfus, Archiv f. Elektrot. 1919, Bd. 7, S. 388.

Ein einfaches Rechenschema zur Bestimmung der ersten zwölf Koeffizienten ($r=24$) ist von C. Runge angegeben worden (ETZ 1905, S. 247). Hat man öfter derartige Berechnungen auszuführen, so bedient man sich zweckmäßig des von C. Runge und F. Emde herausgegebenen Formulars (zu beziehen von F. Vieweg & Sohn), welches die Rechnungen nebst Probe vollkommen schematisch auszuführen gestattet.

Weitere Verfahren s. (238).

(134) Polardiagramm der Wechselstromgrößen.

1. Eine EMK oder ein Strom, der sich als Sinusfunktion der Zeit ansehen läßt (130), kann dargestellt werden durch die Projektionen eines Strahles, der sich um seinen Endpunkt dreht. Ist $E = E_0 \sin \omega t$, so bedeutet E_0 die Länge des Strahles, ω die Geschwindigkeit, mit der er sich dreht. Die Drehrichtung und den Strahl, von dem aus der Winkel gerechnet wird, kann man willkürlich festsetzen. Die Internationale Elektrotechnische Kommission hat 1911 festgesetzt: Bei der graphischen Darstellung periodisch veränderlicher elektrischer oder magnetischer Größen wird die Phasenvoreilung durch die der Uhrzeigerdrehung entgegengesetzte Richtung dargestellt. In den folgenden Beispielen ist außerdem angenommen, daß der Anfangsstrahl wagerecht nach rechts liegt. Vgl. Abb. 33. OD = Anfangsstrahl, der Pfeil unter C gibt die Drehrichtung.

Noch zweckmäßiger ist es, sich die die EMK und Ströme darstellenden Strahlen als ruhend und eine Zeitlinie als rotierend zu denken mit einer Drehrichtung wie der Uhrzeiger. Die Momentanwerte sind die Projektionen der Strahlen auf diese Zeitlinie. Vgl. Abb. 33, der Strahl T ist die Zeitlinie.

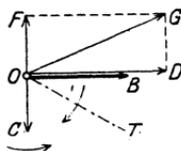


Abb. 33. Selbstinduktivität in Reihe mit einem Widerstand.

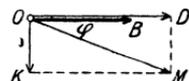


Abb. 34. Kapazität in Reihe mit einem Widerstand.

2. Nach vorstehendem kann man jeder sinusförmig veränderlichen Größe (Spannung oder Stromstärke) einen Strahl in der Zeichenebene zuordnen. Die Länge des Strahls gibt die Amplitude der sinusförmig veränderlichen Größe, sein Winkel φ mit dem Anfangsstrahl bestimmt die Phasenverschiebung der betrachteten Größe gegen die dem Anfangsstrahl entsprechende Sinusgröße. Die den sinusförmig veränderlichen Größen zugeordneten Strahlen nennt man ihre Diagrammvektoren¹⁾; diese bilden in ihrer Gesamtheit das Vektordiagramm.

3. Die EMK der Selbstinduktion ist um 90° hinter der Stromstärke zurück. Bedeutet (Abb. 33) OB den Strom I , OD die Spannung IR , so ist $OC = \omega LI$; OD ist zugleich der Teil der äußeren EMK, der zur Hervorbringung des Stromes I im Widerstand R dient, während $OF = -OC$ der Teil der äußeren EMK ist, der zur Überwindung der Selbstinduktion dient; dieser Teil liegt um 90° vor dem Strom; die gesamte äußere EMK ist demnach $= OG$. Die Beziehungen $\operatorname{tg} \varphi = \omega L/R$ und $I = E/\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ können aus dem Diagramm abgelesen werden.

¹⁾ Nicht mit den physikalischen Vektoren (\mathcal{E} , \mathcal{H} , \mathcal{B} u. a.) zu verwechseln, die einen von der Richtung im Raum abhängigen physikalischen Zustand, nicht eine zeitliche Änderung veranschaulichen.

In Abb. 34 ist wieder OB der Strom, OD die Spannung IR , OK die Spannung an einem hinter R geschalteten Kondensator C , nämlich $I/C\omega$; OM ist die gesamte äußere EMK; $\operatorname{tg} \varphi = -1/\omega CR$; ferner

$$I = E / \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

4. Bei Hintereinanderschaltung von Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität hat man eine einfache Dreieckskonstruktion; wagrecht nach rechts wird das Produkt des Stromes mit der Summe aller Widerstände aufgetragen, die senkrechte Kathete ist $= I(L\omega - 1/C\omega)$, wobei der positive Wert nach oben gerichtet ist. Die Hypotenuse ist die Gesamtspannung nach Größe und Richtung.

5. Ist zu Widerstand und Selbstinduktion eine Kapazität parallel geschaltet, so wird über der Spannung zwischen den Verzweigungspunkten als Durchmesser OA (Abb. 35) ein Kreis geschlagen. $OB = I_1 R$ und $AB = I_1 \omega L$ sind die Komponenten der Spannung für den Zweig mit Selbstinduktion und Widerstand; $OI_1 = I_1$ ist die Stromstärke in diesem Zweige. Da der andere Zweig keinen Widerstand enthält, so ist $OA = I_2/\omega C$. Der Ladestrom I_2 für den Kondensator muß dieser Spannung um 90° vorausseilen; also $I_2 = OI_2$; der Gesamtstrom OI setzt sich aus den Komponenten OI_1 und OI_2 zusammen. Verlängert man OI bis zum Schnittpunkte C mit dem Kreise, so ist OC gleich dem Produkt aus I und dem wirksamen Gesamtwiderstand zwischen den Verzweigungspunkten, also $OI \times OC$ der Energieverbrauch.

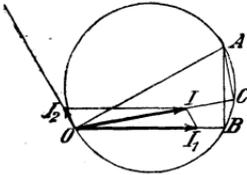


Abb. 35. Drosselspule (Selbstinduktivität mit Widerstand) parallel zu einem Kondensator.

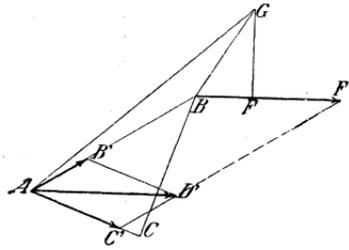


Abb. 36. Mehrfach zusammengesetzter Stromkreis.

6. Hinter eine Stromschleife, von der ein Zweig aus einer Selbstinduktion L_1 und dem Widerstand R_1 , der andere aus einem induktionslosen Widerstand R_2 besteht, sei eine Selbstinduktion L vom Widerstande R geschaltet. Sind i_1 , i_2 , I bzw. die Stromstärken in den drei Zweigen, so zeichne man zunächst ein rechtwinkliges Dreieck ABC (Abb. 36), so daß die Katheten $BC : CA = \omega L_1 : R_1$, dann kann $AC = i_1 R_1$, $BC = \omega L_1 i_1$ gesetzt werden; da AB die Spannung an den Enden der Stromschleife ist, so ist gleichzeitig $AB = i_2 R_2$. Man mache $AB' = AB : R_2 = i_2$ und $AC' = AC : R_1 = i_1$, so ist die Resultante AD' gleich der Stromstärke I in R . Zieht man also BF' parallel und gleich AD' und macht $BF = BF' \cdot R$, und $FG = \omega L \cdot BF'$, so ist BG die Spannung an der Selbstinduktion L und somit AG die Gesamtspannung.

(135) **Wirk- und Blindgrößen.** Ist E die effektive Spannung zwischen den Enden eines Stromzweiges, I der darin fließende effektive Strom, N die im Zweig verbrauchte Leistung, so nennt man

$$R_s = E/I \text{ den Scheinwiderstand des Zweiges,}$$

$$R_w = N/I^2 \text{ den Wirkwiderstand des Zweiges,}$$

$$R_b = \sqrt{R_s^2 - R_w^2} \text{ den Blindwiderstand des Zweiges,}$$

$$G_s = I/E \text{ den Scheinleitwert des Zweiges,}$$

$$\begin{aligned}
 G_w &= N/E^2 \text{ den Wirkleitwert des Zweiges,} \\
 G_b &= \sqrt{G_s^2 - G_w^2} \text{ den Blindleitwert des Zweiges,} \\
 E_w &= N/I \text{ die Wirkspannung am Zweige,} \\
 E_b &= \sqrt{E^2 - E_w^2} \text{ die Blindspannung am Zweige,} \\
 I_w &= N/E \text{ den Wirkstrom im Zweige,} \\
 I_b &= \sqrt{I^2 - I_w^2} \text{ den Blindstrom im Zweige,} \\
 N_s &= EI \text{ die Scheinleistung im Zweige,} \\
 N_b &= \sqrt{(EI)^2 - N^2} \text{ die Blindleistung im Zweige,} \\
 F &= N/EI \text{ den Leistungsfaktor,} \\
 B &= N_b/EI \text{ den Blindfaktor.}
 \end{aligned}$$

Statt Scheinleistung ist neuerdings für Fälle, in denen das Wort Scheinleistung Mißverständnisse verursachen könnte, der Name Richtleistung vorgeschlagen worden.

Die Anwendung dieser Begriffe auf die in (134) betrachteten Beispiele ergibt folgendes.

In Abb. 33 ist OD die Wirkspannung, DG die Blindspannung an der Spule.

In Abb. 34 ist OD die Wirkspannung, DM die Blindspannung.

In Abb. 35 ist OB die Wirkspannung, AB die Blindspannung an der Spule, dagegen OC die Wirkspannung, AC die Blindspannung an der gesamten Anordnung. Man sieht, daß durch das Parallelschalten des Kondensators zur Spule die Blindspannung (und auch die Blindleistung) herabgesetzt wird.

Während die Leistung den Energieverbrauch darstellt, entspricht die Blindleistung einem Hin- und Herpendeln von Energie zwischen dem betrachteten Stromzweig und dem übrigen Teil des Stromkreises. Dieses Pendeln hat man sich so vorzustellen, daß die Energie in den Energiespeichern des Zweiges (als magnetische Energie in den Drosseln, als elektrische Energie in den Kondensatoren, als kinetische Energie in trägen Massen, als potentielle Energie in gespannten Federn usw.) zeitweise aufgespeichert und dann wieder abgegeben wird.

(136) Komplexe Rechnung. Um von der Genauigkeit der Zeichnungen nicht abzuhängen, ist es häufig bequem, das Vektordiagramm in die Sprache der Algebra zu übersetzen. Ein Vektor I von der Amplitude I_0 und dem Phasenwinkel φ kann durch die komplexe Zahl

$$\mathfrak{I} = I_0 e^{i\varphi} = I_0 \cos \varphi + i I_0 \sin \varphi = a + bi$$

ausgedrückt werden, wenn man die Ebene des Vektordiagramms als Gaußsche Zahlenebene auffaßt¹⁾. Für den Übergang von der zweiten Form auf die erste hat man die Formeln

$$I_0 = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \operatorname{tg} \varphi = b/a.$$

Wegen der Ausführung solcher Zahlenrechnungen siehe (3) und (16).

Da der Differentialquotient einer Sinuskurve

$$d/dt [I_0 \sin(\omega t + \varphi)] = I_0 \omega \sin(\omega t + \varphi + \pi/2)$$

einen Vektor bedeutet, der dem Vektor \mathfrak{I} um 90° voreilt, so wird er beim komplexen Rechnen durch die Zahl

$$\omega I_0 e^{i(\varphi + \pi/2)} = i \omega I_0 e^{i\varphi} = i \omega \mathfrak{I}$$

dargestellt. Daraus ergibt sich zum Beispiel:

¹⁾ Man ersieht hieraus, daß das darauf gegründete Rechnungsverfahren ebenso wie das Vektordiagramm nur auf bereits stationär gewordene oder eingeschwungene Wechselstromvorgänge anwendbar ist. Die Drehung des Vektordiagramms läßt sich durch den Faktor $e^{i\omega t}$ zum Ausdruck bringen, der einen Vektor bedeutet, der den Betrag 1 hat und sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω um den Nullpunkt dreht. Man wird das mit Vorteil dort tun, wo Vektoren von verschiedenen ω unterschieden werden sollen.

1. die Spannung \mathfrak{B} an einer Spule vom Widerstand r und der Selbstinduktivität L beim Strome \mathfrak{Z}

$$\mathfrak{B} = (r + i\omega L) \mathfrak{Z} \quad V_0 = I_0 \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2} \quad \text{tg}(\mathfrak{B}, \mathfrak{Z}) = \omega L / r$$

$\mathfrak{R} = r + i\omega L$ ist der Widerstandsoperator, $\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2} = |\mathfrak{R}|$ der Scheinwiderstand (die Impedanz) der Spule; ωL ist ihr Blindwiderstand.

2. Der Strom \mathfrak{Z} durch eine an der Spannung \mathfrak{B} liegende Parallelschaltung aus der Kapazität C und dem Widerstand r

$$\mathfrak{Z} = \left(\frac{1}{r} + i\omega C \right) \mathfrak{B}$$

$$I_0 = V_0 \sqrt{r^{-2} + \omega^2 C^2} \quad \text{tg}(\mathfrak{Z}, \mathfrak{B}) = r\omega C$$

$1/i\omega C$ ist der Widerstandsoperator, $i\omega C$ der Leitwertoperator der Kapazität C ; $1/\omega C$ ihr Scheinwiderstand, ωC ihr Scheinleitwert. $(1/r) + i\omega C$ ist der Leitwertoperator der Verbindung r neben C .

3. Der Strom \mathfrak{Z} durch eine Reihe aus dem Widerstand r , der Induktivität L , der Kapazität C bei der Spannung \mathfrak{B} berechnet sich aus

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{Z} (r + i\omega L + 1/i\omega C)$$

$$V_0 = I_0 \sqrt{r^2 + \left(L\omega - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad \text{tg}(\mathfrak{B}, \mathfrak{Z}) = \frac{L\omega - 1/\omega C}{r}$$

4. Durch fortgesetzte Anwendung dieser Regeln können die Stromverhältnisse in jedem aus Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten beliebig zusammengeschalteten Kreise berechnet werden.

5. Die Leistung des Stromes $\mathfrak{Z} = a + ib$ mit der Spannung $\mathfrak{B} = c + id$ beträgt $N = ac + bd$, die Blindleistung $N_b = |ad - bc|$. Diese Ausdrücke lehren, daß man zur Berechnung der Leistungsgrößen entweder den komplexen Strom \mathfrak{Z} mit der konjugiert komplexen Spannung $k(\mathfrak{B}) = c - id$ multiplizieren muß, oder die komplexe Spannung \mathfrak{B} mit dem konjugiert komplexen Strom $k(\mathfrak{Z})$. Und zwar ist

$$N = \text{Reeller Teil von } \mathfrak{Z}k(\mathfrak{B}) \text{ oder von } \mathfrak{B}k(\mathfrak{Z})$$

$$N_b = \text{Betrag des imaginären Teils von } \mathfrak{Z}k(\mathfrak{B}) \text{ oder von } \mathfrak{B}k(\mathfrak{Z})$$

6. Zusammenfassung. Der große Vorteil des komplexen Rechnungsverfahrens ist hiernach, daß jedes auf stationäre Wechselströme bezügliche Problem im wesentlichen auf ein Gleichstromproblem zurückgeführt wird; nur hat man an Stelle der Ohmschen Widerstände oder Leitwerte überall die komplexen Operatoren. Es ist meistens nützlich, für diese zunächst einfache Buchstaben (wie oben $\mathfrak{R}, \mathfrak{Z}$ u. a.) zu setzen, und ihre besondere Bedeutung erst am Ende der Rechnung einzuführen. Erscheint das Schlußergebnis in der Form

$$\mathfrak{Z} = I_0 e^{i\varphi} = \frac{\alpha + \beta i}{\gamma + \delta i}, \text{ so folgt } I_0 = \sqrt{\frac{\alpha^2 + \beta^2}{\gamma^2 + \delta^2}}; \text{ tg } \varphi = \frac{\beta\gamma - \alpha\delta}{\alpha\gamma + \beta\delta}.$$

(137) Allgemeine Gleichungen des Wechselstromkreises. Führt man einem beliebig zusammengesetzten Wechselstromkreise an irgendeiner Stelle a bei der Spannung \mathfrak{B}_a den Strom \mathfrak{Z}_a zu und entnimmt dem Kreise an irgendeiner anderen Stelle e bei der Spannung \mathfrak{B}_e den Strom \mathfrak{Z}_e , so bestehen zwischen den Spannungen und Strömen lineare Gleichungen¹⁾, die man in der Form

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{B}_a &= \mathfrak{R}_1 \mathfrak{B}_e + \mathfrak{B} \mathfrak{Z}_e \\ \mathfrak{Z}_a &= \mathfrak{R}_2 \mathfrak{Z}_e + \mathfrak{C} \mathfrak{B}_e \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

¹⁾ A. Franke, ETZ 1891, S. 461.

schreiben kann. Die komplexen Konstanten $\mathfrak{A}_1, \mathfrak{A}_2, \mathfrak{B}, \mathfrak{C}$ sind durch die elektrischen Konstanten des Stromkreises und durch die Betriebsfrequenz bestimmt. Zwischen ihnen besteht ferner die Gleichung

$$\mathfrak{A}_1 \mathfrak{A}_2 - \mathfrak{B} \mathfrak{C} = 1 \dots \dots \dots (2)$$

Vertauscht man die Stromzuführungsstelle mit der Stromabnahmestelle, so kehren sich die Stromrichtungen um, d. h. \mathfrak{I}_a geht in $-\mathfrak{I}_a$, \mathfrak{I}_e in $-\mathfrak{I}_e$ über; die Gleichungen lauten alsdann, nach \mathfrak{B}_e und \mathfrak{I}_e aufgelöst,

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{B}_e &= \mathfrak{A}_2 \mathfrak{A}_a + \mathfrak{B} \mathfrak{I}_a \\ \mathfrak{I}_e &= \mathfrak{A}_1 \mathfrak{I}_a + \mathfrak{C} \mathfrak{A}_a \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

Die Konstanten $\mathfrak{A}_1, \mathfrak{A}_2, \mathfrak{B}, \mathfrak{C}$ sind durch einfache Leerlauf- und Kurzschlußmessungen zu bestimmen. Führt man den Strom bei a zu, so wird nach Gl. (1)

$$\text{der Leerlaufwiderstand } (\mathfrak{I}_e = 0) \quad \mathfrak{U}_{1a} = \frac{\mathfrak{A}_1}{\mathfrak{C}}$$

$$\text{der Kurzschlußwiderstand } (\mathfrak{B}_e = 0) \quad \mathfrak{U}_{2a} = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{A}_2}$$

Wird der Strom bei b zugeführt, so ergibt sich aus Gl. (3)

$$\text{der Leerlaufwiderstand } (\mathfrak{I}_a = 0) \quad \mathfrak{U}_{1e} = \frac{\mathfrak{A}_2}{\mathfrak{C}}$$

$$\text{der Kurzschlußwiderstand } (\mathfrak{B}_a = 0) \quad \mathfrak{U}_{2e} = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{A}_1}$$

Eine Probe auf die Richtigkeit der Messung ergibt sich aus der Beziehung

$$\frac{\mathfrak{U}_{1a}}{\mathfrak{U}_{2a}} = \frac{\mathfrak{U}_{1e}}{\mathfrak{U}_{2e}}$$

Hat man die Leerlauf- und Kurzschlußwiderstände gemessen, so kann man unter Zuhilfenahme der Gl. (2) die Konstanten $\mathfrak{A}_1, \mathfrak{A}_2, \mathfrak{B}, \mathfrak{C}$ des Kreises berechnen. (Näheres bei J. L. La Cour, Leerlauf- und Kurzschlußversuch in Theorie und Praxis, Braunschweig 1904.)

Wird der Kreis bei e mit einem Wechselstromwiderstand \mathfrak{R} belastet, so ist die in \mathfrak{R} verbrauchte Leistung dann am größten, wenn \mathfrak{R} dem Betrage nach gleich, der Phase nach entgegengesetzt ist demjenigen Widerstand, den man von e aus mißt, wenn der Generator bei a angeschlossen, aber nicht erregt ist. (H. Salinger, Telegr. u. Fernsprechtechnik, 1922, Bd. 11, S. 114, 125. — K. H. Warfvinge, Arch. f. Elektrot. 1922, Bd. 11, S. 189.)

Die Strömungsvorgänge in einigen wichtigen Stromkreisen einfacher Art.

(138) Induktionsspule vom Widerstand R und der Selbstinduktivität L an einer EMK, die das Zeitgesetz $E = f(t)$ befolgt. Der Strom gehorcht der Differentialgleichung (114):

$$E = f(t) = RI + L \frac{dI}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

Wenn zur Zeit $t=0$ der Strom $= I_0$ sein soll, so wird

$$I = \frac{1}{L} \int_0^t e^{-\frac{\vartheta-t}{T}} f(\vartheta) d\vartheta + I_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

$T = L/R$ ist die Zeitkonstante der Spule. Schaltet man z. B. eine Spule mit einer Gleichspannung $f(t) = E = \text{const}$ ein ($I_0 = 0$), so folgt durch Ausführung der Integration:

$$I = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \dots \dots \dots (2)$$

Der Strom erreicht also seinen stationären oder Endwert E/R nicht so gleich; an diesem fehlen noch $b\%$ nach der Zeit $T \log \text{nat} (100/b)$. Z. B. fehlen zu den Zeiten t

$= T$	$2T$	$3T$	$4T$	$5T$	$6T$
noch 36,8	13,5	5,0	1,8	0,7	0,2%

Beim Einschalten einer Wechselspannung $E = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$ wird

$$I = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t + \varphi - \psi) - e^{-\frac{t}{T}} \sin(\varphi - \psi) \right] \dots (3)$$

$$\text{tg } \psi = \omega T = \omega L/R$$

Die Stromkurve ist hiernach in der ersten Zeit nach dem Einschalten nicht sinusförmig; erst wenn das zweite Glied unmerklich geworden ist, ergibt sich der stationäre oder eingeschwingene Stromverlauf.

In Spulen mit hochgesättigtem Eisenkern werden die Stromstöße beim Einschalten sehr stark. Für diesen Fall schreibt man die Differentialgleichung besser in der Form

$$E = E_0 \sin \omega t = R I + \frac{d\Phi}{dt} \dots (4)$$

wo $\Phi = L I$ den mit der Spule verketteten Induktionsfluß bedeutet. Der Zusammenhang von Φ und I ist durch die Magnetisierungskurve OP_1P_2 (Abb. 37) gegeben; L ist daher keine Konstante mehr. Vernachlässigt man in erster Näherung den Ohmschen Spannungsfall $R I$, so ist die Lösung von (4) für den Beharrungszustand

$$\Phi = -\Phi_0 \cos \omega t \text{ mit } \Phi_0 = \frac{E_0}{\omega} \dots (5)$$

Zu dem Fluß Φ_0 gehört der normale Magnetisierungsstrom I_0 (Abb. 37). Der durch Gl. (5) beschriebene Beharrungszustand kann sich aber nicht ohne weiteres einstellen, wenn man in dem Zeitpunkt einschaltet, in dem die Wechselspannung E durch Null geht ($t=0$). Hier müßte $\Phi = -\Phi_0$ sein, während tatsächlich die Spule noch kein Magnetfeld enthält. Mit der Anfangsbedingung $\Phi=0$ für $t=0$ lautet die Lösung der Differentialgleichung:

$$\Phi = \Phi_0 (1 - \cos \omega t) \dots (6)$$

Das Feld schwingt also nicht um den Nullwert, sondern um den Wert Φ_0 und erreicht infolgedessen nach einer halben Periode den Maximalwert $\Phi_M = 2\Phi_0$. Zu ihm gehört nach der Magnetisierungskurve (Abb. 37) ein Stromwert I_M , der den normalen Magnetisierungsstrom um ein Vielfaches übersteigt (in der Größenordnung des Hundertfachen bei Transformatoren mit Kernen aus hochlegiertem Eisenblech).

Zur genaueren Bestimmung von I_M darf man den Ohmschen Spannungsfall nicht vernachlässigen; schon durch verhältnismäßig bescheidene Werte von IR wird I_M stark herabgesetzt. Nach Rüdenberg kann man den Widerstandswert, der nötig ist, um den größten Stromstoß nicht über das n -fache des Magnetisierungsstromes wachsen zu lassen, folgendermaßen ermitteln. Aus der Magnetisierungskurve ergibt sich der zu $I_M = n I_0$ gehörige Maximalwert des Feldes $\Phi_M = m \Phi_0$. Dann berechne man die Größe

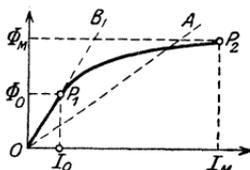


Abb. 37. Magnetisierungsstrom einer Drossel.

$$r = \frac{m}{n \pi} \log \text{nat} \frac{1}{m-1}$$

Sie bedeutet den im gesuchten Widerstand von dem (bekannten) Strome I_0 hervor-
 gebrachten Spannungsfall, ausgedrückt in Teilen der Betriebsspannung: $r = I_0 R / E_0$.
 Somit ist $R = r E_0 / I_0$. Zwecks Begrenzung des Einschaltstromstoßes schaltet
 man größere Transformatoren, Asynchronmotoren und Asynchrongeneratoren mit-
 tels Schutzschalters (Schalter mit Vorkontakt und Widerstandsstufe) ein
 (W. Linke, Arch. f. Elektrot. 1912, Bd. 1, S. 16, 69).

Verfahren zur Zeichnung der Stromkurven beim Einschalten von Spulen mit
 Eisenkern sind von A. Hay¹⁾ und A. Schwaiger²⁾ angegeben worden.

Wird die Spule mit dem Strom I_0 im Moment $t=0$ plötzlich kurzgeschlossen
 [$f(t)=0$], so verklingt der Strom nach dem Gesetz

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{T}} \dots \dots \dots (7)$$

Wird der Strom durch Abschalten der Stromquelle nach dem Gesetz
 $I = I_0 (1 - t/\tau)$ auf Null gebracht, so entwickelt die Spule während der Unter-
 brechungszeit τ die EMK $E = L I_0 / \tau$. Zur Verhütung gefährlicher Spannungen
 beim Abschalten von Spulen verwendet man u. a. folgende Mittel. a) Man schaltet
 der Spule einen Kondensator, einen kleinen Nebenschlußmotor, einen Widerstand
 oder eine Reihe Zersetzungszellen parallel; b) man versieht sie mit einer kurz-
 geschlossenen „Dämpferwicklung“³⁾ (s. u. 142, Beisp. 3); c) vor dem Abschalten
 wird eine entmagnetisierende Wicklung hinzugeschaltet.

(139) Kapazität C und Widerstand R in Reihe an der Spannung $E = f(t)$.
 Die Spannung v am Kondensator ist aus der Differentialgleichung

$$f(t) = v + R I = v + R C \frac{dv}{dt} = v + T \frac{dv}{dt} \dots \dots \dots (8)$$

zu bestimmen. $T = R C$ ist die Zeitkonstante dieses Stromkreises. Es ergibt sich

$$v = \frac{1}{T} \int_0^t e^{-\frac{\vartheta-t}{T}} f(\vartheta) d\vartheta + v_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

v_0 = Spannung im Moment $t=0$. Für das Einschalten des ungeladenen Kondensators
 ($v_0=0$) erhält man

a) bei der Gleichspannung $f(t) = E = \text{const}$

$$v = E \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \dots \dots \dots (9)$$

Der Ladestrom $I = C dv/dt$ wird

$$I = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{T}} \dots \dots \dots (10)$$

b) Bei der Wechselspannung $f(t) = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$

$$v = \frac{E_0}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}} \left[\sin(\omega t + \varphi - \psi) - e^{-\frac{t}{T}} \sin(\varphi - \psi) \right] \dots \dots (11)$$

$$\text{tg } \psi = \omega T = \omega C R.$$

$$I = \frac{E_0 C \omega}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}} \left[\cos(\omega t + \varphi - \psi) + \frac{1}{\omega T} e^{-\frac{t}{T}} \sin(\varphi - \psi) \right] \dots \dots (12)$$

1) The Electrical Review 1898, Bd. 43, S. 326.
 2) Elektrot. und Maschinenbau (Wien) 1909, S. 633, 658.
 3) Wegen der Wirkungsweise und zweckmäßigen Bemessung siehe K. W. Wagner,
 Elektrot. und Maschinenbau (Wien) 1909, Heft 35, 36.

(140) Induktivität L , Kapazität C , Widerstand R in Reihe an der Spannung $f(t)$. Für den Strom I gilt

$$f(t) = L \, dI/dt + RI + \int I \, dt/C$$

oder

$$q(t) = f'(t)/L = I'' + I' R/L + I/LC$$

Wenn keine äußere Spannung wirkt [$f(t) = 0$, $q(t) = 0$], wie etwa bei der Entladung von C über R und L , so erscheint I in der Form

$$I = e^{-\alpha t} (A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t) \dots \dots \dots (13)$$

(freie Schwingung). $\alpha = R/2L = \text{Dämpfungsexponent}$;

$$\omega_0 = \sqrt{1/LC - \alpha^2}$$

ist die 2π fache Eigenfrequenz des Kreises. $2\pi\alpha/\omega_0 = d$ ist gleich dem natürlichen Logarithmus des Verhältnisses zweier aufeinanderfolgender gleichsinniger Amplituden und heißt daher das logarithmische Dekrement der Schwingung.

Mit zunehmendem Dämpfungsexponent α wird die Eigenfrequenz niedriger. Ist $LC\alpha^2 = R^2C/4L \geq 1$, so wird $\omega_0 = 0$, bzw. imaginär; das heißt, an Stelle der Schwingung tritt ein aperiodischer Abklingvorgang.

Für eine aufgedrückte Spannung $f(t)$ wird

$$I = \frac{1}{L\omega_0} \int_0^t f'(\vartheta) e^{-\alpha(t-\vartheta)} \sin \omega_0(t-\vartheta) \, d\vartheta + \frac{I'(0) + \alpha I(0)}{\omega_0} e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t + I(0) e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t. \dots \dots (14)$$

$I(0)$, $I'(0)$ = Werte von I und dI/dt für $t=0$

Bei einer Wechselspannung $f(t) = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$ wird

$$I = E_0 \frac{R \sin(\omega t + \varphi) - (L\omega - 1/C\omega) \cos(\omega t + \varphi)}{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2} - E_0 e^{-\alpha t} \frac{R \sin(-\omega_0 t + \varphi) - (L\omega - 1/C\omega) \cos(-\omega_0 t + \varphi)}{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2} + \frac{I'(0) + \alpha I(0)}{\omega_0} e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t + I(0) e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t. \dots \dots (15)$$

Das erste Glied stellt die erzwungene Schwingung, die übrigen drei stellen die freie Schwingung dar; diese verklingt bald nach dem Einschalten; der Wechselstrom ist alsdann stationär geworden (hat sich eingeschwungen). Für die Frequenz $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$ wird der stationäre Strom ein Maximum; er liegt dann in Phase mit der Spannung: $I = (E_0/R) \sin(\omega t + \varphi)$. Die Resonanzfrequenz ω_r stimmt mit der Eigenfrequenz nicht genau überein ($\omega_0^2 = \omega_r^2 - \alpha^2$); der Unterschied ist jedoch praktisch zumeist verschwindend.

Eigentümliche Resonanzerscheinungen treten ein, wenn die Drosselspule einen geschlossenen Eisenkern hat, so daß L nicht konstant ist, sondern stark vom Strom abhängt. Ein Kreis mit einer derartigen Spule hat überhaupt keine eigentliche Resonanzfrequenz; dafür gibt es einen Frequenzbereich, in dem der aufgenommene Strom davon abhängt, welche Stromstärke und Frequenz vorher auf den Kreis eingewirkt hat. (O. Martienssen, ETZ 1910, S. 204; W. Petersen, ETZ 1915, S. 353; 1916, S. 129; siehe auch die anschließende Erörterung ETZ 1916, S. 148 und S. 252; Schunk u. Zenneck, Jahrb. f. drahtlose Telegr. 1922, Bd. 19, S. 170.) Vgl. hierzu ferner G. Duffing, „Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz und ihre technische Bedeutung“, Braunschweig 1918.

(141) Ausgleichsvorgänge. Allgemeines. Wirkt auf einen elektrischen Stromkreis eine zeitlich konstante oder eine periodisch veränderliche EMK, so stellt sich nach Ablauf einiger Zeit ein Zustand ein, bei dem im ersten Falle alle Spannungen und Ströme zeitlich konstant, im zweiten Falle alle Spannungen und Ströme periodisch veränderlich sind, und zwar mit der Periode der EMK. Dieser sogenannte „Beharrungszustand“ kann sich aber im allgemeinen nicht sogleich nach dem Einschalten der EMK einstellen aus folgendem Grunde: Der Beharrungszustand erfordert in jedem Zeitpunkt eine bestimmte Verteilung der elektromagnetischen Energie W im Stromkreise, entsprechend den vorgeschriebenen Strömen I in den Spulen L und den vorgeschriebenen Spannungen U an den Kondensatoren C .

$$W = \sum \frac{1}{2} LI^2 + \sum \frac{1}{2} CU^2$$

Da der Zustand des Stromkreises vor dem Einschalten der EMK von dem unter der Einwirkung der EMK eintretenden Beharrungszustand verschieden ist, wird auch die im Augenblick des Einschaltens noch bestehende Energieverteilung von der Energieverteilung im Beharrungszustand abweichen. Die Energieverteilung kann sich aber nicht plötzlich ändern, da eine plötzliche Energieänderung eine unendlich große Leistung bedingen würde. Da alle Leistungen endlich bleiben müssen, kann sich die Energie nur stetig ändern; d. h. der Beharrungszustand kann nicht sofort nach dem Einschalten, sondern nur allmählich eintreten.

Man kann nun den tatsächlichen Zustand nach dem Einschalten dadurch beschreiben, daß man sich den Beharrungszustand sofort eingetreten denkt, ihm jedoch einen „Ausgleichsvorgang“ überlagert, der so beschaffen ist, daß er den stetigen Anschluß des Endzustandes an den Anfangszustand vermittelt. Sind U_a, I_a die Spannungen und Ströme des Anfangszustandes, U_e, I_e dieselben Größen im Beharrungszustande und U_f, I_f diese Größen für den Ausgleichsvorgang, so muß zunächst im Einschaltmoment $t=0$ an jedem Kondensator

$$U_a = U_e + U_f \dots \dots \dots (1a)$$

und in jeder Spule

$$I_a = I_e + I_f \dots \dots \dots (1b)$$

sein. Ist ferner E die (konstante oder periodisch veränderliche) EMK, so liefern die Gesetze des Stromkreises eine oder mehrere lineare Beziehungen von der Form

$$E = \mathcal{P}(U_e + U_f, I_e + I_f) \dots \dots \dots (2)$$

\mathcal{P} enthält auch Ableitungen nach der Zeit; die vorstehende Gleichung ist somit als Differentialgleichung aufzufassen. Sie gilt auch noch für den Beharrungszustand:

$$E = \mathcal{P}(U_e, I_e) \dots \dots \dots (3)$$

Da nun die Gleichungen linear sind, so folgt durch Differenzbildung

$$0 = \mathcal{P}(U_f, I_f) \dots \dots \dots (4)$$

Diese Gleichung lehrt die Ausgleichsspannungen und die Ausgleichsströme berechnen; sie zeigt, daß der Ausgleichsvorgang in seinem Ablaufe von der Art und Größe der EMK völlig unabhängig ist. Man nennt deshalb die Ausgleichsspannungen und -ströme auch „freie“ Spannungen und Ströme und den Ausgleichsvorgang einen „freien“ Vorgang. Da er nicht von einer EMK aufrechterhalten wird, muß sich sein Energievorrat allmählich erschöpfen, d. h. die U_f und I_f müssen im Laufe der Zeit verklingen, so daß in der Tat zuletzt nur der Beharrungszustand übrig bleibt.

(142) Beispiele.

1. Für den Fall der Spule (138) entspricht die Gleichung

$$E = RI + L \frac{dI}{dt}$$

unserer Gl. (2). Daher lautet die Gleichung zur Berechnung des Ausgleichsstromes (Gl. 4)

$$0 = R I_f + L \frac{d I_f}{dt}$$

Ihre Lösung ist

$$I_f = I_f(0) e^{-\frac{t}{T}}$$

$I_f(0)$ ist der Anfangswert des Ausgleichsstromes.

Beim Einschalten der vorher stromlosen Spule muß er den Beharrungsstrom gerade aufheben. Dies ergibt für den Fall einer konstanten EMK den Wert

$$I_f(0) = -\frac{E}{R}$$

und den Gesamtstrom als Summe des Ausgleichsstromes und des Beharrungsstromes

$$I = I_f + \frac{E}{R} = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

wie in (138), Gl. (2) angegeben.

Für das Einschalten einer Wechsel-EMK drückt Gl. (3) in (138) die Lösung aus; das erste Glied in der Klammer entspricht dem Beharrungsstrom, das zweite Glied dem Ausgleichsstrom.

2. Beim Stromkreis mit Induktivität, Kapazität und Widerstand ist der Ausgleichsvorgang die freie Schwingung (Gl. 13 in 140).

3. Bemerkenswert ist auch der Ausgleichsvorgang in einem Gebilde aus zwei magnetisch miteinander verketteten Kreisen (allgemeiner Transformator) (Abb. 38). Die Gleichungen dieser Anordnung sind (114)

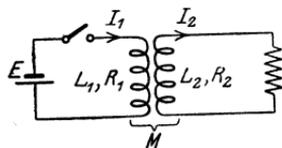


Abb. 38. Zwei magnetisch verkettete Kreise.

$$E = R_1 I_1 + L_1 \frac{d I_1}{dt} + M \frac{d I_2}{dt}$$

$$0 = R_2 I_2 + L_2 \frac{d I_2}{dt} + M \frac{d I_1}{dt}$$

Mit $E=0$ ergeben diese Gleichungen die Ausgleichsströme. Wir führen die folgenden Begriffe ein: $T_1 = L_1/R_1$ und $T_2 = L_2/R_2$ seien die Zeitkonstanten der beiden Kreise für sich; ferner ist

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

die Streuziffer. Endlich bedeutet $I_\mu = I_1 + \frac{M}{L_1} I_2$ den auf den Primärkreis bezogenen Magnetisierungsstrom. Dann regelt sich der Verlauf der Ausgleichsströme nach den folgenden Gesetzen¹⁾:

$$I_1 = I_\mu(0) \frac{T_1}{T_1 + T_2} e^{-\frac{t}{\tau_1 + A_2}} e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

$$\frac{M}{L_1} I_2 = I_\mu(0) \frac{T_2}{T_1 + T_2} e^{-\frac{t}{\tau_1 - A_2}} e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

¹⁾ Diese Beziehungen sind nicht vollkommen streng; sie gelten um so genauer, je enger die Kreise miteinander verkettet sind, d. h. je kleiner σ ist. Vgl. K. W. Wagner, Elektrot. u. Maschb., Wien 1909, S. 804, 829.

d. h. in jeder der beiden Wicklungen setzt sich der Ausgleichsstrom aus zwei Teilen zusammen; der eine verklingt nach einem Exponentialgesetze mit der Zeitkonstante τ_1 , der andere mit der Zeitkonstante τ_2 . Dabei ist

$$\tau_1 = T_1 + T_2 \quad \tau_2 = \sigma \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$$

Bei enger magnetischer Verketzung, also geringer Streuung (σ klein) ist τ_2 viel kleiner als τ_1 ; der eine Teil des Ausgleichsstromes verklingt demnach viel schneller als der andere.

Der langsame Ausgleichsvorgang entspricht dem Energieausgleich des Hauptfeldes, der schnelle Ausgleichsvorgang dem Energieausgleich des Streufeldes. In welcher Stärke die beiden Vorgänge auftreten, richtet sich nach den Anfangsbedingungen (Gl. 1 b). Diese ergeben für die freien Ströme die Werte $I_1(0)$ und $I_2(0)$; danach berechnen sich die Konstanten $I_\mu(0)$ und A_2 aus

$$I_\mu(0) = I_1(0) + \frac{M}{L_1} I_2(0)$$

$$A_2 = \frac{T_2 I_1(0) - T_1 \frac{M}{L_1} I_2(0)}{T_1 + T_2}$$

Für den Fall des Einschaltens einer Gleichstrom-Magnetspule mit Dämpferwicklung wird $E = \text{const.}$, $I_1(0) = -\frac{E}{R_1}$, $I_2(0) = 0$. Der Anstieg des Stromes in der Spule ist in Abb. 39 dargestellt.

(143) Die Regel von Heaviside. Es liege ein mechanisches oder elektromagnetisches System mit beliebig vielen Freiheitsgraden (Koordinaten) vor. Das System befinde sich zunächst im Gleichgewichte. In einem bestimmten Zeitpunkt ($t=0$) werde das Gleichgewicht plötzlich dadurch gestört, daß an irgendeiner Stelle P des Systems eine eingeprägte Kraft K (z. B. eine EMK) zu wirken beginnt (etwa infolge eines Schaltvorganges). Die Kraft K möge weiterhin ($t>0$) konstant bleiben. Unter ihrer Wirkung wird das System einem neuen Gleichgewichtszustand zustreben. Gefragt ist, wie das vor sich geht. Die Frage kann als beantwortet gelten, wenn man für jede veränderliche Systemgröße S (Strom, Spannung usw.) den zeitlichen Verlauf, d. h. die Funktion $S(t)$ von $t=0$ bis ∞ angeben kann. Bezüglich des Systems wird natürlich vorausgesetzt, daß die Systemgrößen durch lineare Beziehungen miteinander verknüpft sind, z. B. durch lineare Differential- oder Differenzgleichungen.

Heaviside¹⁾ gibt folgende Regel an. Man denke sich zunächst das System in einer erzwungenen Bewegung, bei der alle Systemgrößen das Zeitgesetz konst. e^{pt} befolgen. Diese Bewegung soll dadurch zustande kommen, daß an der Stelle P eine eingeprägte Kraft von der Größe e^{pt} tätig ist. Unter der Wirkung dieser besonderen Kraft wird die gesuchte Systemgröße den Wert

$$S_p = \frac{e^{pt}}{Z}$$

¹⁾ Electromagnetic Theory, Bd. 2, S. 127. London 1899.

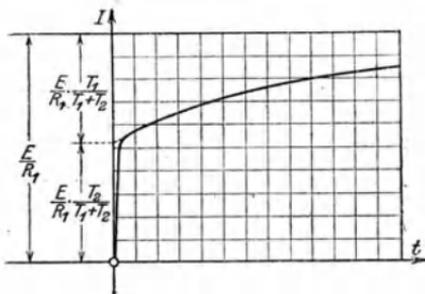


Abb. 39. Anstieg des Stromes beim Einschalten einer Magnetspule mit Dämpferwicklung.

annehmen. Z ist eine Funktion von p , die sich dadurch ergibt, daß man in die Systemgleichungen für die einzelnen veränderlichen Größen Ausdrücke der Form konst. e^{pt} einführt und alle Größen bis auf die gesuchte Größe S eliminiert. Z heiße die „Stammfunktion“ von S .

Man bestimme nunmehr die Wurzeln der „Stammgleichung“

$$Z = 0$$

Sie seien mit

$$p_1, p_2, p_3, \dots, p_n \dots$$

bezeichnet. Es sind die sogenannten „Eigenwerte“ des Systems. Dann gibt der Ausdruck

$$S = \frac{K}{Z(0)} + K \sum_n \frac{e^{p_n t}}{p_n Z'(p_n)} \dots \dots \dots (1)$$

den gesuchten zeitlichen Verlauf der Systemgröße S unter der Einwirkung einer an der Stelle P im Zeitpunkt $t=0$ plötzlich auftretenden, dann konstant bleibenden Kraft K an. $Z(0)$ ist der Wert von Z für $p=0$; Z' die Ableitung (der Differentialquotient) von Z nach p .

Die Eigenwerte p_n sind im allgemeinen komplex von der Form $p_n = -\alpha_n \pm i\omega_n$; das Glied mit $e^{p_n t}$ bedeutet alsdann eine gedämpfte Eigenschwingung mit dem Dämpfungsexponenten α_n und der Kreisfrequenz ω_n .

Beispiele für die Anwendung der Heavisideschen Regel gibt K. W. Wagner im Arch. f. Elektrot. Bd. 4, S. 159 ff., 1915. Dort ist auch angegeben, wie die Entwicklung umzuformen ist, wenn mehrere Eigenwerte einander gleich werden, so daß $Z'(p_n) = 0$ wird.

Die Heavisidesche Regel gilt auch für das Einschalten mit Wechselstrom, wo also die im Zeitpunkt $t=0$ plötzlich auftretende Kraft weiterhin das Zeitgesetz $K = K_0 e^{i\omega t}$ befolgt. In diesem Falle lautet die Entwicklung

$$S = \frac{K_0 e^{i\omega t}}{Z(i\omega)} + K_0 \sum_n \frac{e^{p_n t}}{(p_n - i\omega) Z'(p_n)} \dots \dots \dots (2)$$

Das erste Glied auf der rechten Seite der Gl. (1) oder (2) ergibt den Beharrungszustand, das zweite den Ausgleichsvorgang.

(144) Spannungs- und Stromverteilung in Kabeln und Freileitungen. Allgemeines. Sind R, G, L, C die wirksamen Werte ¹⁾ des Ohmschen Widerstandes, der Ableitung, der Selbstinduktivität, der Kapazität für die Längeneinheit, und bezeichnet I den Strom, U die Spannung (zwischen Hin- und Rückleitung) am Ort x zur Zeit t , so gilt

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = RI + L \frac{\partial I}{\partial t} \qquad -\frac{\partial I}{\partial x} = GU + C \frac{\partial U}{\partial t}$$

Wegen der Werte von C siehe (54), von L siehe (109). Die Ableitung oberirdischer Leitungen hängt vom Isolationszustand ab und bewegt sich in der Größenordnung von 0,1 bis 2,0 $\mu S/km$.

Die Ableitung von Kabeln ist vornehmlich durch die dielektrischen Verluste bestimmt (50) und aus Kapazität, Kreisfrequenz und dielektrischem Verlustwinkel nach der Formel

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta$$

zu berechnen.

(145) Beharrungszustand bei Wechselstrom. Befindet sich die Leitung in einem Stromkreis, in dem eine EMK $E_0 \sin(\omega t + \varphi)$ tätig ist, so wird nach einer Weile der Strom I und die Spannung U längs der ganzen Leitung ebenfalls sinusförmig sein:

$$U = U(x) \sin[\omega t + \varphi(x)] \qquad I = I(x) \sin[\omega t + \psi(x)]$$

¹⁾ Dießelhorst und Emde, ETZ 1909, S. 1155, 1184.

Die Amplituden $U(x)$, $I(x)$ und die Phasenwinkel $\varphi(x)$, $\psi(x)$ ändern sich von Punkt zu Punkt. Die Berechnung gestaltet sich am übersichtlichsten auf komplexem Wege (136), indem man die komplexen Spannungs- und Stromvektoren

$$\mathfrak{U}_x = U(x) e^{i\varphi(x)} \quad \text{und} \quad \mathfrak{I}_x = I(x) e^{i\psi(x)}$$

einführt. Dann bestehen zwischen den Spannungen und Strömen am Anfang der Leitung (\mathfrak{U}_0 , \mathfrak{I}_0) und im Abstände x vom Anfang die Beziehungen¹⁾ [vgl. auch (137)]:

$$\begin{aligned} \mathfrak{U}_x &= \mathfrak{R}\mathfrak{U}_0 - \mathfrak{B}\mathfrak{I}_0 & \text{oder } 2) & & \mathfrak{U}_0 &= \mathfrak{P}\mathfrak{I}_0 - \mathfrak{Q}\mathfrak{U}_x \\ \mathfrak{I}_x &= \mathfrak{R}\mathfrak{I}_0 - \mathfrak{C}\mathfrak{U}_0 & & & \mathfrak{I}_0 &= \mathfrak{Q}\mathfrak{I}_0 - \mathfrak{P}\mathfrak{U}_0 \\ \mathfrak{R} &= \mathfrak{C} \operatorname{Co}f \gamma x & \mathfrak{B} &= \mathfrak{B} \operatorname{Si}n \gamma x & \mathfrak{C} &= 3^{-1} \operatorname{Si}n \gamma x \\ \mathfrak{P} &= \mathfrak{B} \operatorname{Co}t \gamma x & \mathfrak{Q} &= 3 \frac{1}{\operatorname{Si}n \gamma x} & \mathfrak{Z}^2 &= \frac{R+i\omega L}{G+i\omega C} = \mathfrak{P}^2 - \mathfrak{Q}^2 \\ & & & & \gamma^2 &= (\beta + i\delta)^2 = (R+i\omega L)(G+i\omega C) \end{aligned}$$

γ = Fortpflanzungskonstante, β = Dämpfungskonstante, δ = Winkelmaß, \mathfrak{B} = Wellenwiderstand oder Charakteristik der Leitung für Wechselstrom der Kreisfrequenz ω .

$$2\beta^2 = RG - LC\omega^2 + \sqrt{(RG - LC\omega^2)^2 + \omega^2(LG + RC)^2}$$

angenähert

$$\beta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L} + \frac{G}{2}} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{für } \omega L \gg R \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}} \quad \text{für } \omega L \ll R$$

Bei festliegendem \mathfrak{I}_0 , \mathfrak{U}_0 bewegen sich die Endpunkte der Vektoren \mathfrak{I}_x , \mathfrak{U}_x auf logarithmischen Spiralen³⁾. Wendet man die Gleichungen auf das Leitungsende $x=l$ an, so erkennt man, daß zwischen den Strömen und Spannungen der Enden lineare Gleichungen (mit komplexen Koeffizienten) bestehen:

$$\begin{aligned} \mathfrak{U}_0 &= \mathfrak{R}\mathfrak{I}_l + \mathfrak{B}\mathfrak{I}_l \\ \mathfrak{I}_0 &= \mathfrak{R}\mathfrak{U}_l + \mathfrak{C}\mathfrak{U}_l \end{aligned}$$

Bei der Berechnung von Fernspreitleitungen ist als mittlere Frequenz der Sprechströme $f=800$ ($\omega=5000$) einzusetzen.

Das Auftreten der Hyperbelfunktionen in den Größen \mathfrak{R} , \mathfrak{B} , \mathfrak{C} kann so gedeutet werden, daß zu einer vom Anfang nach dem Ende der Leitung laufenden Welle noch eine reflektierte tritt, die zurückläuft. (Diese reflektierte Welle des Beharrungszustandes ist nicht zu verwechseln mit den nachstehend unter (146) behandelten Wanderwellen.) Ist der Endwiderstand $\mathfrak{R} = \mathfrak{B}$, so wird

$$\mathfrak{U}_0 = e^{\gamma l} \mathfrak{U}_l \quad \mathfrak{I}_0 = e^{\gamma l} \mathfrak{I}_l$$

d. h. die reflektierte Welle verschwindet. Diese Bedingung ist nicht identisch mit der der größten Leistungsaufnahme in \mathfrak{R} (vgl. 137).

(146) Ausgleichsvorgänge [vgl. auch (932)]. Unmittelbar nach dem Ein- oder Ausschalten der Leitung oder nach irgendeiner Veränderung des Stromkreises lagern sich den stationären Werten V , I freie Schwingungen über, die mitunter Überspannungen und Überströme zur Folge haben. Die freie Schwingung kann im allgemeinen in der Form dargestellt werden⁴⁾:

1) A. Franke, ETZ 1891, S. 458. — F. Breisig, ETZ 1899, S. 383.
 2) Pleijel, Bd. 4 der Veröff. der 2. Int. Konf. von Technikern der Staatstelegraphen- und Fernsprechverwaltungen; Paris 1910.
 3) F. Breisig, ETZ 1900, S. 87.
 4) K. W. Wagner, Elektromagnet. Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln, Leipzig 1908. ETZ 1908, S. 707. — Oszillographische Aufnahmen verschiedener Ausgleichsvorgänge sind in der ETZ 1914, S. 899, 928, 947 und 1912, S. 1289 und 1321 mitgeteilt. — W. Petersen, Wanderwellen als Überspannungserreger. Archiv f. Elektrot. Bd. 1, 1912, S. 233; Überspannungen und Überspannungsschutz, ETZ 1913, S. 167 ff.

$$U_f = e^{-\alpha t} \left\{ F_1(x - vt) + F_2(x + vt) \right\}$$

$$I_f = e^{-\alpha t} \sqrt{\frac{L}{C}} \left\{ F_1(x - vt) - F_2(x + vt) \right\}$$

$$\alpha = R/2L + G/2C \quad v = 1/\sqrt{LC}$$

das heißt durch Wellen F_1, F_2 die mit der Geschwindigkeit v in Richtung wachsender bzw. abnehmender x auf der Leitung gedämpft fortschreiten (sogenannte „Wanderwellen“). Die Größe $\sqrt{L/C}$ ist der Wellenwiderstand, d. i. das Verhältnis der Spannung zum Strom in der Welle. Auf oberirdischen Leitungen ist die Wellengeschwindigkeit v nahezu gleich der Lichtgeschwindigkeit; auf Kabeln ist sie erheblich kleiner. Die Wellenformen F_1, F_2 entstehen durch Übereinanderlagerung der Grundwelle und einer unendlichen Reihe von Oberwellen des Systems, die im allgemeinen nicht harmonisch sind, und deren Frequenzen durch die Länge der Leitung und die Beschaffenheit der Apparate an den Leitungsenden bestimmt sind. Von der Beschaffenheit der Enden hängt auch das Gesetz ab, nach dem die auf die Enden prallenden Wellen F_1, F_2 reflektiert werden. Schließt sich ein Ende über einen Ohmschen Widerstand $R_0 = \sqrt{L/C}$, so findet daselbst vollkommene Absorption (ohne Reflexion) der Wellen statt. Eine mäßige Selbstinduktion von R_0 ist praktisch unschädlich.

Die auf ein offenes Leitungsende prallende Spannungswelle verdoppelt sich; die zugehörige Stromwelle zieht sich mit derselben Geschwindigkeit wieder zurück. An einem kurzgeschlossenen Leitungsende vertauschen die beiden Wellen ihre Rolle.

Wird ein Strom I auf einer Leitung unterbrochen, so zieht er sich von der Unterbrechungsstelle mit der Geschwindigkeit v zurück und hinterläßt eine Spannung

$$U_f = I \sqrt{L/C},$$

die davon herrührt, daß die dem Strome I entsprechende magnetische Energie vom Betrage $\frac{1}{2}LI^2$ in elektrische Energie vom Betrage $\frac{1}{2}CU_f^2$ übergeht. Ist die Leitung am anderen Ende induktiv belastet, derart, daß beim Strome I hier ein Betrag $\frac{1}{2}L_0I^2$ an magnetischer Energie aufgespeichert ist, so kann sich die Spannung der Leitung durch wiederholte Reflexion der Wellen an den beiden Leitungsenden noch beträchtlich steigern; die höchste Spannung wird, wenn L_0 mehrmals größer als L ist, angenähert $I\sqrt{L_0/C}$. Glücklicherweise haben richtig bemessene Schalter die Eigenschaft, den Strom nicht plötzlich zu unterbrechen, sondern stetig auf Null zu bringen¹⁾.

Trifft eine Welle F_1 von einer Leitung mit dem Wellenwiderstand $Z_1 = \sqrt{L_1/C_1}$ auf eine Verbindungsstelle dieser Leitung mit einer zweiten Leitung vom Wellenwiderstand $Z_2 = \sqrt{L_2/C_2}$, so spaltet sich die Welle in eine reflektierte Welle F_2 und in eine in die Leitung 2 eindringende Welle F_3

$$F_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1 \quad F_3 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1.$$

Die Wicklungen von Maschinen und Transformatoren verhalten sich den Ausgleichsvorgängen gegenüber in erster Näherung wie Leitungen mit verteilten Konstanten R, L, C, G . Beim Übergang einer Welle F_1 von einer Leitung (oder einem Kabel) auf eine Transformator- oder Maschinenwicklung ist Z_2 groß gegen Z_1 ; dann wird $F_2 \approx F_1$; $F_3 \approx 2F_1$: in die Wicklung dringt eine Welle von doppelt-

¹⁾ Vgl. die von Gerst Meyer aufgenommenen Oszillogramme, Elektr. Kraftbetriebe und Bahnen Bd. 9, S. 141, 1911. Ferner: E. B. Merriam, Proc. Amer. Inst. of El. Eng. 1911, S. 195; K. C. Randall, ebenda 1913, S. 1885; 1915, S. 271; F. Marquerre, ETZ 1912, S. 709, 735; B. Bauer, Untersuchungen an Ölschaltern, ETZ 1915, S. 582; 1916, S. 120, 183; 1917, S. 207; 1919, S. 481; J. Biermanns Arch. f. Elektrot. Bd. 3, S. 5, 1914; G. Stern u. J. Biermanns, Ölschalterversuche, ETZ 1916, S. 617, 635. Vogelsang und Schrottke, Über Hochleistungsschalter, ETZ 1919, S. 597 und 625. J. Biermanns, Über Hochleistungsschalter, ETZ, 1920, S. 325.

ter Spannung ein. Hat die Welle — wie z. B. beim plötzlichen Einschalten oder Unterbrechen — eine steile Front, so wird auch die Wicklung in sich gefährdet, weil zwischen benachbarten Windungen die volle Wellenspannung auftritt, so daß Gefahr des Durchschlags entsteht. Diese Gefahr nimmt ab, je weiter die Welle eindringt, weil die Eisenverluste die Welle dämpfen, jedoch staut sich die Welle im Mittelpunkt der Wicklung abermals.

Dieselbe Gefahr tritt ein, wenn ein Stromerzeuger (Spannung E) auf eine Leitung oder ein Kabel geschaltet wird. Dann ist Z_2 klein gegen Z_1 und somit $F_2 \approx -F_1 \approx -E$. Hier gefährdet also die reflektierte Welle die Isolation der einzelnen Windungen gegeneinander. Wirksamen Schutz gewähren Drosselspulen, die man der gefährdeten Wicklung vorschaltet; die Spulen wirken wie kurze Leitungen von sehr hohem Wellenwiderstand. Daraus folgt, daß die Spule selbst gut isoliert werden muß, weil nun sie den Spannungsstoß erhält. Die genauere Untersuchung¹⁾ hat gelehrt, daß die Kapazität zwischen den Windungen der gefährdeten Wicklung die steile Stirn der Welle abflacht und dadurch die Beanspruchung mildert; die Schutzdrossel soll eine möglichst geringe Kapazität gegen Erde haben. — Ein zweiter Weg zur Verkleinerung der Welle F_2 besteht darin, daß man die Leitung zuerst über eine Widerstandsstufe einschaltet, die am Ende der Schalterbewegung kurz geschlossen wird (Schutzschalter). Ferner eignen sich auch Kondensatoren von hinreichend großer Kapazität, die man zwischen Hin- und Rückleitung schaltet, zur Abflachung steiler Wellenstirnen.

Die auf den Leitungen laufenden Wanderwellen übertragen sich durch elektromagnetische Induktion auf benachbarte Leitungen. Näheres hierüber bei K. W. Wagner, ETZ 1914, S. 639, 677, 705.

Die Darstellung durch unverzerrt fortschreitende Wellen wird ungenau, wenn die Leitung so lang ist, daß die Wellen nach Zurücklegung der Leitungslänge auf weniger als ca. $\frac{1}{3}$ gedämpft werden²⁾.

Im Grenzfall eines sehr langen Kabels (Ozeantelegraphie) darf man L vernachlässigen³⁾. Verfahren zur Berechnung der Stromkurven mit Berücksichtigung der Apparate an den Enden sind von F. Breisig⁴⁾, K. W. Wagner⁵⁾ und H. W. Malcolm⁶⁾ angegeben worden.

Für Leitungen beliebiger Länge lassen sich die Strom- und Spannungskurven beim Einschalten mittels der Heavisideschen Regel (143) berechnen.

(147) Kettenleiter. Man denke sich m beliebige, gleichartige Stromkreise. Der erste Kreis sei mit dem zweiten in irgendeiner Weise gekoppelt; die gleiche Art der Kopplung bestehe zwischen den folgenden Kreisen. Eine solche kettenartige Anordnung nennt man einen Kettenleiter erster oder zweiter Art, je nachdem die Einzelkreise (die Kettenglieder) der oberen oder der unteren Schaltung in Abb. 40 entsprechen. Bei $a_1 a_2$ bzw. $e_1 e_2$ erfolgt die Stromzuführung, bezw. Stromabnahme. R bedeutet den Widerstandsoperator, G den Leitwertoperator der entsprechend bezeichneten Anordnung. Die Strom- und

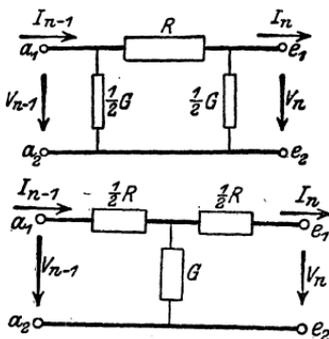


Abb. 40. Kettenglieder.

¹⁾ Elektrot. u. Maschb., Wien 1915, S. 89, 105; ETZ 1916, S. 425, 440, 456.

²⁾ Wegen der dann eintretenden Verzerrung der Wellenform siehe die von V a s c h y (Annales télégraphiques, Ser. 3, Bd. 15, S. 481; 1888) und K. W. Wagner (ETZ 1910, S. 163, 192) gezeichneten Kurven. Siehe ferner ETZ 1911, S. 258.

³⁾ W. Thomson, Math. and phys. papers 2. Bd., S. 61.

⁴⁾ ETZ 1900, S. 1046.

⁵⁾ Phys. Zeitschr. Bd. 10, S. 865; 1909.

⁶⁾ The theory of the submarine telegraph and telephone cable, London 1917.

Spannungsverteilung im Kettenleiter folgt formal denselben Gesetzen wie in Kabeln und Freileitungen (144). Die Fortpflanzungskonstante γ ist durch die Gleichung

$$\sin \frac{1}{2} \gamma = \frac{1}{2} \sqrt{RG}$$

definiert. Der Wellenwiderstand beträgt

$$W_1 = \sqrt{\frac{R}{G}} \operatorname{Co} \frac{1}{2} \gamma, \text{ bzw. } W_2 = \sqrt{\frac{R}{G}} \cdot \operatorname{Co} \frac{1}{2} \gamma$$

für den Kettenleiter erster, bzw. zweiter Art.

Die Schaltung der Zweige R und G von wichtigen Kettenleitern und deren Bedeutung und Verwendung gehen aus der folgenden Zusammenstellung hervor:

Schaltung		Bedeutung und Verwendung.
R	G	
		Kettenisolator; Serienfunkenstrecke, künstliches Telegraphenkabel.
		
		künstliche Leitung; Schema der Pupinleitung; Drosselkette, zum Abdrosseln aller Ströme, deren Kreisfrequenz oberhalb $\omega_0 = 2/\sqrt{LC}$ liegt. Kondensatorleitung, zum Abdrosseln aller Ströme, deren Kreisfrequenz unterhalb $1/2\sqrt{LC}$ liegt.
		
		$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LK}}$ $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{LK'}}$ $K' = KC/(4K+C)$ a)
		b) $\frac{1}{\sqrt{L'K}}$ $\frac{1}{\sqrt{LK}}$ $L' = 4M + L$
		c) $\frac{1}{\sqrt{MC}}$ $\frac{1}{\sqrt{M'C}}$ $M' = ML/(4M+L)$
		d) $\frac{1}{\sqrt{MC'}}$ $\frac{1}{\sqrt{MC}}$ $C' = 4K + C$
		Doppelsieb, $LK = MC$, Siebkette mit besonders ausgeprägter Wirkung. Der durchlässige Bereich liegt zwischen
		$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{MC}} \left[\sqrt{1 + \frac{M}{L}} - \sqrt{\frac{M}{L}} \right] \text{ und}$ $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{MC}} \left[\sqrt{1 + \frac{M}{L}} + \sqrt{\frac{M}{L}} \right]$
		Wellenschlucker, $LK = MC$; starke Drosselwirkung nur für die Wechselströme, deren Kreisfrequenz bei $1/\sqrt{LK}$ liegt.

Auch die gekoppelten Kreise nach folgender Schaltung sind als eine Siebkette aufzufassen, die völlig der Siebkette b der vorstehenden Zusammenstellung entspricht, wenn man

$$M = M_0, \quad L = 2(L_0 - M_0)$$

setzt; dann wird

$$\omega_1 = 1/\sqrt{2K(L_0 + M_0)}, \quad \omega_2 = 1/\sqrt{2K(L_0 - M_0)}$$

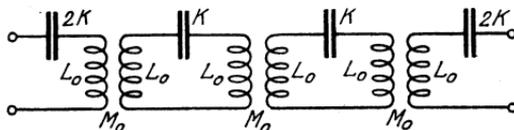


Abb. 40 a. Siebkette mit Transformator­kopp­lung.

Bei beliebiger, auch unsymmetrischer Schaltung des Kettengliedes kann man stets gemäß (137)

$$\mathfrak{R}_{n-1} = \mathfrak{A}_1 \mathfrak{B}_n + \mathfrak{B} \mathfrak{Z}_n$$

$$\mathfrak{Z}_{n-1} = \mathfrak{C} \mathfrak{B}_n + \mathfrak{A}_2 \mathfrak{Z}_n$$

setzen, wobei $\mathfrak{A}_1 \mathfrak{A}_2 - \mathfrak{B} \mathfrak{C} = 1$ ist. Die Größen \mathfrak{A}_1 , \mathfrak{A}_2 , \mathfrak{B} , \mathfrak{C} kennzeichnen die Schaltung; sie bestimmen die Fortpflanzungskonstante durch die Gleichung

$$\text{Co} \gamma = 1/2 (\mathfrak{A}_1 + \mathfrak{A}_2)$$

und die Wellenwiderstände

$$W_a = \frac{\mathfrak{A}_1 - e^{-\gamma}}{\mathfrak{C}}; \quad W_e = \frac{\mathfrak{A}_2 - e^{-\gamma}}{\mathfrak{C}}$$

W_a bedeutet den in Richtung zunehmender n geltenden, W_e den in umgekehrter Richtung geltenden Wellenwiderstand.

K. W. Wagner, Archiv f. Elektrotechnik, Bd. 3, S. 315, 1915; Bd. 8, S. 61, 1919; Z. S. f. techn. Phys. Bd. 2, 1921, S. 304; Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konzern, Bd. 2, S. 189, 1922. — O. J. Zobel, The Bell System Technical Journal, Januar 1923.

Lehrbücher über die Theorie der veränderlichen Ströme.

F. Bedell und A. C. Crehore, Alternating currents, Ithaca, N. Y. 1892; deutsch von Bucherer, Berlin 1895. — C. P. Steinmetz, Alternating current phenomena, New York 1898 (2. Aufl.); deutsche Ausgabe Berlin 1900. — J. Zenneck, Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie, Stuttgart 1905. — A. Russell, A treatise on the theory of alternating currents, 2 Vol. Cambridge 1904—1906. — E. Orlich, Kapazität und Induktivität, Braunschweig 1909. — J. L. La Cour und O. S. Bragstad, Bd. 1 von Arnolds Wechselstromtechnik, Berlin 1910 (2. Aufl.). — A. Hay, Alternating currents 1912. — E. Orlich, Die Theorie der Wechselströme, Leipzig 1912. — A. Fraenkel, Theorie der Wechselströme, Berlin 1914. — R. Rüdtenberg, Elektrische Schaltvorgänge, Berlin 1923.

Über die Theorie der Leitungen und Kabel.

O. Heaviside, Electrical Papers, 2 Bde. London 1892; Electromagnetic theory, Bd. 2, London 1899. — H. Weber, Die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik nach Riemanns Vorlesungen in vierter Auflage neu bearbeitet, Braunschweig 1900. Fünfte Auflage, ebendort 1910. — K. W. Wagner, Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln, Leipzig 1908. — F. Breisig, Theoretische Telegraphie, Braunschweig 1910. — H. W. Malcolm, The theory of the submarine telegraph and telephone cable, London 1917. Benn Brths. Ltd. — J. G. Hill, Telephonic Transmission, London 1920. — J. Herzog u. Cl. Feldmann, Die Berechnung elektrischer Leitungsnetze, Berlin 1921.

Zweiter Teil.

Elektrische Meßkunde.

Erster Abschnitt.

Elektrische Meßverfahren und Meß- vorrichtungen.

Hilfsmittel bei den Messungen.

Allgemeines.

(148) Genauigkeit. Nach der anzustrebenden Genauigkeit sind die zur Messung benutzten Methoden und Instrumente zu wählen. In manchen Fällen stellen die Beobachtungsergebnisse bereits das gewünschte Resultat dar, häufig muß dies aber erst durch Rechnung auf Grund physikalischer Gesetze aus den Beobachtungen abgeleitet werden.

Dabei gilt als allgemeine Regel, daß die verschiedenen Faktoren einer jeden Messung gleiche Genauigkeit besitzen sollen; wünscht man demnach eine Genauigkeit von 1 %, so müssen die Methoden und die Meßinstrumente hiernach gewählt werden, während die arithmetische Rechnung mit höchstens 4 Ziffern geführt, das Schlußergebnis nur mit 3 Ziffern mitgeteilt wird; feinere Instrumente als nötig zu verwenden, mit mehr als 4 Ziffern zu rechnen, wäre als eine Zeitverschwendung anzusehen.

Stellt man viele Beobachtungen an, so ist der Fehler des Mittels erheblich kleiner als der des einzelnen Ergebnisses; bei einer größeren Zahl von Beobachtungen darf man rechnen, daß der Fehler des Mittels der Quadratwurzel der Zahl der Beobachtungen umgekehrt proportional sei. — Es ist nicht erlaubt, aus der Zahl der erhaltenen Ergebnisse solche wegzustreichen, welche besonders große Abweichungen vom Mittel aufweisen, es sei denn, daß bei der Messung irgend ein größeres Versehen begangen worden ist.

Ergänzungs- oder Berichtigungsgrößen. Jede Messung erfordert neben der Bestimmung der wesentlichen Größen noch je nach der gewünschten Genauigkeit die Ermittlung einer kleineren oder größeren Zahl von Ergänzungsgrößen.

Während man bei rohen Messungen die Instrumente und Apparate oft ohne Korrekturen benutzen und die Rechnung nach Annäherungsformeln durchführen kann, sind bei genaueren Messungen, beispielsweise bei Vergleichung von Widerständen, die Korrekturen der benutzten Vergleichswiderstände, bei noch größerer Genauigkeit auch deren Temperaturkorrekturen zu bestimmen und zu berücksichtigen. Infolgedessen werden umso mehr Hilfsmessungen und Nebenrechnungen nötig, je größer die angestrebte Genauigkeit sein soll.

Da die Ergänzungsgrößen meist nur einen untergeordneten Einfluß auf das Ergebnis haben, brauchen sie auch nur mit einer geringeren Genauigkeit bestimmt zu werden als die Hauptgrößen. Bei der Berücksichtigung der Ergänzungsglieder wendet man nach Möglichkeit die Regeln für das Rechnen mit kleinen Größen an (6).

Einige besondere Einrichtungen an Meßvorrichtungen.

(149) **Ablesung des Ausschlags. Zeigerablesung.** Drehungswinkel (Ausschläge) von Galvanometern, Magnetometern usw. können an Zeigern abgelesen werden, hinter denen, wenn Parallaxe vermieden werden soll, ein Spiegel angebracht ist. Man bringt dann den Zeiger mit dem Spiegelbild zur Deckung. Häufig werden die Teilungen schon aus Spiegelglas angefertigt oder von vornherein Spiegel neben den Teilungen angebracht. Statt eines Spiegels hinter dem Zeiger kann man auch einen dicken unbelegten Spiegelglasstreifen vor dem Zeiger benutzen; blickt man schräg auf den Zeiger, so erscheint dieser gebrochen.

Spiegelablesung (Poggendorf, Gauß). Will man noch größere Genauigkeit der Ablesung erhalten, so benutzt man die Spiegelablesung (Lichtzeiger); diese kann entweder objektiv (Lichtbild auf einer Skala) oder subjektiv (Ablesung durch ein mit Fadenkreuz versehenes Fernrohr) sein. Die objektive Ablesung ist für das Auge weniger ermüdend, aber nicht so genau wie die subjektive Ablesung. Zum Zweck der Spiegelablesung wird auf dem beweglichen System, dessen Drehungswinkel gemessen werden soll, ein Spiegel angebracht. Senkrecht zur Ruhelage des Spiegels wird eine Richtung entweder durch die Visierlinie eines Fernrohrs oder durch das von einer Lampe durch einen Spalt gesandte Lichtbündel bzw. einen glühenden Platindraht oder eine Nernstlampe festgelegt.

Mitunter werden Skalen in Kreisform benutzt, in deren Zentrum sich der Spiegel befindet. Dann liefert die Ablesung direkt den Winkel, während anderenfalls der Winkel aus der Ablenkung berechnet werden muß. In den Fällen, wo das Galvanometer als Nullinstrument benutzt wird, ist die Kenntnis des Ablenkungswinkels selbst meist nicht erforderlich, da es sich dann nur um kleine Ablenkungen handelt.

Um eine möglichst sichere und unveränderliche Aufstellung zu erhalten, stellt man das Galvanometer auf ein Konsol, das an der Wand befestigt ist, und zwar zweckmäßig auf festgekittete Fußplatten. Wenn die Erschütterungen des Spiegels zu groß sind, muß die erschütterungsfreie Aufhängung des Instruments nach Julius verwendet werden (Wied. Ann. Bd. 56; s. auch Volkman n, Phys. Ztschr. 1914, S. 75).

Bei der objektiven Spiegelablesung muß entweder das Instrument einen Hohlspiegel besitzen, durch den das Bild der Lichtquelle auf der Skala entworfen wird, oder man muß an geeigneter Stelle zwischen Lichtquelle und Spiegel eine Linse einschalten, was auch geschehen kann, wenn das Instrument zwar einen Hohlspiegel besitzt, dieser aber nicht die für die gewünschte Entfernung geeignete Brennweite besitzt.

(150) **Dämpfung und Beruhigung.** Zur Ablesung der Ausschläge bei Meßinstrumenten braucht man die geringste Zeit, wenn das schwingende System aperiodisch gedämpft ist, d. h. gerade keine Schwingungen mehr um die Gleichgewichtslage ausführt. Ist das schwingende System wenig gedämpft, so dauert es lange, bis es zur Ruhe kommt, und man verliert viel Zeit, wenn man die Schwingungen nicht beruhigt oder aus den Ausschlägen zu beiden Seiten der Gleichgewichtslage nach der von der Wage her bekannten Methode die Gleichgewichtslage ermittelt.

Magnetnadeln kann man durch geeignetes Nähern und Entfernen eines Magnetstabes leicht zur Ruhe bringen. Manche Instrumente, wie z. B. die Drehspulengalvanometer, besitzen schon eine natürliche Dämpfung, und man kann es bei diesen Instrumenten so einrichten, daß man unter den günstigsten Verhältnissen, d. h. mit aperiodischer Dämpfung arbeitet (153).

Bei schwingenden Magneten kann man Kupferdämpfung anwenden, ebenso auch Luft- oder Flüssigkeitsdämpfung.

(151) **Induktionsfreie Wicklung.** Wenn ein stromdurchflossener Leiter keine Wirkung auf ein Meßinstrument sowie keine Selbstinduktion haben darf, führt man ihn so, daß die eine Hälfte des Leiters die gleiche und entgegengesetzte

Wirkung hat wie die andere. Gewöhnlich wird dies dadurch erzielt, daß man den Draht von der Mitte aus aufspannt oder aufwickelt, so daß beide Hälften des Drahtes genau nebeneinander liegen (bifilare Wicklung, z. B. bei den Widerstandsrollen der Meßrheostaten). Ähnliche Einrichtungen sind auch nötig für die Abzweigungswiderstände der Galvanometer. Die bifilaren Widerstände haben eine nicht immer unmerkliche Ladungsfähigkeit (Kapazität). Nach *Chapron* (*Comptes rendus* Bd. 108, S. 799) erhält man Widerstände, die sowohl von Induktion wie von Kapazität möglichst frei sind, dadurch, daß man den Draht in gleichen, nicht zu großen Abschnitten mit abwechselnder Richtung aufwickelt (abwechselnd unifilare Wicklung), vgl. auch *Cairo* (*Comptes rendus* Bd. 120, S. 308) und *W. Jaeger*, *Elektrische Meßtechnik*, 2. Aufl. (J. A. Barth, 1922).

Galvanometer.

(152) Arten der Galvanometer. Hier sollen unter Galvanometern nur solche Instrumente verstanden werden, welche die dynamische Wirkung des Stroms benutzen.

Es gibt jetzt zwei Klassen von Instrumenten dieser Art; die eine Sorte, die Nadelgalvanometer, haben ein bewegliches System aus permanenten Magneten (oder weichem Eisen) und eine feststehende Spule, die von dem zu messenden Strom durchflossen wird. Die andere Sorte hat ein bewegliches Stromsystem und feststehende permanente Magnete oder Elektromagnete. Zur letzteren Klasse gehören die Drehspulengalvanometer und die *Einthovenschen* Saitengalvanometer.

Eine besondere Art von Galvanometern, welche in beiden Klassen Anwendung finden, sind die Differentialgalvanometer, bei denen sich die Wirkungen zweier in getrennten Stromleitern fließenden Ströme auf das bewegliche System aufheben (165).

(153) Die Schwingungsdauer (halbe Periode) eines völlig ungedämpften Systems in Sekunden ist $t = \pi \sqrt{J/D}$, wenn J das Trägheitsmoment, D die auf das System ausgeübte Richtkraft bedeutet.

Ist das System gedämpft, und stehen zwei aufeinanderfolgende Schwingungen a_1, a_2 im Verhältnis $k = a_1 : a_2$ (Dämpfungsverhältnis), so heißt $\delta = \log \text{nat } k$, das logarithmische Dekrement (140); die Schwingungsdauer T ist dann größer als im ungedämpften Zustand; nämlich:

$$T = t \sqrt{1 + \delta^2 / \pi^2}.$$

Die Dämpfung ist proportional der Winkelgeschwindigkeit des Systems; die Konstante p , mit der die Winkelgeschwindigkeit zu multiplizieren ist, heißt die Dämpfungskonstante (154).

Die Einstellungszeit des Systems ist am kürzesten, wenn es sich, im sogenannten aperiodischen Grenzfall befindet ($\delta = \infty$), in dem das System, ohne eine Schwingung auszuführen, die neue Ruhelage einnimmt. In diesem Fall gilt für die Dämpfungskonstante $p = 2 \sqrt{JD}$.

Ist die Dämpfung noch größer, so wird das Galvanometer meist unbrauchbar, es „kriecht“. Dieser Fall kann bei zu kleinem Widerstand im Galvanometerkreis beim Drehspulengalvanometer leicht eintreten.

(154) Die Dämpfung des Instruments bei Stromdurchgang setzt sich zusammen aus derjenigen im offenen Stromkreis (Luftdämpfung, Rahmendämpfung usw.) und der durch die Bewegung des schwingenden Systems induzierten Dämpfung. Die letztere ist proportional der Geschwindigkeit des Systems und der Größe d^2/R , wenn R den Widerstand des Galvanometerkreises und d die dynamische Galvanometerkonstante (155) bedeutet. Ist also p die Konstante der gesamten Dämpfung, p_0 diejenige für den offenen Stromkreis, so ist $p = p_0 + d^2/R$. Für Nadelgalvanometer ist das zweite Glied der rechten Seite meist sehr gering, während es bei Drehspulengalvanometern gerade die Hauptrolle spielt.

Ballistischer Ausschlag. Ein kurzer Stromstoß (Entladung eines Kondensators u. dgl.) erteilt dem Galvanometer keine dauernde Ablenkung, sondern bewirkt nur einen vorübergehenden Ausschlag: das nähere s. (204).

(155) Empfindlichkeit. Das Drehmoment d des Stromes 1 CGS (=10 A) auf das System wird als dynamische Galvanometerkonstante bezeichnet. Ist D die Richtkraft, so ist $\varepsilon = d/D$ die Stromempfindlichkeit (in absolutem Maße), d. h. der Winkelausschlag (absolut gemessen, Einheit = $57,30^\circ$), welcher der Einheit der Stromstärke in CGS entspricht. Die zu messende Stromstärke ist dann, wenn φ den Ausschlagswinkel in absolutem Maß bedeutet: $I = \varphi/\varepsilon = \varphi D/d$.

Die Stromempfindlichkeit der Spiegelgalvanometer wird gewöhnlich als Ausschlag in Skalenteilen für einen bestimmten Skalenabstand und eine bestimmte Stromstärke und Schwingungsdauer angegeben und als „normale Stromempfindlichkeit“ bezeichnet [z. B. bei Nadelgalvanometern für $1\mu\text{A}$ und 1Ω Widerstand bei einem Spiegelabstand von 1000 Skalenteilen und einer ungedämpften Schwingungsdauer (halbe Periode) von 5 s].

Außer der Stromempfindlichkeit interessiert in vielen Fällen die Spannungsempfindlichkeit, welche man aus ersterer erhält, wenn man diese durch den Widerstand des für das Galvanometer in Betracht kommenden Stromkreises dividiert. Vgl. auch (166).

Nadelgalvanometer.

(156) Empfindlichkeit des Nadelgalvanometers. Beim Nadelgalvanometer hängt die Richtkraft, da die Torsionskraft des Fadens meist zu vernachlässigen ist, nur vom Richtfeld ab, das durch Richtmagnete in weiten Grenzen variiert werden kann (Astasierung). Damit wird gleichzeitig die Schwingungsdauer verändert.

Ersetzt man die Spule vom Widerstand R durch eine solche vom Widerstand 1Ω , deren Wicklung denselben Raum einnimmt, so wird das Drehmoment der Spule angenähert im Verhältnis \sqrt{R} kleiner.

Bedeutet \mathfrak{H} das Feld einer Spule von 1Ω für den Strom 1 CGS am Ort der Nadel (vom magnetischen Moment \mathfrak{M}), so ist, wenn a eine Konstante bedeutet, die Stromempfindlichkeit $\varepsilon = a\mathfrak{M}\mathfrak{H}^2\sqrt{R}/J$.

Der Faktor $a\mathfrak{M}\mathfrak{H}^2/J$, in dem a einen konstanten, vom Instrument abhängigen Faktor bedeutet, ist die dem betreffenden Galvanometer entsprechende Empfindlichkeitskonstante. Je größer diese ist, desto größer ist die Empfindlichkeit. Es kommt also darauf an, das Verhältnis des magnetischen Moments \mathfrak{M} zu dem Trägheitsmoment J der Magnete möglichst groß und das Feld \mathfrak{H} möglichst stark zu machen. Das erstere geschieht dadurch, daß man nach Vorgang von Thomson viele kurze Magnete an einer gemeinsamen Achse befestigt oder Glockenmagnete verwendet (Siemens), das letztere dadurch, daß man das System möglichst klein macht, um die Galvanometerwindungen dem Nadelsystem nahe bringen zu können. Die größte Empfindlichkeit der Versuchsanordnung wird beim Nadelgalvanometer meist dann erreicht, wenn der Widerstand der Galvanometerwindungen gleich demjenigen des äußeren Schließungskreises gemacht wird.

Die Empfindlichkeit des Galvanometers läßt sich in weiten Grenzen mittels sogenannter Astasierungsmagnete variieren. Verändert man den Widerstand des Nadelgalvanometers von R_1 zu R_2 , die Schwingungsdauer von t_1 zu t_2 und bezeichnet die entsprechenden Stromempfindlichkeiten mit ε_1 und ε_2 , so wird $\varepsilon_1:\varepsilon_2 = t_1^2\sqrt{R_1}:t_2^2\sqrt{R_2}$, d. h. die Stromempfindlichkeit wächst mit dem Quadrat der Schwingungsdauer (bei ungeändertem Trägheitsmomente) und mit der Wurzel aus dem Widerstand. Daher kann durch Erhöhung der Schwingungsdauer (mittels Astasierung) die Empfindlichkeit erheblich vergrößert werden.

(157) **Tangentenbussole, Sinusbussole, Torsionsgalvanometer.** Bei diesen Instrumenten ist die mathematische Abhängigkeit der Stromstärke von dem abgelesenen Ausschlag bekannt.

Die Tangentenbussole, welche sowohl als Spiegel- wie als Zeigerinstrument in Gebrauch ist, hat früher vielfach zu absoluten Strommessungen gedient, findet heute aber im Laboratorium kaum noch Anwendung, da man in der Zurückführung der Strommessung auf Normalwiderstand und Normalelement ein viel bequemerer und zuverlässigeres Mittel zur genauen Bestimmung des Stromes in absolutem Maße besitzt; vgl. (200) bis (202). Näheres hierüber, sowie über die Sinusbussole siehe im Lehrbuch von Kohlrausch.

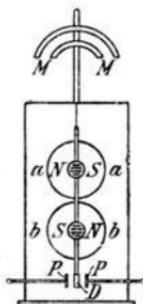


Abb. 41. Thomson'sches Galvanometer.

Das Torsionsgalvanometer (mit Zeigerablesung) ist insofern bemerkenswert, als es der Vorläufer der jetzt fast ausschließlich gebrauchten „direkt zeigenden“ Instrumente [Präzisionsamperemeter usw. (164)] war und auch den Vorzug dieser Instrumente besitzt, durch äußere magnetische Störungen wenig beeinflusst zu werden. Es war früher in ausgedehntem Gebrauch, ist aber später durch die oben erwähnten Instrumente fast vollkommen verdrängt worden.

Die Stromstärke ist dem Torsionswinkel proportional.

(158) **Empfindliche Nadelgalvanometer. Astasie.** Infolge der bedeutenden magnetischen Störungen durch elektrische Straßenbahnen bedient man sich der Galvanometer mit astatischem Nadelpaar oder der durch Eisenhüllen geschützten Galvanometer, die auch empfindlicher sind als diejenigen mit einfachem Magnet.

Galvanometer von Thomson und du Bois und Rubens. Die aus kurzen Magnetnadeln gebildeten Systeme sind auf dem zur Ablesung dienenden Spiegel befestigt. Beide Galvanometer haben 4 Rollen, zwei für das obere (a) und zwei für das untere (b) Magnetsystem (Abb. 41), so daß verschiedene Schaltungsweisen ausgeführt werden können, um das Galvanometer dem jeweiligen Zweck anzupassen.

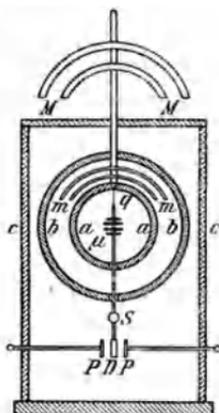


Abb. 42. Kugelpanzergalvanometer.

Durch äußere Magnete gibt man dem System meist eine bestimmte Richtung, die beliebig zum magnetischen Meridian gerichtet sein kann, von dem man auf diese Weise unabhängig wird. Man benutzt dazu gewöhnlich zwei oberhalb des Galvanometers an einer gemeinsamen Achse angebrachte Richtmagnete, die zur Erzielung eines homogenen Feldes an Orte der Nadel nach unten gebogen sind (*M*; Abb. 41). Diese Magnete können in vertikaler Richtung verschoben und gegeneinander verkehrt werden.

Das schwingende System des Galvanometers von du Bois und Rubens (Keiser & Schmidt) besitzt am unteren Ende eine Dämpferscheibe *D*, die zwischen verstellbaren Metallplatten *P* schwingt (Luftdämpfung).

Wird die „normale Stromempfindlichkeit“ des Instruments (155) mit ϵ_0 bezeichnet, so berechnet sich die einer Schwingungsdauer *t* und einem Widerstand *R* der Spulen entsprechende Stromempfindlichkeit $\epsilon = \frac{1}{25} \cdot \epsilon_0 t^2 \sqrt{R}$.

Die normale Stromempfindlichkeit ϵ_0 beträgt für Thomson'sches Galvanometer (Elliott) und für dasjenige von du Bois-Rubens (mit schwerem System) etwa $\epsilon_0 = 50$.

Panzergalvanometer. Noch bedeutend besser gegen das äußere Feld geschützt sind die mit Eisenhüllen umgebenen Galvanometer, von denen das gleichfalls von du Bois und Rubens konstruierte sogenannte Kugelpanzergalvanometer¹⁾ (Siemens & Halske) wohl am bekanntesten ist (Abb. 42).

Dasselbe besitzt nur ein an einem kurzen Quarzfaden q aufgehängtes Magnetsystem (μ), das innerhalb zweier Spulen (a) schwingt, die zusammen eine von weichem Eisen umschlossene Kugel bilden. Eine zweite Hohlkugel b aus weichem Eisen, innerhalb deren sich die Astasierungsmagnete (m) befinden, umschließt diese und wird ihrerseits noch von einem dritten zylinderförmigen Mantel (c) aus weichem Eisen umgeben. Außerhalb dieses Mantels befinden sich die beiden Richtmagnete M . Ablesespiegel S und Dämpferscheibe P sind unterhalb des Magnetsystems angebracht.

Drehspulengalvanometer.

(159) Verwendung. Die Drehspulengalvanometer (160, 164) werden wegen ihrer starken elektrodynamischen Dämpfung (153) am besten im aperiodischen Grenzzustand benutzt (153); hierbei ist auch die Spannungsempfindlichkeit praktisch am größten. Da das Galvanometer häufig auch im offenen Stromkreis zur Ruhelage zurückkehren soll, ist eine mäßige Dämpfung durch den Rahmen im offenen Stromkreis erwünscht. Dadurch wird die Empfindlichkeit nur unwesentlich verringert (bei einem Dämpfungsverhältnis $k=2$ z. B. nur um 10%). Durch eine Kurzschlußtaaste kann man übrigens meist das Galvanometer sehr schnell dämpfen.

Während bei den Nadelgalvanometern in der günstigsten Meßanordnung der Widerstand der Spule gleich dem äußeren Widerstand zu machen ist, muß beim Drehspulengalvanometer in der günstigsten Schaltung der Widerstand des äußeren Stromkreises gerade den Grenzfall der aperiodischen Schwingung herbeiführen, während der Klemmenwiderstand des Galvanometers möglichst klein sein soll gegen den Gesamtwiderstand des Schließungskreises.

Die Drehspulengalvanometer sind in hohem Maße von dem Erdfeld und äußeren Störungen unabhängig. Starke Magnetfelder in der Nähe des Instruments können die Einstellung der stromdurchflossenen Spule allerdings beeinflussen; deshalb ist auch zu berücksichtigen, daß zwei nahe beieinander aufgestellte Instrumente dieser Art sich stören können. (Der Nullpunkt des offenen Instruments wird natürlich dadurch nicht verändert.) Die Richtkraft, welche dem Drehmoment der Spule entgegenwirkt, wird durch einen Metalldraht bzw. ein ebensolches Band sowie durch die zweite, untere Stromzuführung geliefert. Das Drehmoment der feststehenden Magnete auf die bewegliche Spule ist proportional der Feldstärke, der Stromstärke und der Windungsfläche der Spule. Für den aperiodischen Grenzfall ergibt sich als maximal erreichbare Stromempfindlichkeit $E = \sqrt{2\pi t R/D}$ (alle Größen in CGS), wobei vorausgesetzt wird, daß der Widerstand der Spule sehr klein ist gegen R . Wenn dies nicht der Fall ist, und auch bei offenem Kreis Dämpfung vorhanden ist, wird die Empfindlichkeit kleiner. (Näheres siehe Jaeger, Ann. d. Phys. (4) Bd. 21, S. 64, 1906). Die Empfindlichkeit wächst also wie beim Nadelgalvanometer mit \sqrt{R} , aber nur mit \sqrt{t} (statt mit t^2 beim Nadelgalvanometer). Für kleine Schwingungsdauern (Oszillograph) ist daher das Drehspulensystem besonders günstig.

Wesentlich bestimmend für die Empfindlichkeit ist, wie man sieht, die Richtkraft D , die man möglichst klein zu machen suchen muß; allerdings ist es dann auch nötig, die Trägheit (J) im selben Verhältnis zu verringern, wenn die Schwingungsdauer nicht vergrößert werden soll. Hauptsächlich für Galvanometer mit kleinem Widerstand, die neuerdings immer mehr Bedeutung gewinnen (2CO), entstehen hierbei Schwierigkeiten, weil bei einer Verringerung der Richtkraft der Widerstand der Zuleitungen zur beweglichen Spule zunimmt.

¹⁾ Ann. d. Phys. (4), Bd. 2, S. 84. 1900; Zeitschr. f. Instrk. Bd. 20, S. 65. 1900.

(160) Ausführungsformen (164). Die Drehspulengalvanometer mit Spiegelablesung werden verschieden gebaut. Bei manchen Ausführungen schwingt die Spule R in dem schmalen Luftraum zwischen den Magnetpolen M und einem Weicheisenkern E (Abb. 43), bei anderen Galvanometern ist die Spule lang und ganz schmal, und es ist kein Eisenkern vorhanden (Abb. 44).

Bei der Ausführung mit Eisenkern schwingt die Spule in einem Feld, in dem die Kraftlinien radial verlaufen, so daß der Ausschlag nahe proportional der Stromstärke ist.

Die Zufügung von Ballastwiderständen zu dem Galvanometer erscheint überflüssig; erwünscht ist, wie es jetzt vielfach geschieht, eine Angabe darüber, mit welchem Widerstand die Galvanometer aperiodisch werden. Die bloße Angabe der Stromempfindlichkeit ist nicht ausreichend und kann sogar irreführend sein, da ein Galvanometer von geringerer Stromempfindlichkeit häufig eine große Meßgenauigkeit gibt. Maßgebend ist die *S p a n n u n g s e m p f i n d l i c h k e i t* für den aperiodischen Grenzfall und der in diesem Fall zur Verfügung stehende äußere Widerstand, durch den das Galvanometer geschlossen wird.

Die Justierung der Drehspulengalvanometer geschieht meist mit Hilfe einer auf dem Grundbrett des Instruments angebrachten Dosenlibelle, die so justiert sein muß, daß die Spule sich in der richtigen Lage befindet, wenn die Libelle einspielt.

Nach länger dauernden großen Ausschlägen zeigen die Instrumente häufig eine Nullpunktänderung infolge elastischer Nachwirkung des Aufhängedrahtes. Bei kleinen

Ausschlägen tritt dieser Übelstand nicht ein.

Die Instrumente lassen sich leicht auf einen bestimmten Teilstrich der Skala einstellen durch Drehen an einem „Torsionskopf“ (T), der sich am oberen Ende des Aufhängedrahtes befindet.

Die größte bis jetzt erreichte „normale“ Stromempfindlichkeit (155) entsprechend einer Richtkraft von $D = 0,6$ CGS ist etwa $\varepsilon_0 = 15$. Emp-

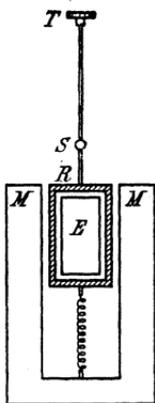


Abb. 43. Drehspulengalvanometer mit Weicheisenkern.

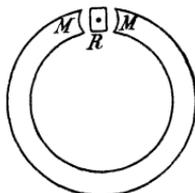


Abb. 44. Drehspulengalvanometer mit eisenloser Spule.

findliche Instrumente für 1Ω äußeren Widerstand sind zurzeit noch nicht vorhanden (s. die Bemerkungen über den Widerstand der Zuleitung). Dagegen gibt es schon recht empfindliche Instrumente für 10 bis 20Ω (vgl. Jaeger, Zeitschr. Instrk. 1908, S. 206), die für Kompensationsapparate von kleinem Widerstand geeignet sind. Die Schwingungsdauer beträgt, wenn man von den ballistischen Instrumenten absieht, meist 5 bis 7 s. (Über ein Instrument mit kurzer Schwingungsdauer siehe Diesselhorst, Zeitschr. Instrk. 1911, S. 247 und 276.)

Bei 5 s Schwingungsdauer (halbe Periode) und 2 m Skalenabstand kann bei diesen Instrumenten zurzeit etwa ein Ausschlag von 5–6 Skalenteilen für $1 \mu V$ erreicht werden, falls der Widerstand zwischen den Klemmen auf etwa 10Ω verringert ist. Mittels der angegebenen Formeln läßt sich leicht die Empfindlichkeit für andere Fälle angenähert berechnen. Zweifellos sind noch weitere Fortschritte auf diesem Gebiet zu erreichen und zu erwarten.

Auch als ballistische Galvanometer werden die Drehspuleninstrumente gebaut und sind auch hier am brauchbarsten im aperiodischen Grenzzustand (Diesselhorst, Ann. d. Phys. (4) Bd. 9, S. 458, 1902 und Jaeger, Bd. 21, S. 81, 1906).

Die Empfindlichkeit des Drehspulengalvanometers läßt sich nicht in so einfacher Weise verändern wie diejenige der Nadelgalvanometer. Es werden für diesen Zweck zwar Instrumente mit magnetischem Nebenschluß geliefert, durch den der Wert von d (155) verändert werden kann. Dadurch werden aber auch die Konstanten des Instruments mit Ausnahme der Schwingungsdauer geändert. Am besten verwendet man Instrumente mit mehreren Einsätzen. Von Hartmann und Braun werden auch Spulen mit zwei Wicklungen hergestellt.

Da es für die Beobachtung am bequemsten ist, im aperiodischen Grenz-zustand zu arbeiten, verringert man die Empfindlichkeit des Galvanometers zweckmäßig nicht durch Vorschalten eines Widerstandes, sondern dadurch, daß man es durch einen Widerstand schließt, der den Grenzzustand herbeiführt, und daß man von einem Teil dieses Widerstandes die Zuleitungen zu dem äußeren Stromkreis abzweigt.

(161) Saltengalvanometer. Eine Abart der Drehspulengalvanometer ist das Einthovensche Saitengalvanometer (Ann. d. Phys. (4) Bd. 12, S. 1059, 1903). In dem Feld eines sehr kräftigen Elektromagnets befindet sich ein versilberter Quarzfaden, der an beiden Enden eingeklemmt ist und bei Stromdurchgang eine Ausbiegung erfährt; diese wird mit einem Mikrometer-Mikroskop gemessen. Man erhält eine große Stromempfindlichkeit und sofortige Einstellung bei allerdings sehr hohem Galvanometerwiderstand. Die Stromempfindlichkeit, welche hier nicht durch einen Ausschlagwinkel, sondern durch eine Verschiebung gemessen wird, wird zu 10^{-12} A angegeben bei einem Widerstand von 10 000 bis 20 000 Ω .

Zeigergalvanometer.

(162) Arten der Zeigergalvanometer. Die Praxis verlangt direkt zeigende Apparate mit einer zeitlich unveränderlichen Empfindlichkeit, an denen man direkt die Größe von Strom oder Spannung, die man zu messen wünscht, abliest oder durch Multiplikation der Ablesung mit einer ganzen Zahl erhält. Man hat sowohl Nadelgalvanometer wie Spulengalvanometer für diesen Zweck brauchbar gemacht. Galvanometer sind ihrer Natur nach Strommesser; man kann sie aber, wenn sie genügend empfindlich sind, durch Vorschalten eines größeren konstanten Widerstandes auch zur Messung von Spannungen brauchbar machen.

(163) Nadelapparate. Hierhin gehört das älteste die Stromstärken in Ampere messende Instrument, das Torsionsgalvanometer von Siemens (157). Es ist jetzt von den bequemeren und genaueren Drehspulen-Apparaten verdrängt worden.

Eine wichtige Rolle in der Praxis spielen die Weicheisen- oder Dreh-eisenapparate. Bei ihnen ist ein bewegliches Weicheisenstück im Magnetfeld einer festen Spule meist drehbar angeordnet. Durchfließt ein Strom die Spule, so wird das Weicheisenstück magnetisiert und in die Stellen größter magnetischer Kraftliniendichte gedreht. An dem Weicheisenstück ist ein Zeiger befestigt, der über einer Skale schwingt. Die Apparate werden meist mit horizontaler Drehachse als Schaltbrettapparate gebaut; die Schwere oder eine Spiralfeder bildet die Richtkraft. Als Dämpfung wird am besten eine Luftdämpfung benutzt, darin bestehend, daß ein mit dem beweglichen System verbundener Flügel in einem möglichst abgeschlossenen Kasten schwingt (Abb. 45). Die Skale ist nicht gleichmäßig; man hat aber durch geeignete Formgebung des Eisenstückes und der Spule in gewissen Grenzen ihre Gestalt in der Hand. Da es sich in der Regel um Schaltbrettapparate handelt, so wird die Skale so geteilt, daß man direkt die Spannung in Volt bzw. den Strom in Ampere abliest.

Infolge der Hysterese des Eisenkernes wird die Eichung im allgemeinen für wachsende und fallende Stromstärke etwas verschieden ausfallen. Gleichstrom und Wechselstrom erfordern in der Regel etwas voneinander abweichende

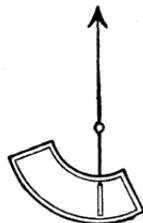


Abb. 45.
Luftdämpfung.

Skalen. Bei neueren Apparaten, die ausschließlich Federn als Richtkraft haben, ist von diesen Unterschieden kaum noch etwas zu merken.

(164) Drehspulengalvanometer. (159, 160). Eine Kupfer- oder Aluminiumspule *Sp* (Abb. 46) ist auf ein leichtes Kupferrähmchen (Dämpfung) gewickelt und dreht sich zwischen den Polen eines kräftigen Dauermagnetes *M*. Ein zylindrisches Eisenstück *E* zwischen den Polen läßt nur einen schmalen zylindrischen Luftraum frei, durch welchen sich die Spule frei bewegt. Die Spule trägt zwei Stahlspitzen (meist ohne durchgehende Achse), mit denen sie zwischen zwei Steinen (Rubinen) ruht. Die Stromzuführungen werden von zwei flachen Spiralfedern gebildet, die gleichzeitig die Richtkraft für das bewegliche System abgeben. Nur bei sehr empfindlichen Apparaten wird die Spitzenlagerung durch eine kurze Fadenaufhängung ersetzt (S. & H. und Mohs, Phys. Zeitschr., Bd. 11, S. 55. 1910, H. & Br.).

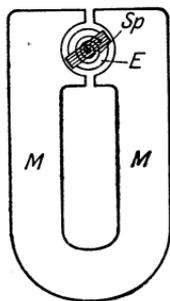


Abb. 46. Drehspulengalvanometer.

Der Magnet sowohl wie die Federn dürfen zeitlich ihre Stärke nicht verändern, weil sich sonst die Eichung des Apparates ändert. Der Zeiger ist bei den Feinmeßgeräten messerartig zugescharft und schwingt dicht über einer Skale, zu der parallel ein Spiegelstreifen angeordnet ist. Letzterer ist angebracht, um eine Parallaxe bei der Ablesung zu vermeiden. Die Skale besitzt bei fast allen Feinmeßgeräten

150 annähernd einander gleiche Intervalle; die zu messende Stromstärke erhält man durch Multiplikation der abgelesenen Skalenteile mit einer Zahl *K*, der „Konstanten“ des Apparates, die auf eine runde Zahl abgeglichen wird; z. B. ist die Konstante des häufig gebrauchten Milliampereometers $\frac{1}{1000}$. Bei gut gebauten Drehspulenapparaten erfolgt die Einstellung fast aperiodisch und mit großer Schärfe; die Ablesungen sind ohne Schwierigkeit bis auf 0,1 Skalenteile ausführbar. Da sich die Spule in einem starken Magnetfeld befindet, so sind die Apparate gegen äußere Magnetfelder verhältnismäßig unempfindlich. Das Erdfeld pflegt gerade noch merkbar zu sein.

Drehspulenapparate werden mit Vorwiderstand als Spannungsmeser (198b), mit Nebenwiderstand zur Messung größerer Ströme gebraucht (197).

Unter den im Handel erhältlichen empfindlichen Apparate mit Spitzenlagerung sind weit verbreitet:

Zahl der Teilstriche	Meßbereich	Widerstand
150	60 mV	2 Ω
150	45 mV	10 Ω

Die Drehspulenapparate werden vielfach auch als Schaltbrettapparate mit direkt ablesbarer Skale ausgeführt. Zuweilen wird, um Platz zu sparen, der Zeiger am Ende rechtwinklig umgebogen, so daß der über der Skale spielende Teil parallel zur Drehachse steht; die Skale bildet ein zylinderförmig gebogenes schmales Band (Profilinstrumente, s. ETZ 1915, S. 28).

Literatur: Handbuch der Elektrotechnik II, 4—6 von R. O. Heinrich und D. Bercovitz. Ferner Hausrath, Die Galvanometer. Helios 1909, S. 133, 173—269; Brion, Helios 1909, S. 1—49. Über Temperaturkompensation ETZ 1910, S. 1219; 1911, S. 299 u. 482, 700; Keinath, Technik der elektrischen Meßgeräte. 1921.

Differentialgalvanometer.

(165) Verwendung. In denjenigen Fällen, wo man die Gleichheit zweier Ströme untersuchen oder eine geringe Ungleichheit derselben mit großer Schärfe messen will, kann man ein Galvanometer mit zwei gleichen Wicklungen verwenden, durch die man die zu vergleichenden Ströme in entgegengesetzten Richtungen sendet.

Der Ausschlag ergibt die Differenz der zu vergleichenden Ströme, wenn man die Angaben des Instruments in absolutem Maße kennt; dazu ist erforderlich, daß man das Galvanometer als einfaches Instrument mit nur einer von beiden Windungslagen eicht. Methoden, bei denen das Differentialgalvanometer verwendet werden kann, werden hierdurch meist sehr bequem und geben bei richtig gewählter Anordnung sehr genaue Resultate.

A u s f ü h r u n g. Als Differentialgalvanometer kann man jede beliebige Form des Galvanometers benutzen, wenn man ihm zwei gleiche Wicklungen gibt. Die Drähte sollen miteinander aufgewunden werden, d. h. jede Galvanometerrolle soll beide Drähte nebeneinander enthalten; andernfalls entstehen bei aufgehängten Magnetnadeln leicht seitliche Bewegungen der letzteren.

Statt zwei Wicklungen von gleicher Wirkung zu nehmen, kann man auch solche Multiplikatoren verwenden, deren Wirkungen in einem bekannten Verhältnis stehen, oder kann einer Wicklung einen passenden Nebenschluß geben.

P r ü f u n g e s e i n e s D i f f e r e n t i a l g a l v a n o m e t e r s. Verbindet man die beiden Windungen hinter- und gegeneinander, so muß die Nadel auch bei den stärksten Strömen, die bei der Verwendung des Instrumentes vorkommen, in Ruhe bleiben. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so kann man die Wirkung etwa durch Zusatzwindungen, die man der schwächeren Spule zufügt, gleichmachen. In manchen Fällen ist gleiche Wirkung der Spulen nicht erforderlich, z. B. bei der Widerstandsmessung nach der K o h l r a u s c h s c h e n Methode des übergreifenden Nebenschlusses; in diesem Fall ist es auch nicht nötig, daß beide Spulen gleichen Widerstand besitzen (J a e g e r, Zeitschr. Instrk. 1904, S. 288).

Wahl eines passenden Galvanometers.

(166) Die Wahl des zu einer Messung zu benutzenden Galvanometers hängt von der Genauigkeit ab, die man zu erreichen wünscht.

Wenn diese nicht größer als etwa $1\%/\infty$ ist, kann man vorteilhaft die sehr bequemen Zeigerinstrumente anwenden, welche direkt die zu messende Größe abzulesen gestatten (Präzisionsamperemeter, -voltmeter usw. (164)).

Auch für noch größere Meßgenauigkeit kommt man häufig bei Anwendung von Nullmethoden noch mit Zeigergalvanometern aus, besonders wenn solche mit aufgehängtem System benutzt werden z. B. „Pyrometer“ von Siemens & Halske.

Zu den im Gebrauch oft unbequemen Spiegelgalvanometern wird man nur dann greifen, wenn man eine größere Genauigkeit wünscht, oder die vorhandenen Zeigergalvanometer für den beabsichtigten Zweck nicht ausreichen (Messung s e h r kleiner Ströme, Spannungen usw.).

Wenn es sich darum handelt, die Empfindlichkeit eines Galvanometers möglichst auszunutzen, so muß man die Meßmethoden hinsichtlich der Widerstands-anordnung usw. danach einrichten oder bei gegebenen Anordnungen eine passende Schaltung des Galvanometers wählen oder z. B. bei Drehspulengalvanometern unter mehreren das den Widerstandsverhältnissen der Anordnung am meisten entsprechende wählen. Man muß im allgemeinen möglichst danach streben, der Meß-anordnung einen so kleinen Widerstand zu geben als möglich, weil dann die Spannungsempfindlichkeit des Galvanometers, welche für die Meßgenauigkeit bestimmend ist, am größten wird. Näheres hierüber siehe z. B. Jaeger, Zeitschr. Instrk., Bd. 26, S. 69, 1906.

Für b a l l i s t i s c h e Messungen sind Galvanometer von großer Schwingungsdauer (ungedämpfte halbe Periode etwa 10 s und mehr) zu wählen, weil sonst der Umkehrpunkt nicht mit Sicherheit abzulesen ist.

Galvanometer von großem Widerstand finden z. B. bei Isolationsmessungen oder beim Arbeiten mit einem Kompensationsapparat von großem Widerstand Anwendung.

Dynamometer.

(167) **Das Elektrodynamometer** (W. Weber) besteht aus zwei stromdurchflossenen Spulen (oder Spulensystemen), von denen die eine fest steht, die andere beweglich ist. Werden die feste und bewegliche Spule bzw. von den Gleichströmen I und i durchflossen, so ist die Kraft (Anziehung oder Abstoßung), die sie aufeinander ausüben, gleich $K I i$. Dabei hängt K von den Windungszahlen und der geometrischen Lage der Spulen zueinander ab. Schaltet man beide Spulen hintereinander, so daß sie von demselben Strom I durchflossen werden, so ist die Kraft, die sie aufeinander ausüben, proportional dem Quadrat der Stromstärke. Macht sich der Einfluß des Erdfeldes auf das bewegliche System fühlbar, so macht man eine zweite Einstellung, nachdem die Stromrichtung von I und i umgedreht ist, und mittelt. Über die Verwendung des Dynamometers zu Wechselstrommessungen s. (223) ff.

(168) **Stromwage. Torsionsdynamometer.** Nach der Ablenkung durch den Strom werden die beiden Spulen durch Gewichte (Stromwagen) oder durch Torsionsfedern (Torsionsdynamometer) in ihre ursprüngliche Lage zueinander zurückgeführt. Beide Apparategattungen sind heutzutage als veraltet anzusehen. Eine neuere Form bei Drysdale, Electrician Bd. 76, S. 523, 558, 593, 714.

(169) **Spiegeldynamometer** dienen zur Erzielung größerer Empfindlichkeit; der Ausschlagwinkel wird mit Spiegel und Skala (149) beobachtet. Da dieser in der Regel nur klein ist, so bleibt K (167) nahezu eine Konstante, namentlich wenn die Wicklungen der Spulen geeignet ausgeführt werden (vgl. O. Frölich, Theorie des kugelförmigen Elektrodynamometers, Pogg. Ann. Bd. 143, S. 643, 1871, in neuer Form ausgeführt von S. & H. — F. Kohlrausch, Wied. Ann. Bd. 11, S. 653, 1880; 15, S. 550, 1882, ausgeführt von H. & B r.).

Zeigerapparate. Über Wechselstrommessungen mit direkt zeigenden Dynamometern und Induktionsmeßgeräte s. (218) ff.

Das Telephon als Meßinstrument für Wechselströme; Vibrationsgalvanometer.

(170) **Das Hörtelephon** ist als empfindliches Nullinstrument bei Wechselstrommessungen verwendbar, z. B. an Stelle des Galvanometers im Brückenweig einer von Wechselstrom durchflossenen Wheatstoneschen Brücke. Über seine Anwendung vgl. die Messung von elektrolytischen Widerständen (193), Induktivitäten (208, 209) und Kapazitäten (212 ff.). Über die Empfindlichkeit von Telephonen s. M. Wien, Ann. d. Phys. (4) Bd. 4, S. 450, 1901; Bd. 18, S. 1049, 1905. Arch. f. Physiol. Bd. 97, S. 1, 1903. Bei niedrigen Frequenzen wird das Ohr gegen Verschwinden des Tones sehr unempfindlich. Man kann aber die Empfindlichkeit wesentlich steigern, indem man in die Nullstromleitung einen Unterbrecher mit hoher Unterbrechungszahl einschaltet (Ztsch. f. Instrk. 1920, S. 123).

Über das optische Telephon von M. Wien s. Wied. Ann. Bd. 42, S. 593; Bd. 44, S. 681, 1891.

(171) **Die Vibrationsgalvanometer** sind Nadel- oder Spulengalvanometer, deren bewegliche Systeme ein kleines Trägheitsmoment und eine hohe Richtkraft besitzen, so daß sie eine verhältnismäßig große Eigenfrequenz der mechanischen Torsionsschwingungen besitzen. Wird durch das Galvanometer ein Wechselstrom geschickt, so gerät das bewegliche System, falls die Frequenz des Wechselstromes mit der Eigenfrequenz des beweglichen Systems übereinstimmt, in starke Schwingungen. Bei starker Verstimmung dagegen bleibt das bewegliche System nahezu in Ruhe (Resonanzinstrument).

Man beobachtet die Schwingungen, indem man das Licht eines Spaltes oder eines Glühfadens auf einen am beweglichen System befestigten Spiegel fallen läßt und die zurückgeworfenen Strahlen auf einem Schirm oder in einem Fernrohr

betrachtet. Gerät das System in Schwingungen, so wird das Bild in ein breites Band auseinandergezogen.

Die Vibrationsgalvanometer werden meistens als „Nullinstrumente“ gebraucht, d. h. es wird auf verschwindenden Strom eingestellt. Um eine möglichst hohe Empfindlichkeit zu erzielen, muß eine Vorrichtung vorhanden sein, um die Eigenfrequenz zu verändern und auf die Frequenz des erregenden Wechselstromes abstimmen zu können.

Auf dem Prinzip der Nadelgalvanometer beruhen die Vibrationsgalvanometer von Rubens (Wied. Ann. Bd. 56, S. 27, 1896), M. Wien (Ann. d. Phys. (4) Bd. 4, S. 442, 1901), Schering (ETZ 1918, S. 410) und Agnew, J. Am. I. E. E. Bd. 39, S. 158).

Bei den als Vibrationsgalvanometern dienenden Spulengalvanometern tritt ähnlich wie bei den Oszillographen an die Stelle der Spule ein bifilares Band, das zwischen den Polen eines Dauermagnetes hindurchgezogen ist. Länge und Spannung der Bänder bestimmen die Eigenfrequenz. (Campbell, Phil. Mag. (6) Bd. 14, S. 494, 1907; Duddell, ebenda Bd. 18, S. 168, 1909; Schering u. Schmidt, Arch. f. Elektrot. Bd. 1, S. 254, 1912 u. Ztschr. f. Instrk. Bd. 39, S. 140).

Über die Theorie s. Zölllich, Arch. f. El. Bd. 2, S. 369 u. Bd. 3, S. 369; Gruhn, Arch. f. El. Bd. 8, S. 210.

Über Vibrationselktrometer: Greinacher, ETZ 1913, S. 1485 und Curtis, Bull. Bur. of Stand. 11, S. 535, 1915. Vibrationsleistungsmesser, Biermanns, Arch. f. El. Bd. 9, S. 182.

Elektrokalorimeter.

(172) Hitzdrahtinstrumente. Die in einem stromdurchflossenen Drahte erzeugte Wärme ist proportional dem Quadrat der Stromstärke und bei Wechselstrom infolge der Wärmeträgheit dem Quadrat des Effektivwertes (129, 130). Abgesehen von sekundären Störungen sind also Elektrokalorimeter Apparate, welche mit Gleichstrom geeicht bei Gebrauch mit Wechselstrom richtige Angaben machen. Die einzelnen Apparategattungen unterscheiden sich durch die Art und Weise, wie die Stromwärme gemessen wird.

a) Hartmann & Braun benutzt in seinen Hitzdrahtapparaten die Verlängerung des Drahtes. Der zu messende Strom durchfließt einen Platiniridiumdraht (in älteren Apparaten einen Platinsilberdraht) AB (Abb. 47); an einem mittleren Punkte greift seitlich ein zweiter Draht an, dessen Ende E an der Grundplatte befestigt ist; ein dritter sehr feiner Draht DF , dessen Ende in der Mitte des zweiten Drahtes angreift, führt über eine Rolle R und wird an seinem andern Ende durch eine Feder F gespannt erhalten. Erwärmt sich der erste Draht, so wird sein mittlerer Punkt und derjenige des zweiten Drahtes zur Seite gezogen, die Rolle und der mit dieser verbundene Zeiger Z dreht sich. Der Strommesser wird in Verbindung mit Nebenwiderständen bis zu hohen Stromstärken gebaut. Bei den Apparaten mit Platiniridiumdrähten werden die Hitzdrähte bis zu verhältnismäßig hohen Temperaturen beansprucht; infolgedessen treten keine Nullpunktswanderungen mehr auf (ETZ 1910, S. 268).

Bei den Apparaten zur Messung von Hochfrequenzströmen ist eine größere Zahl von parallel geschalteten breiten, dünnen Hitzbändern symmetrisch zwischen zwei parallelen Ringen ausgespannt (ETZ 1911, S. 1134; Jahrb. d. drahtl. Tel. Bd. 5, S. 1912).

Hitzdrahtspiegelinstrumente: Friese (ETZ 1895, S. 726, s. auch S. 784, 812); Fleming (Phil. Mag. Ser. 6, Bd. 7, S. 595, 1904).

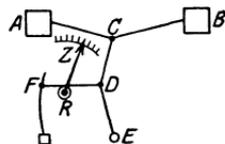


Abb. 47. Hitzdrahtstrommesser.

b) Messung durch Widerstandserhöhung (Barretter). Der Hitzdraht bildet einen Zweig einer Wheatstoneschen Brücke, deren übrige Zweige aus einander gleichen Widerständen und Drosselspulen bestehen. Im Hauptzweig ist eine Hilfs-Gleichstromquelle, im Brückenweig ein Galvanometer eingeschaltet. Legt man an den Zweig mit dem Hitzdraht eine Wechselstromquelle, so kann der Wechselstrom wegen der Drosselspulen nicht in die anderen Zweige treten, er erwärmt also nur den Hitzdraht und stört dadurch das Gleichgewicht der Brücke. Die Empfindlichkeit der Barretter kann sehr groß gemacht werden. Fessenden, ETZ 1902, S. 586 ff. B. Gati, El. World Bd. 47, S. 1341, 1906. Phys. Z. Bd. 10, S. 897, 1909. K. E. F. Schmidt, Phys. Z. 1906, S. 642; 1907, S. 601. Dynamobolometer von Paalzwow und Rubens (Wied. Ann. Bd. 37, S. 529, 1889). Tissot, J. phys. Bd. 3, S. 525, 1904.

c) Man kann auch thermoelektrische Kräfte benutzen, indem man in jeden der vier Zweige einer Wheatstoneschen Brücke ein (oder mehrere) Thermolemente 1—4 schaltet (Abb. 48), von denen je eine Lötstelle (Verzweigungspunkt) an einen dicken Metallklotz gelötet ist, so daß sie konstante Temperatur besitzt. Haben alle vier Zweige den gleichen Widerstand, so gelangt kein Wechselstrom in den Brückenweig. Andererseits ist die Richtung der Thermokräfte so gewählt, daß sie durchweg einen Gleichstrom derselben Richtung in den Brückenweig schicken, der dort mit einem passenden Gleichstrominstrument

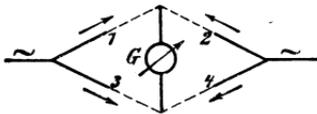


Abb. 48. Strommessung durch Thermolemente.

G gemessen wird (Salomonson, Phys. Zeitschr. Bd. 7, S. 463, 1906). Durch Anwendung sehr feiner Drähte und Einschließen derselben in ein Vakuum kann eine sehr große Empfindlichkeit erreicht werden (Schering, Zeitschr. Instrk. Bd. 32, S. 69, 101, 1912). Technische Apparate nach diesem Prinzip von Guggenheimer (ETZ 1912, S. 73, 94); einfacher Gerlach, Helios Bd. 19, S. 63, 1913.

Über das Thermogalvanometer von Duddell s. Electrician Bd. 56, S. 559, 1906.

Elektrometer.

(173) Das **Elektrometer** benutzt zur Messung die mechanischen Kräfte, welche Elektrizitätsmengen aufeinander ausüben. Diese Kräfte sind von den Spannungen zwischen den einzelnen Teilen abhängig, sie sind auch bei hohen Spannungen klein; infolgedessen erfordert das Arbeiten mit Elektrometern Umsicht und peinliche Sorgfalt. Die Apparate eignen sich deshalb mehr für wissenschaftliche Laboratorien als für technische Messungen, sind aber für gewisse Messungen unentbehrlich.

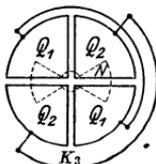


Abb. 49. Quadrantenelektrometer.

Das Schutzring-Elektrometer besteht aus zwei ebenen, wagrechten Platten, von denen die untere, größere feststeht, während die obere, kleinere aufgehängt ist; außerdem wird die obere Platte durch eine feststehende Ringplatte zu der Größe der unteren ergänzt. Die bewegliche Scheibe erfährt eine Anziehungskraft $= \frac{S}{8\pi} \left(\frac{V - V_0}{a} \right)^2$, worin S die Größe der beweglichen Scheibe, a den Abstand und $V - V_0$ die Spannung zwischen den beiden Scheiben bedeutet.

Das Quadrantenelektrometer enthält vier isolierte Quadranten (Abb. 49) (scheiben- oder schachtelförmig), von denen je zwei gegenüberliegende $Q_1 Q_1$ bzw. $Q_2 Q_2$ leitend miteinander verbunden werden; ober- oder innerhalb der Quadranten schwebt eine leichte Nadel N von der Form einer 8 (Biskuit genannt), welche von den Quadranten isoliert ist. Das Ganze wird von einem möglichst allseitig geschlossenen metallischen Gehäuse umgeben.

Die Ladung wird der Nadel am besten durch den metallischen Aufhängefaden zugeführt (W. Thomson, Hallwachs, Wied. Ann. Bd. 29, S. 1, 1886).

Es wird Flüssigkeitsdämpfung und für empfindlichere Apparate Luftdämpfung angewandt; Dämpferflügel und Dämpfergehäuse müssen auf demselben Potential sein.

Bei Messungen statischer Potentiale wird das Gehäuse meist an Erde gelegt; die Isolation (Bernstein oder Quarz) muß möglichst vollkommen sein. Bei Messungen dynamischer Potentiale, die für technische Zwecke in Frage kommen, brauchen diese beiden Bedingungen nicht erfüllt zu sein.

(174) Messungen mit dem Quadrantenelektrometer. Die allgemeine Formel für die Ablenkung eines Quadrantenelektrometers lautet (Zeitschr. Instrk. 1903, S. 97):

$$\alpha = K \frac{(V_1 - V_2)(V_n - \frac{1}{2}(V_1 + V_2))}{1 + a(V_n - V_1)(V_n - V_2) + b(V_1 - V_2)^2}$$

Darin bedeuten V_n , V_1 , V_2 die Potentiale, auf denen sich Nadel und Quadrantenpaare befinden, gemessen gegen das Potential des Gehäuses. Über den Einfluß der Kontaktpotentiale s. Hallwachs (Wied. Ann. Bd. 29, S. 1, 1886). Durch geeignetes Kommutieren kann der Einfluß der Kontaktpotentiale beseitigt werden; gleichzeitig wird dadurch für die einzelnen Anwendungen die Formel vereinfacht.

Die Empfindlichkeit der Elektrometer ist abhängig von Länge, Durchmesser und Material der Fäden, Höhe der Quadrantenschachtel, Form und Größe der Nadel.

1. **Quadrantenschaltung.** Zwischen Nadel und Gehäuse hohes Hilfspotential H ; die zu messende Potentialdifferenz E an die Quadrantenpaare, von denen das eine mit dem Gehäuse verbunden ist. Die Ablenkung ist proportional $E \cdot H$. Die Methode eignet sich vornehmlich zur Messung kleiner Potentialdifferenzen.

2. **Nadelschaltung.** Die beiden Quadranten werden auf entgegengesetzt gleiche Hilfspotentiale $\pm H$ gegen Gehäuse gebracht. Die Nadel wird auf das zu messende Potential E gebracht. Die Ablenkungen der Nadel sind proportional $E \cdot H$.

3. **Doppel- oder idiostatische Schaltung.** Das eine Quadrantenpaar wird mit dem Gehäuse verbunden, das andere Paar und die Nadel auf das zu messende Potential gebracht. Die Ablenkungen der Nadel sind angenähert dem Quadrate des letzteren proportional. Diese Schaltung eignet sich vornehmlich zur Messung höherer Potentiale.

Über die Anwendung des Quadrantenelektrometers für Wechselstrommessungen (224, 225). Über Binantenelektrometer s. Dolezalek. Ann. d. Phys. (4) Bd. 26, S. 312, 1908. Über Saitenelektrometer (Edelmann, München) s. Ztschr. Instrk. 1907, S. 291 und Lutz, Phys. Ztschr. Bd. 9, S. 642, 1908.

(175) Direkt zeigende technische Elektrometer dienen in der Regel zur Spannungsmessung und bestehen aus einem festen und einem beweglichen Plattensystem, die voneinander isoliert sind und die beiden Pole des Instrumentes bilden. Das bewegliche System trägt den Zeiger für die Skale und ist entweder an einem Metallfaden aufgehängt (z. B. Multizellulervoltmeter von Lord Kelvin für Spannungen von 100—1000 V; Hartmann & Braun) oder in Spitzen gelagert, die gleichzeitig zur Zufuhr der Ladung des Systems dienen. Die Skale wird empirisch gefunden. Schaltbrettapparate der AEG., S. & H., H. & Br. für Spannungen von 1000—10 000 V; für höhere Spannungen Vorschaltkondensatoren. A. Franke, Wied. Ann. Bd. 50, S. 163, 1893. Peukert, ETZ, Bd. 1898, S. 657 und Bd. 1901, S. 265. Szilard, ETZ 1914, S. 537. Dieckmann, Phys. Ztschr. 13, S. 108.

(176) **Elektrometer für sehr hohe Spannungen.** Zwischen den Platten eines Luftkondensators, die an die zu messende Potentialdifferenz angelegt werden, ist unter 45° Neigung zu den Platten an einem feinen Faden ein dünnes Aluminiumblech aufgehängt. Ebert und Hoffmann (Ztschr. Instr. 1898, S. 1). — Elektrostatistische Wage von Cremieu und Müller (Ann. d. Phys. (4) Bd. 28, S. 585, 1909). Um ein Überschlagen von Funken zwischen den einander anziehenden Metallteilen zu verhindern, wird als Dielektrikum entweder Öl (A. Grau, ETZ, Bd. 1905, S. 269 und Jona, ETZ 1906, Bd. 27, S. 295. Westinghouse Ges., Electrician 55, S. 705, 1905. Siemens & Halske) oder Preßluft (Tschernyschew, Phys. Ztschr. 1910, Bd. 11, S. 445) verwendet, ferner Abraham u. Villard, J. phys. 1911, Bd. 1, S. 525. Palm (H. & Br.) verwendet ebenfalls Druckluft und kompensiert den Ausschlag auf elektrodynamischem Wege (ETZ Bd. 41, S. 695). Kugelvoltmeter von Koch und Sterzel.

(177) Auch das Goldblattelektroskop ist als Meßinstrument ausgebildet, indem man an einer Skale die Divergenz der Blättchen abliest (Exnersches Elektroskop, verbessert von Elster und Geitel, Phys. Ztschr. Jahrg. 4, S. 137; vgl. auch Braun, Wied. Ann. 1887, Bd. 31, S. 856) u. Berndt, Helios Bd. 26, S. 429, 437, 449, 464).

Über Lippmannsche Kapillarelektrometers. Pogg. Ann. Bd. 149, S. 546, 1873. Literatur bei Ostwald-Luther, Physiko-chemische Messungen. 3. Aufl. Leipzig 1910.

Schreibende Meßgeräte.

(178) Direkt zeigende Meßgeräte werden zu schreibenden gemacht, indem an dem Zeiger des Meßgerätes eine Schreibfeder befestigt wird, welche auf einem von einem Uhrwerk bewegten Papierstreifen die Stellungen des Zeigers in Abhängigkeit von der Zeit aufschreibt. Da durch das Ausfließen der Tinte und das Aufliegen der Feder reibende Kräfte entstehen, so müssen diese Meßgeräte eine starke Richtkraft besitzen (z. B. Drehfeldmeßgeräte) (228). Die Uhrwerke für die Fortbewegung des Papierstreifens können so eingerichtet werden, daß ihnen verschieden große Geschwindigkeiten erteilt werden können. Rasch veränderliche Vorgänge erfordern kurze Eigenschwingungsdauer des beweglichen Systems und starken Papiervorschub, s. auch Oszillographen (237).

Um die Reibung der Feder unschädlich zu machen, sind zwei Methoden im Gebrauch. Bei der ersten trägt der Zeiger keine Schreibfeder, sondern einen Metallstift, der von einem Bügel in kurzen gleichmäßigen Zeitintervallen gegen ein vor dem Registrierstreifen liegendes Farbband gedrückt wird. Nach Abheben des Bügels schwebt also der Zeiger wieder frei und kann sich neu einstellen.

Bei der zweiten Methode (Siemens & Halske) läßt man vermittelt eines kleinen Hilfsinduktors einen Funkenstrom vom Zeiger durch das Registrierpapier hindurch auf eine dahinterliegende Metallplatte überströmen; der Funkenstrom durchbohrt das Papier und hinterläßt entsprechend der Zeigereinstellung eine feine Linie.

Die Registrierung mittels Photographie hat sich wenig eingebürgert.

Die Apparate mit drehbarem Zeiger haben den Nachteil, daß sie die zu messende Größe nicht in geradlinigen, sondern in kreisförmigen Koordinaten aufzeichnen. Um geradlinige Koordinaten zu erhalten, benutzte Hartmann & Braun früher die Weicheisenapparate von F. Kohlrausch, bei denen ein Weicheisenzyylinder in eine Spule mit vertikaler Achse gezogen wird.

Siemens & Halske (ETZ 1910, S. 172; 1915, S. 28) wendet bei seinen Drehspul- und Drehfeldmeßgeräten eine eigentümliche Hebelübertragung an, durch welche sich die Spitze des Zeigers nahezu in einer geraden Linie bewegt (Ellipsenlenker). Namentlich für Ferrarisinstrumente ist die Aufzeichnung in geradlinigen Koordinaten auch auf anderem Wege erreicht, z. B. H. & Br., ETZ 1913, S. 91;

Keinath, Helios F 1913, S. 309 und E 1915, S. 585, 701, 722; ders. ETZ 1913, S. 91; 1915, S. 633, 651, 662, 679 und „Die Technik der elektrischen Meßgeräte“ S. 65, München und Berlin 1921. Zschr. f. Fernmeldet S. 1, S. 141, 168.

Voltmeter.

(179) Das Voltmeter mißt die Stärke der Ströme (Gleichströme) an ihrer Einwirkung auf zersetzbare Leiter; vgl. (78).

Das Voltmeter dient zur Bestimmung der durch eine Leitung geflossenen Elektrizitätsmenge Q , kann aber auch zur Eichung anderer Strommesser verwendet werden.

Die Kathode, an der das Metall niedergeschlagen (oder der Wasserstoff ausgeschieden wird), ist mit dem negativen Pol, d. h. beim Gebrauch von Elementen mit dem Zink, beim Gebrauch von Akkumulatoren mit dem Bleipol zu verbinden.

Über das Wasser-, Knallgas- und Wasserstoffvoltmeter siehe Kohlrausch, Lehrbuch.

Von den Metallvoltmetern wird das Silbervoltmeter zur Messung schwächerer, das Kupfervoltmeter für stärkere Ströme benutzt. Das Quecksilbervoltmeter spielt in der Technik als „Stia-Zähler“ eine Rolle.

Durch das Silbervoltmeter ist die gesetzliche Stromeinheit (das Ampere) definiert, indem nach dem Gesetz vom 1. Juni 1898 das Ampere durch einen Silberniederschlag von 1,118 mg/s dargestellt wird. Als Silbervoltmeter benutzt man einen Silber-, Gold- oder Platintiegel, der mit Silberlösung (15—30 proz. Lösung von neutralem Silbernitrat) gefüllt auf eine blanke Kupferplatte gestellt wird. Letztere ist mit einer Klemmschraube verbunden, bei welcher der Strom austritt. In den Tiegel taucht von oben als Anode eine Silberstange, ohne den Boden oder die Wände des Tiegels zu berühren (Abb. 50), Kohlrauschsche Form. Damit von der Silberstange nicht Teilchen, die sich absondern, in den Tiegel fallen, bringt man unter der Stange im Tiegel ein kleines Glasschälchen an, das an einigen Glasstäbchen angeschmolzen ist und mittels der letzteren in den Tiegel eingehängt wird. Organische Substanzen als Umhüllung der Anode werden besser vermieden. Statt des Platintiegels kann man auch ein Platinblech verwenden, das in irgend einem passenden Gefäß einem Silberblech gegenübergestellt wird. Die Kathode wird auf diese Weise leichter und billiger. Die Ränder des Bleches biegt man etwas nach der von der Anode abgewandten Seite um. Näheres hierüber siehe Kohlrausch, Lehrbuch; hinsichtlich sehr genauer Messungen mit dem Silbervoltmeter vgl. z. B. auch Jaeger und von Steinwehr, Zeitschr. Instrk. 1908, S. 327 und 353.

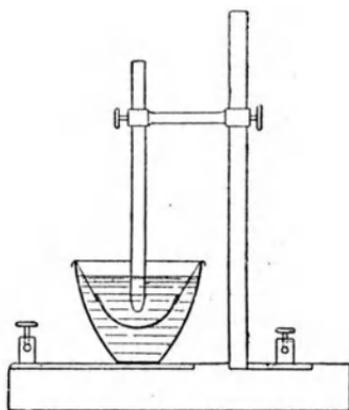


Abb. 50. Silbervoltmeter.

Beim Kupfervoltmeter verwendet man als Anode ein mit elektrolitisch gefälltem Kupfer überzogenes oder aus solchem hergestelltes Blech; als Kathode stellt man diesem ein Kupferblech oder noch besser ein Platinblech gegenüber. Näheres hierüber siehe bei Förster, Zeitschr. Elektrochem. Bd. 3, S. 479, 1897.

Normalelemente.

(180) **Normalelemente** werden aus chemisch reinen Stoffen nach genauen Vorschriften zusammengesetzt. Sie dürfen bei den Messungen stets nur mit äußerst schwachen Strömen beansprucht werden, damit keine erhebliche Polarisierung eintritt. Haben die Elemente eine geringe Polarisierung erfahren, so nehmen sie nach einiger Zeit wieder den normalen Wert an. (Jaeger, Ann. d. Phys. (4) Bd. 14, S. 726, 1904).

Die Normalelemente spielen eine wichtige Rolle, indem sie neben den Normalwiderständen bei praktischen Messungen die zweite elektrische Grundeinheit repräsentieren. Im Jahre 1908 wurde in London das Westonsche Element als Normalelement zur internationalen Annahme empfohlen. Nebenher findet auch das Clarkelement heute noch Anwendung, obwohl es im Gebrauch infolge seines großen Temperaturkoeffizienten von fast $10^\circ/\infty$ für den Grad erheblich unbequemer als das Westonsche Element und daher jetzt durch dieses fast völlig verdrängt ist.

(Zusammenfassende Darstellung über Normalelemente siehe: Jaeger, Die Normalelemente und ihre Anwendung in der elektrischen Meßtechnik. 1902. Halle a. S., W. Knapp u. Elektr. Meßtechnik J. A. Barth 1922.)

(181) **Das Normalelement von Clark** besteht aus Quecksilber, darüber Quecksilberoxydsulfat (Merkurosulfat) am positiven und amalgamiertem Zink in Zinksulfat am negativen Pol. Die EMK ist rund 1,433—0,0012 ($t=15^\circ$) Volt. Das Element soll in den letzten 24 Stunden vor dem Gebrauch keine Temperaturschwankungen von mehr als 5°C durchgemacht haben. (Vgl. Kahle, Wied. Ann. Bd. 51, S. 174, 203. Bd. 67, S. 1.)

(182) **Das Normalelement von Weston** besteht aus Quecksilber oder amalgamiertem Platin in Quecksilberoxydsulfat und Kadmiumamalgam in Kadmiumsulfat. Es gibt zwei Formen; die der Physik.-Techn. Reichsanstalt, welche auch in anderen Ländern als Normal der Spannungseinheit angenommen ist, hat festes Kadmiumsulfat im Überschuß (amtlich jetzt Westonsches Element genannt), während von der Weston-Instrument-Co. auch Elemente mit bei 4°C gesättigter Kadmiumsulfatlösung ausgegeben werden, die praktisch keine Änderung der Spannung mit der Temperatur zeigen. Da zwischen diesen beiden Typen bei Zimmertemperatur eine Spannungsdifferenz von etwa $0,4^\circ/\infty$ besteht (das Element mit der ungesättigten Lösung hat die höhere Spannung), so muß man bei genaueren Messungen darauf achten, welchem Typus das verwendete Element angehört. Beide Formen werden von der Physik.-Techn. Reichsanstalt geprüft.

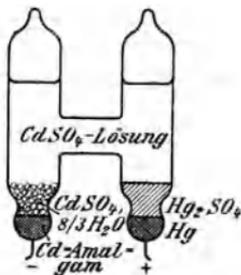


Abb. 51. Westonsches Normalelement.

Das Element hat gewöhnlich H-Form (Abb. 51); zwei unten geschlossene senkrechte Röhren sind durch ein wagrechtes Rohr verbunden. In die Böden der senkrechten Röhren sind kurze Platindrähte eingeschmolzen; der eine dieser Drähte ist mit Kadmiumamalgam von $12\frac{1}{2}\%$ Cd, der andere mit Quecksilber bedeckt; auf dem ersteren liegt bei der Form der Reichsanstalt eine Schicht Kadmiumsulfatkristalle, auf dem letzteren die Paste aus dem Quecksilbersalz (Merkurosulfat), metallischem Quecksilber, Kadmiumsulfatkristallen und einer Lösung von Kadmiumsulfat; dann wird das Element mit einer konzentrierten Kadmiumsulfatlösung gefüllt und die oberen Enden der Röhren verschlossen, am besten abgeschmolzen. Bei dem Element mit ungesättigter Lösung fehlen die Kristalle von Kadmiumsulfat.

Nach den neusten internationalen Vereinbarungen (ETZ 1910, S. 1303) wird als Spannung des Westonschen Elements bei 20° 1,0183 int. Volt angenommen. In der Nähe von 20° berechnet sich die Spannung angenähert als

$$E_t = E_{20} - 0,00004 (t - 20^\circ).$$

Die Spannung des Elementes mit ungesättigter Lösung ist unabhängig von der Temperatur gemäß obiger Festsetzung etwa 1,0187 int. Volt.

Näheres über dieses wichtige Element besonders auch wegen des Merkursulfats siehe noch in den Tätigkeitsberichten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt aus den letzten Jahren (Zeitschr. f. Instrk.).

(183) Andere Normalelemente. Das Kupferzinkelement (Fleming) wird in mehreren Formen als Normalelement empfohlen; das Element kann aber nur bei geringen Ansprüchen an die Genauigkeit benutzt werden. In Fällen, wo es nur auf einen grob angenäherten Wert ankommt, ist auch der Akkumulator als Normalelement zu verwenden; seine Entladungsspannung hängt von der Säurekonzentration und der Temperatur ab und ist durchschnittlich zu etwa 1,9 V anzusetzen. Eine größere Genauigkeit als etwa 5 % kann man dabei aber nicht verbürgen.

Widerstände.

(184) Herstellung von Widerständen. Material. Zur Herstellung von Meßwiderständen eignet sich am besten Manganin (Isabellenhütte in Dillenburg, S. 62). Es hat einen verhältnismäßig großen spezifischen Widerstand (0,42) und einen fast verschwindenden Temperaturkoeffizienten. Außerdem zeichnet es sich durch eine sehr kleine Thermokraft gegen Kupfer aus (1,5 μ V/°C). Andererseits oxydiert sich Manganin verhältnismäßig leicht, man muß es daher mit einer Schellackschicht überziehen. Andere Widerstandsmaterialien mit ähnlichen Eigenschaften sind z. B. Kruppin, Rheostatin, Resistin; vgl. Tab. S. 62.

Leiterformen und Kerne. Größere Widerstände (von 0,1 Ω an aufwärts) werden in der Regel aus Drähten, kleine wegen der besseren Kühlung aus Blechen hergestellt. Als Kern der Rollen dienen am besten mit dünnem Seidenband bewickelte Metallröhren oder, wenn kein Metall angewandt werden soll, Porzellanrollen. Die Drähte sollen doppelt mit Seide umspinnen sein; sogenannte Emailldrähte sind für gute Widerstände nicht brauchbar.

Manche Vorteile bietet es, die Widerstände in Form von dünnen seidenumspinnenen Drähten oder blanken dünnen Bändern (Platte) auf Glimmerblätter aufzuwickeln. Diese Widerstände lassen infolge der Knickstellen an den Kanten des Glimmerblattes gelegentlich an Konstanz zu wünschen übrig.

Nach dem Wickeln werden die Widerstände schellackiert und in einem Ofen bei 140° C 10 Stunden lang „künstlich gealtert“, wobei der Widerstand um 1—2 % abnimmt. Bei genauen Widerständen müssen alle Verbindungen zwischen Manganinkörper und Kupferzuleitungen mit Hartlot hergestellt werden.

Art der Wicklung. In der Regel werden Drahtwiderstände bifilar gewickelt, um ihre Selbstinduktion möglichst herabzusetzen. Je dicker der Widerstandsdraht ist (kleine Widerstände), um so unvollkommener wird dies erreicht. Über eine Wicklungsart zur vollkommeneren Beseitigung der Selbstinduktion s. K. W. Wagner, ETZ 1915, S. 606, 621.

Bei größeren Widerständen (500 Ω) macht sich die Kapazität störend bemerkbar. Ihre Wirkung wird aufgehoben durch geeignete Unterteilung der Widerstandsrollen und die Wicklung von Chaperon (151).

Weitere Literatur: Orlich, Verh. d. phys. Ges. 1910, S. 949. Curtis u. Grover, Bull. Bur. of Stand. 1912, Bd. 8, Nr. 3. Wenner, Weibel und Silsbee, Bull. Bur. of Stand., Bd. 12, S. 11. Orlich u. Schultze, Arch. f. El. Bd. I, S. 1.

(185) Normalbüchsen für größere Widerstände. Die Normalbüchsen für Widerstände von 0,1 bis 10 000 Ω besitzen als Zuleitungen zwei starke Kupferbügel, die in zwei Quecksilbernäpfe eingehängt werden. Der Widerstand rechnet von einem Quecksilbernapf zum andern. Während der Messung wird die Büchse in ein Petroleumbad eingehängt. Die zeitliche Konstanz der Widerstände ist sehr groß (Jaeger und Lindeck, Ztschr. Instrk. Bd. 18, S. 97, 1898 und Bd. 26, S. 15, 1906). Über geringe Änderungen durch die hygroskopischen Eigenschaften des Schellacks s. Rosa und Babcock (Bull. Bureau of Standards Bd. 4, S. 121, 1907). Lindeck, Ztschr. Instrk. Bd. 28, S. 229, 1908. Grüneisen, Ztschr. Instrk. Bd. 40, S. 115.

(186) Kleine Widerstände. Widerstände unter 0,1 Ω werden schon wegen der Kühlung aus Blechen hergestellt. Im Interesse der Konstanz ist es zu empfehlen, die Bleche nicht dünner als 0,5 mm zu wählen. Bei sehr kleinen Beträgen wird eine größere Zahl von Blechen parallel geschaltet. Sie werden in starke Kupferklötze, die zu den Hauptstromklemmen führen, hart eingelötet. Außerdem zweigen von den Kupferklötzen dicht an den Enden des Manganinkörpers zwei Kupferleitungen zu den Potentialklemmen ab. Der Widerstand rechnet von der einen Verzweigungsstelle bis zur anderen, so daß er fast ausschließlich aus Manganin besteht.

Die kleinen Widerstände werden in zwei Formen hergestellt; der kleine Typ kann bei guter Petroleumkühlung mit 100 W belastet werden, der größere mit 1000 W. Der größere enthält außer einer Rührvorrichtung eine Kühlschlange, durch welche während der Belastung dauernd Wasser fließen muß.

Die gewöhnlichen Normalwiderstände aus Blech dürfen nicht ohne weiteres mit Wechselstrom benutzt werden, weil auf Beseitigung der Selbstinduktion nicht Rücksicht genommen ist. Über praktisch induktionsfreie Normalwiderstände aus bifilar gelegten Blechen s. Orlich, Ztschr. Instrk. Bd. 29, S. 241, 1909; ferner Paterson und Rayner (Journ. Inst. Electr. Eng. Bd. 42, S. 455, 1909), welche wassergekühlte Rohre verwenden; die Induktivität ist nach Campbell (Electrician Bd. 61, S. 1000, 1908) kompensiert. Schering, Ztschr. Instrk. Bd. 39, S. 140.

(187) Widerstandssätze, Rheostaten. Eine größere Zahl von Rollen, die in der oben angegebenen Weise hergestellt sind, wird zu einem Widerstandssatz vereinigt.

a) Stöpselkästen. Die Enden der Rollen werden an Messingklötze geführt, die durch Stöpsel kurz geschlossen werden können (s. Abb. 52). Die Stöpsel

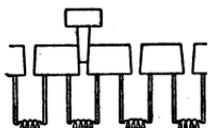


Abb. 52. Stöpselkasten.

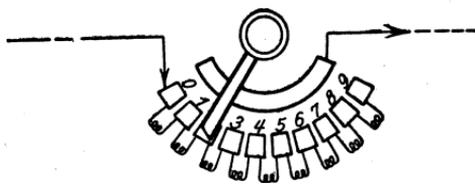


Abb. 53. Kurbelkasten.

müssen gut eingeschliffen sein, die Kontaktflächen sauber gehalten werden. Stöpselkästen verschwinden aus der Praxis mehr und mehr.

b) Kurbelkästen.

Neuere Widerstandssätze werden fast durchweg als Kurbelkästen gebaut; jeder Kurbel entspricht eine Dekade. Am besten macht man die Drehachsen der Kurbel nicht stromleitend, sondern verwendet eine Doppelbürste, die an dem Kurbelarm befestigt ist und einen Kontaktklotz des Widerstandes mit einer parallel zu den Klötzen verlaufenden Leiste verbindet (Abb. 53). Die Bürsten

müssen sehr gut eingeschliffen sein, damit der Übergangswiderstand vernachlässigbar klein bleibt. Die Schleifflächen sind hin und wieder mit reinem Petroleum zu reinigen.

Normalwiderstände und Widerstandssätze werden von der Phys.-Techn. Reichsanstalt geprüft und beglaubigt.

Verfahren der Widerstandsmessung.

(188) **Widerstandsmessung durch Vertauschung.** Man schaltet nach Abb. 54 und reguliert den Widerstand im Kasten R so, daß der Strommesser bei Umlegen des Umschalters seinen Ausschlag nicht ändert; dann ist: $R_x = R$.

(189) **Widerstandsbestimmung durch Messung von Strom und Spannung.** Widerstände sind häufig ziemlich stark von der Temperatur abhängig. Deshalb empfiehlt es sich in praktischen Fällen, die Messung mit der Strombelastung und bei derjenigen äußeren Temperatur vorzunehmen, bei der man den Widerstand zu kennen wünscht. Wird keine zu große Genauigkeit verlangt, so ist es am zweckmäßigsten, den Belastungsstrom I , der auf den gewünschten Wert gebracht wird, durch einen geeigneten Strommesser zu messen und gleichzeitig den zugehörigen Spannungsabfall E an den Klemmen des Widerstandes durch einen geeigneten Spannungsmesser. Zweckmäßig werden dazu gute Präzisionsapparate gebraucht mit einer genügend großen Zahl von Meßbereichen (etwa im Verhältnis 1 : 2 fortschreitend) für Strom und Spannung. Man findet dann den gesuchten Widerstand R_x aus E/I . Vorsicht ist wegen des Eigenverbrauches der Meßapparate am Platze. Man hat zwei Schaltmöglichkeiten:

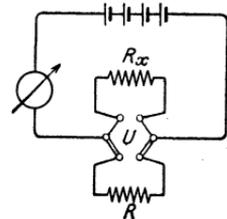


Abb. 54. Widerstandsmessung durch Vertauschung. R Widerstandskasten, R_x zu messender Widerstand.

a) Schaltung für größere Widerstände, die bei höheren Spannungen zu messen sind. Schaltung nach Abb. 55a. Ist e_e der Spannungsabfall im Strommesser bei der Belastung mit dem Strom I , so ist: $R_x = (E - e_e) / I$. e_e pflegt in diesem Fall klein gegen E zu sein.

b) Schaltung für kleinere Widerstände bei hoher Strombelastung. Schaltung nach Abb. 55b. Ist i_e der Stromverbrauch des Spannungsmessers bei der Anzeige von E Volt, so wird: $R_x = E / (I - i_e)$. In diesem Falle pflegt i_e gegen I vernachlässigbar klein zu werden.

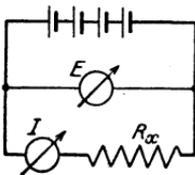


Abb. 55 a.

Widerstandsmessung durch Bestimmung von Strom und Spannung.

Abb. 55 a für größere Widerstände.

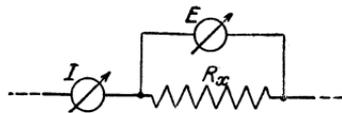


Abb. 55 b.

Abb. 55 b für kleinere Widerstände.

Macht man die Spannungsmessung mit dem Kompensator oder dem Elektrometer, so fällt die eben besprochene Korrektur weg.

(190) **Widerstandsmesser.** Zu einem direkt zeigenden Widerstandsmesser kommt man, indem man nach der Methode (189) die Strom- und Spannungsmessung nacheinander mit demselben Apparat ausführt. Abb. 56 zeigt die Schaltung. Ist der Schalter nach oben gelegt, so gibt der Apparat einen Ausschlag α prop. E , liegt er nach unten, so geht sein Ausschlag auf β zurück,

wo $\beta: \alpha = R_e / (R_x + R_e)$ ist. (R_e innerer Widerstand des Spannungsmessers.) Also $R_x = R_e \frac{\alpha - \beta}{\beta}$. Der Apparat ist praktisch nur brauchbar, wenn R_x von derselben

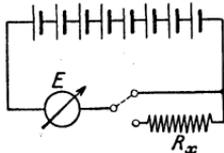


Abb. 56. Widerstandsmesser.

Größenordnung wie R_e ist. Apparat mit mehreren Meßbereichen ETZ 1914, S. 1079.

Die Kreuzspulenapparate haben ein bewegliches System aus zwei kreuzförmig angeordneten Spulen ohne äußere Richtkraft. Die eine Spule führt einen Strom proportional der Spannung an den Widerstandsklemmen, die andere einen proportional dem Belastungsstrom. Der Ausschlag wird proportional dem Quotient aus beiden, d. h. proportional dem Widerstand.

Bruger, ETZ 1894, S. 333; 1906, S. 533; 1915, S. 478. — Helios F. 1912, S. 42; 1916, S. 304. Keina th, Technik elektr. Meßgeräte S. 235, ferner ETZ 1922, S. 18 (Metrohm), und ETZ 1921, S. 1331.

(191) Wheatstonesche Brücke. Für große Meßgenauigkeiten wendet man die sogenannten Brückenmethoden an, und zwar für größere Widerstände (etwa größer als 1Ω) die Wheatstonesche Brücke, für kleinere Widerstände die Thomsonbrücke. Das Arbeiten mit den Brückenmethoden, namentlich mit der Thomsonbrücke, erfordert Gewandtheit und Erfahrung, Fehlerquellen werden leicht übersehen und täuschen dem Arbeitenden leicht eine eingebildete Genauigkeit vor. Vor allem ist auf eine tadelfreie Isolation aller Leitungen zu sehen. Mit fest verlegten Leitungen, die sich durch ganze Maschinenhäuser ziehen, wird man keine guten Resultate erwarten dürfen. Wichtig ist die richtige Wahl des Galvanometers für den Nullstrom (166).

Vier Widerstände a, b, c, d (Abb. 57) werden in einer geschlossenen Reihe hintereinander verbunden; man kann diese Verbindung als ein Viereck ansehen, dessen Diagonalen AD und BC sind. Bringt man in die eine Diagonale eine Stromquelle, so fließt durch die andere ein Galvanometer, was fließt durch das letztere kein Strom, wenn sich verhält

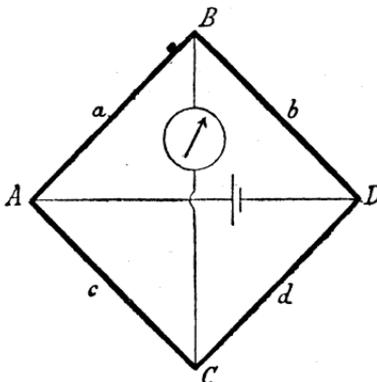


Abb. 57. Wheatstonesche Brücke.

$$a : b = c : d.$$

Kennt man einen dieser Widerstände (c) und das Verhältnis von zwei anderen ($b : d$), so kann man den vierten (a) bestimmen.

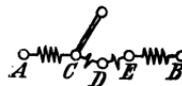


Abb. 58.
Verzweigungsbüchse.

Empfindlichkeit. Am vorteilhaftesten macht man die 4 Widerstände $abcd$ sowie den des Galvanometers und den der Batterie einander gleich. Praktisch erhält man die beste Anordnung, wenn man für die Zweige $b d$ eine sogenannte Verzweigungsbüchse nimmt. Diese besteht aus einer Normalwiderstandsbrücke, die Abzweigungen zu drei Kontaktstücken hat, mit denen abwechselnd eine kleine Kurbel in Berührung gebracht werden kann (Abb. 58). Es ist z. B.

$$AD = DB = 100 \Omega \text{ bzw. } 1000 \Omega$$

$$CD = DE = 0,05 \Omega \text{ bzw. } 0,5 \Omega .$$

Folglich $AC : CB = 1 - 0,001$; $AE : EB = 1 + 0,001$.

Man schaltet nun in c (Abb. 57) einen Widerstand von der Größe ein, daß der Galvanometerausschlag möglichst klein wird, wenn die Kurbel auf D steht, und macht folgende Ablesungen:

Stellung des Stromwenders im Batteriekreis	I	II	II	II
Stellung der Kurbel der Verzweigungsbüchse	D	D	C	E
Galvanometerablesung	α	β	γ	δ

Dann ist der gesuchte Widerstand

$$c \cdot \left(1 - \frac{\alpha - \beta}{\gamma - \delta} \frac{1}{1000} \right).$$

Es ist praktisch, die Empfindlichkeit so zu wählen, daß $\gamma - \delta = 100$ Skalenteilen ist, dann gibt $\alpha - \beta$ die an c anzubringende Korrektur in Hunderttausendsteln.

Nach Beendigung dieser Messung vertauscht man die Zweige b und d miteinander, indem man die Büchse um 180° dreht, und wiederholt die Messung; dies geschieht, um kleine Ungleichheiten von b und d zu eliminieren. Aus den erhaltenen Resultaten nimmt man das Mittel.

Zur Messung sehr großer Widerstände benutzt man eine ungleicharmige Brücke, und zwar wird in der Regel ein dekadisches Verhältnis ($b : d = 1 : 10$ bzw. $1 : 100$) gewählt. Hierfür sind passende Kästen konstruiert worden (s. Preisliste von S. & H., H. & Br., ferner Zeitschr. Instrk. 1903, S. 301, ETZ 1921, S. 406).

Schleifdraht. Ist die größte Genauigkeit nicht erforderlich, so genügt es, mit einem Schleifdraht zu arbeiten. Die Zweige b und d werden aus einem Draht mit gleichmäßigem Querschnitt gebildet, auf dem im Punkte D ein Schleifkontakt gleitet. Dann verhält sich $a : c$ wie die Längenabschnitte $BD : CD$. Für c pflegt man einen Dekadenkasten (1. 10. 100. 1000) einzusetzen, außerdem wird am Schleifdraht eine Teilung angebracht, an welcher man direkt das Verhältnis der Längen $BD : CD$ abliest. Die Ablesung mit einer Potenz von 10 multipliziert ergibt direkt den gesuchten Widerstand (Universalgalvanometer von S. & H.).

Um durch Benutzung eines längeren Drahtes die Genauigkeit zu steigern, hat F. Kohlrausch den Meßdraht spiralförmig in zehn Windungen auf eine Walze gewickelt; die Walze ist drehbar, während der Kontakt von einem feststehenden Laufrädchen gemacht wird (Walzenbrücke, Hartmann & Braun). Zur weiteren Erhöhung der Genauigkeit kann man beiderseitig Widerstände in Spulenform zuschalten, die passende Vielfache des Schleifdrahtwiderstandes sind, z. B. beiderseitig das 4,5fache des Schleifdrahtes. Tafeln für den Quotienten $n/(1000 - n)$ bei Obach, München 1879 und H. & Br.

Prüfung und Kalibrierung eines ausgespannten Drahtes. An einem Holzklötzchen befestigt man zwei isolierte Metallschneiden in unveränderlichem Abstand voneinander; jede Schneide wird mit einer Klemme eines empfindlichen Galvanometers von großem Widerstande verbunden. Das Schneidenpaar setzt man auf den Widerstandsdraht auf, während der letztere von einem konstanten Strome durchflossen wird. Verschiebt man die Schneiden längs des Drahtes, so sollte sich der Ausschlag nicht ändern, wenn der Draht überall gleich wäre; letzteres ist indes gewöhnlich nicht der Fall; mißt man den Ausschlag des Galvanometers für verschiedene Stellen des Drahtes, so verhalten sich die abgegrenzten Widerstände wie die Ausschläge. Über andere Kalibrierungsmethoden und die Kalibrierung von Widerstandskästen siehe F. Kohlrausch, Lehrbuch der prakt. Physik, 11. Aufl., S. 455 ff.

(192) Messung kleiner Widerstände. Über die Konstruktion s. (186).

a) Vergleich mit dem Kompensator. Der unbekannte Widerstand x und der bekannte a sind mit ihren Hauptstromklemmen in Reihe geschaltet. Mittels des Umschalters U (Abb 59) wird zuerst der Spannungsabfall an den Abzweigklemmen von x und dann derjenige von a gemessen. Dann verhält sich $x : a$ wie die am Kompensator eingestellten Widerstände. Es empfiehlt sich, die Einstellungen möglichst rasch hintereinander abwechselnd zu wiederholen, um geringe Änderungen des Stromes eliminieren zu können.

b) Thomsonsche Doppelbrücke. Wie bei der vorigen Methode werden x und a zu einem mit starken Strömen belastbaren Kreis vereinigt (Abb. 60). Von den Abzweigklemmen wird dann zu vier größeren Widerständen $r_1 r_2 R_1 R_2$ abgezweigt. Die Widerstände r_1 und R_1 werden gleich groß gewählt und ebenso $r_2 = R_2$. Man pflegt $r_2 = R_2 = 10, 100$ oder 1000Ω zu machen und $r_1 = R_1$ so zu regeln, daß das Galvanometer den Strom Null anzeigt. Für r_1 und R_1 nimmt man am zweckmäßigsten zwei in einem Kasten untergebrachte Kurbel-

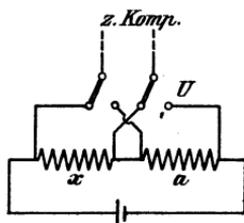


Abb. 59. Widerstandsvergleich mittels Kompensator.

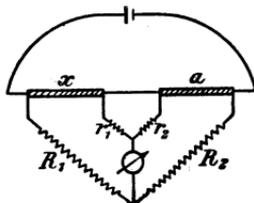


Abb. 60. Thomsonsche Doppelbrücke.

widerstandssätze, deren Kurbeln zwangläufig miteinander verbunden sind, so daß ihre Gleichheit dadurch selbsttätig gewährleistet ist. Gleichgewichtsbedingung ist: $x : a = R_1 : R_2$.

Doppelbrücke von Siemens & Halske, O. Wolff, Jaeger, Lindeck, Diesselhorst, Zeitschr. Instrk. Bd. 23, S. 33 und 65, 1903.

Die Thomsonbrücke eignet sich gut zur Bestimmung der Leitfähigkeit gut leitender Drahtsorten (Kupferschienen). Ein grader Draht von 0,5—1 m Länge wird in einen Petroleumkasten gebracht und mit Klemmbacken zur Stromzuführung versehen. Zwei voneinander isolierte Schneiden, deren Abstand genau gemessen werden kann, werden auf den Draht aufgesetzt; sie bilden die Potentialklemmen. Das Petroleum muß während des Versuches gerührt werden. Der Querschnitt des Leiters wird entweder mit einer Lehre oder durch Wägung eines Stückes in Luft und Wasser gemessen. Daraus findet man dann den spezifischen Widerstand $\rho = \frac{Rq}{l}$. Ist der Petroleumkasten mit einer Heizvorrichtung versehen, so kann man auch den Temperaturkoeffizienten bestimmen. Siehe auch Kupfernormen des Verbandes Deutscher Elektrotechniker. ETZ 1914, S. 366.

(193) Widerstand von zersetzbaren Leitern. Wegen der an den Elektroden auftretenden Polarisation sind die für Metallwiderstände angegebenen Methoden nicht ohne weiteres zu gebrauchen.

Mit Gleichstrom kann man den Widerstand eines Elektrolyten in folgender Weise nach der Vertauschungsmethode (188) ermitteln: Man schaltet zunächst zwischen die Elektroden nur ein kurzes Stück des zersetzbaren Leiters und beobachtet den Ausschlag des Galvanometers. Darauf vergrößert man den Abstand der Elektroden und schaltet so viel Rheostatenwiderstand aus, daß der Ausschlag ebenso groß wird wie vorher. Der ausgeschaltete Rheostatenwider-

stand ist gleich der Vermehrung des Widerstandes des Elektrolyten, welche durch die Verschiebung der Elektroden erzielt wurde.

Wechselstrom. (F. Kohlrausch, M. Wien, Apparatur bei H. & Br.) Die Verwendung von Wechselstrom vermeidet das Entstehen einer Polarisation, sofern man die Elektroden (Platin) mit Platinmoor überzieht. Man mißt mit der Wheatstoneschen Brücke, wobei man das Galvanometer durch ein Telephon ersetzt. Es wird darauf eingestellt, daß das Telephon verstummt.

Über Wechselstromquellen für Widerstandsmessungen siehe (208).

Da es meistens auf den spezifischen Leitungswiderstand abgesehen ist, so gebraucht man zu den Bestimmungen ein Gefäß, welches die Berechnung des Widerstandes aus den Abmessungen erlaubt, am besten eine Glasröhre, welche einen möglichst konstanten Querschnitt besitzt. In dieser lassen sich die Elektroden (Platin, platinirtes Silber) bequem verschieben. Tritt bei Gleichstrom Gasentwicklung ein, so verwendet man ein U-förmiges Glasrohr und als Elektroden Drahtnetze oder Spiralen.

Vergleichslösungen. Will oder kann man das Gefäß, in welchem die Bestimmung vorgenommen werden soll, nicht geometrisch ausmessen, so bestimmt man in demselben Gefäß den Widerstand eines Leiters von bekanntem spezifischen Widerstand und vergleicht den der zu untersuchenden Flüssigkeit damit. Als Vergleichsflüssigkeiten benutzt man¹⁾ die in der nachstehenden Tabelle angegebenen Lösungen.

Hat man in demselben Gefäß einmal den Widerstand R einer der Vergleichsflüssigkeiten und dann den Widerstand r der zu untersuchenden Flüssigkeit bestimmt, so ist der gesuchte spezifische Widerstand der letzteren = $\rho R/r$.

Widerstand von Erdleitungen s. (283) u. folg., von Akkumulatoren s. (298) u. folg.

Vergleichsflüssigkeit	Spez. Gew.	Widerstandskoeffizient, bezogen auf Ohm: $R = \rho \cdot \frac{l}{q}$ l in cm, q in cm^2
Wässrige Schwefelsäure, bestleitend, 30,0% reine Säure	1,223	$\rho = 1,35 [1 - 0,016 (t - 18)]$
Gesättigte Kochsalzlösung, 26,4% ClNa	1,201	$\rho = 4,63 [1 - 0,022 (t - 18)]$
Magnesiumsulfatlösung (normal) 17,4% MgSO_4 (wasserfrei)	1,190	$\rho = 20,3 [1 - 0,026 (t - 18)]$
Chlorkaliumlösung (normal) 7,46% KCl	1,045	$\rho = 10,2 [1 - 0,020 (t - 18)]$

(194) Auszug aus den Prüfvorschriften des VDE für die gekürzte Untersuchung elektrischer Isolierstoffe. (ETZ 1922, S. 446 und 1923, S. 577.)

Probenform. Als Normalformen für die Versuche sind Platten und Flachstäbe mit folgenden Abmessungen anzuwenden:

- Stäbe $1,0 \times 1,5 \times 12,0 \text{ cm}^3$,
- Platten $1,0 \times 12 \times 15 \text{ cm}^3$.

¹⁾ Vgl. F. Kohlrausch, Lehrb. d. pr. Phys. und F. Kohlrausch und L. Holborn, Leitvermögen der Elektrolyte. 1898.

A. Mechanische und Wärmepfung.

1. Biegefestigkeit.

5 Versuche mit dem Isolierstoff im Anlieferungszustand;

5 Versuche nach 30tägiger Lagerung in Petroleum bei Zimmertemperatur.

Versuchsausführung und Abmessungen nach Abb. 61. Die Kraft P greift in der Mitte zwischen den beiden Auflagern AA mit einer Druckfinne an. Die Be-

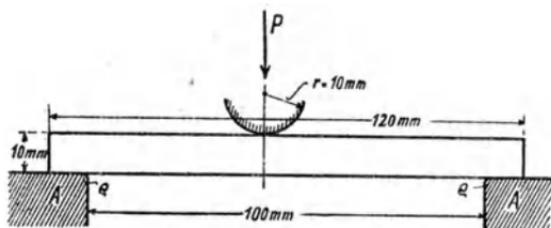


Abb. 61. Bestimmung der Biegefestigkeit.

lastung ist mit gleichmäßiger Geschwindigkeit und zwar um 250 kg/cm^2 in 1 Minute bis zum Bruch zu steigern. Wenn der Stab die Belastung 2 min getragen hat, ohne zu Bruch zu gehen, oder wenn bei stark biegsamen Stoffen die Gesamtdurchbiegung in der Mitte kleiner als 5 mm bleibt, gilt die Beanspruchung als ausgehalten.

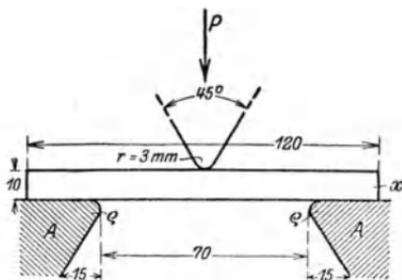


Abb. 62. Bestimmung der Schlagbiegefestigkeit.

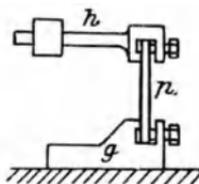


Abb. 63. Bestimmung der Wärmebeständigkeit.

2. Schlagbiegefestigkeit. Abmessungen nach Abb. 62.

Die Schlagbiegeversuche sind mit einem Normalpendelschlagwerk auszuführen. Die Ergebnisse sind in cmkg/cm^2 anzugeben.

3. Kugeldruckhärte. Eine Stahlkugel von 5 mm Durchmesser ($D = 0,5 \text{ cm}$) wird mit einem konstanten Druck von 50 kg in die Probe stoßfrei eingedrückt. Gemessen wird die Eindringtiefe h nach 10 und 60 s. Aus dieser wird der Härtegrad H in kg/cm^2 nach der Formel berechnet:

$$H = \frac{P}{\pi \cdot h \cdot D} = \frac{C}{h}$$

Die Eindrücke sollen in der Mitte der 15 mm breiten Proben liegen. Die Versuche sind bei 18 bis 20° C auszuführen.

4. Wärmebeständigkeit. Die Wärmebeständigkeit ist durch die Martensprobe mit einem Normalapparat festzustellen.

Die in senkrechter Lage von der Grundplatte g (s. Abb. 63) festgehaltenen Proben p werden durch angehängte Gewichtscheibel h mit der konstanten Biege-

spannung $\delta = 50 \text{ kg/cm}^2$ belastet und langsam erwärmt. Die Geschwindigkeit der Temperatursteigerung soll 50°C in der Stunde betragen. Es wird der Wärmegrad A_g ermittelt, bei dem der Hebel h um 3 mm auf 120 mm Länge absinkt, bzw. die Probe bricht.

5. **Feuersicherheit.** Es wird ein horizontal eingespannter Normalstab 1 min lang der Flamme eines mit Leuchtgas gespeisten Bunsenbrenners ausgesetzt. Die Brenneröffnung soll 9 mm, die Flammenhöhe bei senkrecht gestelltem Brenner 10 cm betragen.

Der Brenner ist unter 45° zu neigen und der Stab so in die Flamme zu bringen, daß die untere 1,5 cm breite Stabfläche sich 3 cm über der Brenneroberkante und seine Stirnfläche sich 1 cm in wagerechtem Abstand von der Brennerunterkante befindet.

Das Verhalten der Isolierstoffe ist nach folgenden drei Stufen zu beurteilen:

0. Der Stab brennt nach dem Entfernen der Flamme länger als $\frac{1}{4}$ min weiter.
1. Der Stab brennt nach dem Entfernen der Flamme nicht länger als $\frac{1}{4}$ min weiter.
2. Der Stab entzündet sich nicht in der Flamme.

B. Elektrische Prüfung.

1. **Oberflächenwiderstand.** Der Oberflächenwiderstand wird gemessen auf einer Fläche von $10 \times 1 \text{ cm}$ bei 1000 V Gleichspannung:

- a) im Zustand der Einsendung, jedoch nach Abschleifen der Oberfläche;
- β) nach 24stündiger Einwirkung von Wasser;
- γ) nach 3wöchiger Einwirkung von 25prozentiger Schwefelsäure;
- δ) nach 3wöchiger Einwirkung von Ammoniakdampf.

Bei den Versuchen β bis δ wird die unter der Einwirkung der Flüssigkeiten und Gase etwa eintretende Gewichtsänderung in Prozenten ermittelt. Zur Messung des Oberflächenwiderstandes werden zwei gerade 10 cm lange mit Gummi und Stanniol gepolterte Elektroden einander parallel in 1 cm Abstand auf die Platte gesetzt. Siehe den Normalapparat Abb. 64. — Bei geöffnetem Schalter zwischen Schutzwiderstand und Oberflächenapparat wird mit Hilfe des statischen Spannungsmessers die Gleichspannung auf 1000 V eingestellt. Bei kurzgeschlossenem Galvanometer wird dann der Schalter zu dem Oberflächenapparat geschlossen; sinkt dabei die Anzeige des Spannungsmessers unter 500 V, so beträgt der Oberflächenwiderstand des Isolierstoffs weniger als 10000Ω ; bleibt die Spannung über 800 V, so kann mit dem Galvanometer gemessen werden.

Der Galvanometeraussschlag wird 1 min nach dem Anlegen der Spannung abgelesen.

Zu β) Nach dem Herausnehmen aus dem Wasser werden die Platten mit einem Tuch abgerieben und vertikal bei Zimmertemperatur in nicht bewegter Luft zwei Stunden stehen gelassen, um die äußerlich anhaftende Feuchtigkeit zu entfernen. Danach wird die Messung vorgenommen.

Zu γ) Nach dem Herausnehmen aus der Schwefelsäure werden die Platten etwa 1 min in fließendem Wasser abgespült, danach wie unter β behandelt.

Zu δ) Die Platten werden in großen Glasgefäßen aufgehängt, auf deren Boden eine gesättigte wässrige Ammoniaklösung sich befindet, die Gefäße werden mit Glasplatten abgedeckt. Von drei zu drei Tagen wird etwas Ammoniak zugefüllt, um die Verluste an Ammoniakdampf zu decken. Nach dem Herausnehmen aus

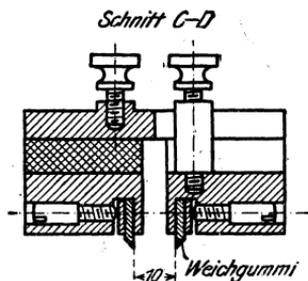


Abb. 64. Schneidenpaar.

den Gefäßen werden die Platten nach Feststellung des Aussehens mit einem trockenen Tuch abgerieben und gemessen.

2. Widerstand im Innern. Zwei Löcher von 5 mm Durchmesser und 15 mm Mittenabstand sind in die Platte etwa $\frac{2}{3}$ der Plattenstärke tief zu bohren und mit Quecksilber zu füllen. Es wird der Widerstand zwischen den beiden Quecksilberelektroden bei 1000 V Gleichspannung gemessen; ist derselbe kleiner als der bei dem Versuch α ermittelte Oberflächenwiderstand, so ist die Platte bis in tiefere Schichten abzdrehen und unmittelbar nach dem Abdrehen auf ihren Oberflächenwiderstand zu messen.

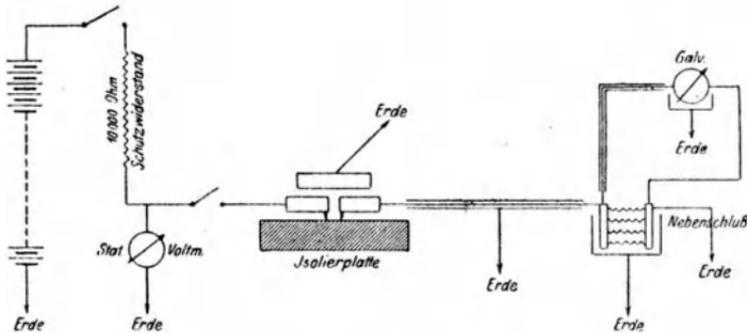


Abb. 65. Bestimmung des Oberflächenwiderstandes.

3. Lichtbogensicherheit. Die Platte wird horizontal gelegt und zwei angespitzte Reinkohlen von 3 mm Durchmesser in einem Winkel von etwas mehr als einem Rechten gegeneinander auf die Platte gesetzt, etwa um 60° gegen die Horizontale geneigt. An die Kohlen wird eine Spannung von etwa 220 V gelegt unter Vorschalten eines Widerstandes von 20Ω . Nach Bildung des Lichtbogens zwischen den Kohlen werden diese mit einer Geschwindigkeit, die 1 mm/s nicht überschreiten soll, auseinander gezogen. Es werden dann folgende vier Stufen der Sicherheit gegenüber dem Lichtbogen unterschieden:

0. Unter dem über 20 mm lang ausziehbaren Lichtbogen bildet sich eine leitende Brücke im Isolierstoff, welche auch nach dem Erkalten leitend bleibt.
1. Unter dem über 20 mm lang ausziehbaren Lichtbogen bildet sich eine leitende Brücke im Isolierstoff, welche aber nach dem Erkalten ihre Leitfähigkeit verliert.
2. Der Lichtbogen läßt sich weiter als 20 mm ausziehen, es bildet sich aber keine zusammenhängende leitende Brücke im Isolierstoff.
3. Der Lichtbogen läßt sich nicht über seine normale Länge von etwa 20 mm ausziehen.

(195) Durchgangswiderstand von Isolierstoffen. Zur Messung des Durchgangswiderstandes von festen Isolierstoffen eignen sich am besten Platten von etwa $15 \times 15 \text{ cm}^2$ Größe. Eine derartige Platte P (Abb. 66) wird zwischen zwei ebene Metallelektroden gelegt, die am besten mit Staniol gepolstert und mit Gewichten gegeneinander gepreßt werden, damit sie sich der oft nicht ebenen Fläche gut anschmiegen (Hg-Elektroden s. H e i n k e, Handb. d. El., Bd. 2, 1, S. 310). An die Elektroden aa wird die gemessene Gleichspannung E gelegt. Aus E und dem mittels eines Galvanometers G gemessenen Stromes I wird der Isolationswiderstand als E/I berechnet. Um Ströme vom Galvanometer auszuschließen, welche andere Wege als die zu untersuchende Isolationsschicht passiert haben, erdet man einen

Pol der Spannungsquelle, legt das Galvanometer in die mit dem geerdeten Pol verbundene Leitung und versieht sämtliche Leitungen vom Isolationsmaterial bis zum geerdeten Pol (einschl. Galvanometer) mit einer metallischen Schutzhülle, die geerdet ist. Ferner legt man um die am geerdeten Pol liegende Elektrode einen Schutzring bb , der ebenfalls geerdet ist und dadurch die Oberflächenströme am Galvanometer vorbeiführt.

R ist ein Sicherheitswiderstand aus Jodkadmiumlösung (10% JKa in Amylalkohol).

Ist die Isolation so gut, daß die Empfindlichkeit des Galvanometers nicht mehr ausreicht, so kann man in der Weise verfahren, daß man zunächst die Spannung E an die Elektroden legt, danach eine gemessene Zeit t die eine Elektrode vom Batteriepol trennt und dann von neuem die Spannung E anlegt. Hierbei fließt eine Elektrizitätsmenge Q auf die Elektrode, die gleich dem Ladeverlust in der Zeit t ist und durch ein ballistisches Galvanometer gemessen werden kann (204). Dann ist annähernd der Isolationswiderstand gleich Et/Q .

Isolationswiderstände gehorchen nicht dem Ohmschen Gesetz; entgegen diesem Gesetz ist der Wert E/I von der Größe der Spannung und der Dauer ihrer Einwirkung abhängig (92).

Im Augenblick des Einschaltens erfolgt ein kräftiger Stromstoß, der von der Ladung des eine Kapazität bildenden Isolationsmaterials herrührt, und der am Galvanometer durch Kurzschließen vorübergeführt wird. Danach pflügt der Galvanometerausschlag langsam abzunehmen (d. h. der Isolationswiderstand wird scheinbar größer), weil ein Teil der Elektrizität in die Oberfläche des Materials eindringt, ohne es ganz zu durchfließen. Dazu kommt, daß bei feuchten Materialien die Feuchtigkeit infolge der Stromwärme zu verdampfen beginnt und dadurch den Widerstand verändert.

Der Isolationswiderstand ist in der Regel nicht proportional der Dicke des Materials. Es ist deshalb ratsam, die Messungen an Platten von verschiedener Dicke vorzunehmen. Im übrigen empfiehlt es sich, die Platten zunächst in vollständig ausgetrocknetem Zustand und danach nach mehrtägigem Liegen in Wasser (194 B) zu untersuchen. Außer der Feuchtigkeit kann auch die Temperatur einen erheblichen Einfluß haben (92).

Isolierfähigkeit von Lacken wird untersucht, indem man sie auf dünne Metallbleche, auf Papier, Leinen oder Segeltuch aufbringt und den Widerstand wie bei festen Platten mißt. Da die Zufälligkeiten hierbei in Hinsicht der Dicke der Schicht und Güte des Lackierens sehr groß sind, so sind die Resultate in der Regel noch unsicherer als bei festen Materialien.

Isolierrohre werden zum Zweck der Prüfung mit einem Metallmantel versehen oder mit Stanniol bekleidet (äußere Elektrode). Sollen die Röhren trocken geprüft werden, so füllt man sie mit Metallpulver (innere Elektrode), sollen sie aber naß geprüft werden, so werden sie mit leicht angesäuertem Wasser gefüllt. In diesem Falle wird die Messung zweckmäßig über einen längeren Zeitraum regelmäßig wiederholt, bis die Isolationschicht zerstört ist.

Zuweilen kann man auch als innere Elektrode Quecksilber anwenden; doch ist es ratsam, dabei die Röhren horizontal zu legen, weil sonst das Quecksilber infolge des hohen Druckes zu leicht die Isolierschicht durchdringt.

Porzellanisolatoren werden trocken und benetzt (im künstlichen Regen) geprüft. Man mißt den Übergangswiderstand vom Drahtlager, in dem ein Leitungsdraht ordnungsmäßig befestigt ist, zur Stütze, ebenso bei Isolatoren für Hochspannung die Überschlagnspannung; die Stütze des Isolators ist zu erden.

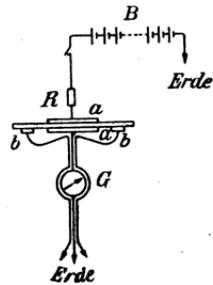


Abb. 66. Isolationswiderstand von Platten.

Literatur: Wernicke, Die Isoliermittel der Elektrotechnik, Braunschweig 1908. — Håkansson, Die plastischen Isolationsmaterialien, ETZ 1910, S. 953, 997. — Passavant, ETZ 1912, S. 450. — Schweizer Arch. f. El. 2, S. 332 — Gewecke und Krukowski, Arch. El. 6, S. 407. — Über die Prüfung emailierter Drähte s. Straubel, ETZ 1921, S. 1075. — Grünerwald, Durchschlagsfestigkeit geschichteter Isolierstoffe, Arch. f. El. 12, S. 79. — Demuth, Materialprüfung der Isolierstoffe. Springer, 1923.

Strom- und Spannungsmessung.

(196) Auszug aus den Regeln des VDE für Meßgeräte.

(ETZ 1922 S. 290, 858 u. 519.)

Es werden bezeichnet mit Klassenzeichen:

- E Feinmeßgeräte 1. Kl.
- F Feinmeßgeräte 2. Kl.
- G Betriebsmeßgeräte 1. Kl.
- H Betriebsmeßgeräte 2. Kl.

Instrument ist das Meßwerk zusammen mit dem Gehäuse und gegebenenfalls eingebautem Zubehör.

Meßgerät ist das Instrument zusammen mit sämtlichem Zubehör, also auch mit solchem, das nicht untrennbar mit dem Instrument verbunden, sondern getrennt gehalten ist.

Der **Strompfad** des Meßwerks führt unmittelbar oder mittelbar den ganzen Meßstrom oder einen bestimmten Bruchteil von ihm.

Der **Spannungspfad** des Meßgeräts liegt unmittelbar oder mittelbar an der Meßspannung.

Nebenwiderstand ist ein Widerstand, der parallel zu dem Strompfad und diesem etwa zugeschalteten Stromvorwiderstand liegt.

Vorwiderstand ist ein Widerstand, der im Spannungspfad liegt.

Meßleitungen sind Leitungen im Strom- und Spannungspfad des Meßgeräts, die einen bestimmten Widerstand haben müssen.

Bezeichnungen der Instrumente.

M1: Drehspulinstrumente besitzen einen feststehenden Magnet und eine oder mehrere Spulen, die bei Stromdurchgang elektromagnetisch abgelenkt werden.

M2: Dreheisen- oder Weicheiseninstrumente besitzen ein oder mehrere bewegliche Eisenstücke, die von dem Magnetfeld einer oder mehrerer feststehender, stromdurchflossener Spulen abgelenkt werden.

M3: Elektrodynamische Instrumente haben feststehende und elektrodynamisch abgelenkte bewegliche Spulen. Allen Spulen wird Strom durch Leitung zugeführt.

M4: Induktionsinstrumente (Drehfeldinstrumente u. a.) besitzen feststehende und bewegliche Stromleiter (Spulen, Kurzschlußringe, Scheiben oder Trommeln); mindestens in einem dieser Stromleiter wird Strom durch elektromagnetische Induktion induziert.

M5: Hitzdrahtinstrumente. Die durch Stromwärme bewirkte Verlängerung eines Leiters stellt unmittelbar oder mittelbar den Zeiger ein.

M6: Elektrostatistische Instrumente. Die Kraft, die zwischen elektrisch geladenen Körpern verschiedenen Potentials auftritt, stellt den Zeiger ein.

M7: Vibrationsinstrumente. Die Übereinstimmung der Eigenfrequenz eines schwingungsfähigen Körpers mit der Meßfrequenz wird sichtbar gemacht.

Meßgröße ist die Größe, zu deren Messung das Meßgerät bestimmt ist. (Strom, Spannung, Leistung usw.)

Anzeigebereich ist der Bereich, in dessen Grenzen die Meßgröße ohne Rücksicht auf Genauigkeit angezeigt wird.

Meßbereich ist der Teil des Anzeigebereichs, für den die Bestimmungen über Genauigkeit eingehalten werden.

Erweiterte Skalen sind über den Meßbereich hinaus fortgesetzt.

Der Meßbereich umfaßt:

a) bei Instrumenten mit durchweg genau oder angenähert gleichmäßiger Teilung den ganzen Anzeigebereich vom Anfang bis zum Ende der Skale,

b) bei Instrumenten mit ungleichmäßiger Teilung den besonders gekennzeichneten Teil des Anzeigebereichs, der zusammengedrückte Teile am Anfang und am Ende der Skale ausschließen darf.

Anzeigefehler ist der Unterschied zwischen der Anzeige und dem wahren Wert der Meßgröße, der lediglich durch die mechanische Unvollkommenheit des Meßgerätes und durch die Unvollkommenheit der Eichung, also in der richtigen Lage, bei Bezugstemperatur, bei Abwesenheit von fremden Feldern, bei der Nennspannung und bei der Nennfrequenz verursacht wird. Er wird in Prozenten des Endwertes des Meßbereiches angegeben, sofern nichts anderes bestimmt ist. Ist der angezeigte Wert größer als der wahre Wert, so ist der Anzeigefehler positiv.

Symbole der Meßwerke (Abb. 67).

Lfd. Nr.	Art der Meßwerke	Symbole	
		mit Richtkraft	ohne Richtkraft (Kreuzspule)
M 1	Drehspule		
M 2	Weicheisen oder Dreheisen		
M 3	Elektrodynamisch eisenlos		
	eisengeschirmt		
	eisengeschlossen		
M 4	Induktion		
M 5	Hitzdraht		
M 6	Elektrostatisch		
M 7	Vibration		

Klassenzeichen, Stromart, Lagezeichen.

Bezeichnung	Zeichen	für
Klassenzeichen: neben dem Meßwerk- symbol	E	Feinmeßgerät 1. Kl.
	F	Feinmeßgerät 2. Kl.
	G	Betriebsmeßgerät 1. Kl.
	H	Betriebsmeßgerät 2. Kl.
Stromart: (unter dem Klassen- zeichen)		Gleichstrominstrumente
		Wechselstrominstrumente
		Gleich- und Wechselstrominstru- mente
		Instrumente für: Zweiphasenstrom
		Drehstrom für gleiche Belastung
		Drehstrom für ungleiche Belastung
		Vierleitersysteme
Lagezeichen: (am Symbol für Meßwerk anfügen)		Senkrechte Gebrauchslage
		Schräge Gebrauchslage
		Wagerechte Gebrauchslage
Beispiele:		Dreheisen, Klasse F Wechselstrom senkrechte Gebrauchslage
		Dreheisen, Klasse G Gleichstrom schräge Gebrauchslage
		Elektrodynamische Klasse E Gleich- und Wechselstrom wagerechte Gebrauchslage

(197) Strommessung mit direkt zeigenden Apparaten. In den meisten Fällen der Praxis verwendet man zur Strommessung Zeigerapparate mit konstanter Empfindlichkeit (162) bis (164) (für sehr schwache Ströme Spiegelgalvanometer). Die Stromkonstante K (Strom/Ausschlag) wird durch die Kompensationsmethode (200 u. f.) oder direkt zeigende Normalstrommesser (164) bestimmt oder kontrolliert. Um die Empfindlichkeit herabzusetzen, verwendet man Nebenwiderstände: wird zum Strommesser vom Widerstand R_g ein Nebenwiderstand R_N gelegt, so wird die Konstante $K(1 + R_g/R_N)$. Beträgt also der Nebenwiderstand $1/9, 1/99, \dots, 1/z$ vom Widerstand des Strommessers, so geht $1/10, 1/100, \dots, 1/z+1$ des gesamten unverzweigten Stromes durch den Strommesser und die Konstante des Strommessers mit Verzweigung wird $10, 100, \dots, z+1$ mal so groß.

Will man das Strommeßgerät durch einen Nebenwiderstand von $R_N \Omega$ k mal so unempfindlich machen, d. h. soll die Konstante des Strommessers mit Nebenschluß kK werden, so muß $R_N = R/(k-1)$ gemacht werden, wo R den Widerstand des Strommessers selber einschl. eines Vorwiderstandes bedeutet.

Beispiel: Ein Milliampereometer $c = 0,001$ von $R_N = 3 \Omega$ soll zu Strommessungen bis 300 A brauchbar gemacht werden, d. h. $kK = 2$; $k = 2000$, folglich ist der Nebenwiderstand $3/1999 \Omega$ zu wählen.

Der Widerstand R besteht zum großen Teil aus Kupfer; daher ist ein Strommesser mit Nebenwiderstand von der Temperatur abhängig. Man kann aber geeignete Kompensationen anwenden (vgl. z. B. K o l l e r t, ETZ 1910, S. 1219).

Schließt man die Klemmen eines Strommessers durch einen Widerstand R , welcher die Unterabteilungen r_1, r_2, r_3, \dots besitzt, so werden die Konstanten des Strommessers, wenn man den Hauptstrom an den Enden dieser Unterabteilungen zuführt:

$$\frac{KR}{r_1} \quad \frac{KR}{r_2} \quad \frac{KR}{r_3} \quad \dots$$

Die Empfindlichkeiten verhalten sich also unabhängig davon, was man für einen Strommesser benutzt, wie

$$\frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3} \quad (\text{A y r t o n s c h e r N e b e n s c h l u ß}).$$

Dieser Satz ist wichtig für Spiegelgalvanometer: Ein Widerstandssatz von 100000Ω mit Unterabteilungen von

$$30\,000, 10\,000, 3000, 1000, 300, 100, 30, 10, 3, 1 \Omega$$

paßt zu jedem Galvanometer und erlaubt, dessen Empfindlichkeit von dem Betrage, den letztere bei Nebenschaltung von 100000Ω besitzt, herabzusetzen auf

$$1/3, 1/10, 1/30, 1/100, 1/300, 1/1000, 1/3000, 1/10000, 1/30000, 1/100000.$$

(198) Spannungsmessung durch direkt zeigende Apparate. Spannungen werden in der Praxis meist durch direkt zeigende Apparate gemessen und zwar:

a) durch nicht Strom verbrauchende: Elektrometer (173—177). Mit diesen kann man am einfachsten in Doppelschaltung (174, 3) die Potentialdifferenz zwischen zwei beliebigen Punkten durch einfaches Anlegen messen. Sie kommen wegen der geringen erreichbaren mechanischen Kräfte nur für höhere Spannungen in Frage.

b) durch Strom verbrauchende. Jeden Strommesser kann man durch einen geeigneten Vorwiderstand zum Spannungsmesser machen. Ist K die Konstante des Strommessers und R der Gesamtwiderstand (einschl. des Vorwiderstandes), so ist RK die Konstante des Spannungsmessers; d. h. die Ablesung mit RK multipliziert ergibt die zu messende Spannung. Beispiel: $1/3000 \text{ A}$ gebe einen Skalenteil Ausschlag des Strommessers, d. h. $K = 1/3000$. Schaltet man so viel Widerstand vor, daß der Gesamtwiderstand des Apparates 1200Ω wird, so ist $RK = 0,4$. Zeigt also der Apparat 150 SkT Ausschlag, so liegen $150 \cdot 0,4 = 60 \text{ V}$ an seinen Klemmen.

Sollen die Angaben des Spannungsmessers von der Temperatur unabhängig sein, so muß der Vorwiderstand aus Manganin sein und groß gegen den Widerstand der Kupferspule.

Der stromführende Spannungsmesser kann dadurch, daß er an zwei Punkten angelegt wird, zwischen denen die Spannung gemessen werden soll, die Spannung zwischen diesen Punkten verändern. Es herrscht also, streng genommen, nur so lange, wie er angelegt ist, zwischen diesen Punkten die von ihm angegebene Spannung. Nur wenn der (innere) Widerstand zwischen den Punkten klein ist gegen den Widerstand des Spannungsmessers, ist diese Veränderung vernachlässigbar klein.

(199) Potentialmessung. Um die Potentiale verschiedener Punkte eines Stromkreises gegen einen bestimmten Punkt des letzteren, z. B. gegen Erde zu messen, benutzt man einen Kondensator (Kapazität C), ein Normalelement (EMK E) und ein Galvanometer, welche nach Abb. 68 geschaltet werden. Zuerst eicht man das Galvanometer; der Umschalter u steht nach links (204a). Berührt die Taste den oberen Kontakt, so nimmt der Kondensator eine Ladung an, die der EMK E proportional ist und beim Niederdrücken der Taste am Galvanometer den ballistischen Ausschlag α hervorbringt, der gleichfalls der EMK E proportional ist. Um nun das Potential V am Punkte P eines Stromkreises, der z. B. die Erde benutzt, zu bestimmen, legt man den Umschalter u nach rechts; dadurch wird der Kondensator auf das Potential V von P geladen. Erhält man jetzt bei Druck der Taste den Ausschlag α_1 , so ist $V : E = \alpha_1 : \alpha$.

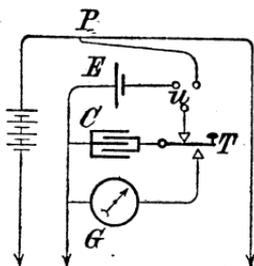


Abb. 68. Potentialmessung.

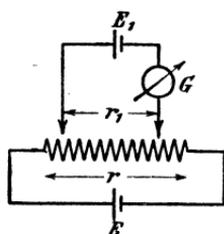


Abb. 69. Schema des Kompensators.

(200) Kompensationsmethode. Die gesetzliche Einheit der Stromstärke ist zwar durch das Silbervoltmeter gegeben; in der Praxis werden aber voltmetrische Versuche überhaupt nicht mehr angestellt. Alle genauen Spannungs- und Strommessungen (Eichungen) werden vielmehr mit Kompensationsapparaten ausgeführt. Hierbei dient außer den im Kompensationsapparat befindlichen Widerständen ein Normalelement als Normal. Es wird jetzt fast ausschließlich das Westonelement (182) verwendet.

Das grundlegende Schema für den Kompensationsapparat ist in Abb. 69 dargestellt. Eine Spannung E ist durch den Widerstand r geschlossen; von einem Teil r_1 des letzteren ist eine Abzweigung gemacht, die die EMK E_1 und ein Galvanometer G enthält. Es wird auf Stromlosigkeit des Galvanometers eingestellt; dann ist: $E/E_1 = r/r_1$. Es muß also $E_1 < E$ sein. Man kann diese Methode auf zweierlei Art anwenden:

a) Messung höherer Spannungen. E ist die unbekannte EMK, E_1 ein Kadmiumelement; man macht $r_1 = E_1 \cdot 10^\alpha$ (z. B. 1018,3 Ω) und reguliert r so lange, bis G keinen Ausschlag zeigt. Dann ist $E = r/10^\alpha$ (im Beispiel $r/1000$). Bei dieser Anwendung muß also E größer sein als die Spannung des Normalelements.

Der zu messenden Spannung E wird hierbei ein wenn auch nur kleiner Strom entnommen. α wählt man in der Regel gleich 2 oder 3 oder 4.

b) Messung kleinerer Spannungen. E ist eine Hilfs-EMK, die während des Versuchs konstant bleiben muß. Man bringt zunächst an die Stelle E_1 ein Normalelement und macht wieder $r_1 = E_1 \cdot 10^\alpha$; es wird in r reguliert bis G den Ausschlag Null zeigt. Dann wird E_1 durch die unbekannte EMK x

ersetzt und nun, ohne den Gesamtwiderstand r zu ändern, der Widerstand r_1 , von dem abgezweigt wird, so lange verändert, bis das Galvanometer wieder einsteht; sei r_x die Größe des so eingestellten Widerstandes, dann ist: $E_x : E_1 = r_x : r_1$ oder $E_x = r_x : 10^\alpha$. In diesem Falle wählt man in der Regel $\alpha = 2$ oder 3 oder 4. Benutzt man wiederum ein Kadmiumelement, so eignet sich diese Methode am besten für Spannungsmessungen von 0,001—1 V.

Das zuletzt beschriebene Verfahren ist auch am besten geeignet für genaue Strommessungen. Man hat dazu nur E_x zu ersetzen durch den Spannungsabfall in einem Normalwiderstand R_N (Abb. 70), der von dem zu messenden Strom I durchflossen wird. Es wird $I = r_x : (R_N \cdot 10^\alpha)$.

N pflegt einer ganzzahligen Potenz von 10 gleich zu sein ($= 1/10^\beta$), so daß $I = r_x \cdot 10^{\beta-\alpha}$ ist; man liest also an r_x , abgesehen vom Komma, direkt die Stromstärke ab.

Man kann aber die Methode b) auch benutzen, um hohe Spannungen zu messen, sofern man einen Spannungsteiler benutzt. Letzterer besteht aus einem großen Widerstand, der an die zu messende Spannung angeschlossen wird. Er enthält Abzweige, zwischen denen Spannungen bestehen, die ganzzahlige Teile der Gesamtspannung betragen. Der Wert der Teilung ist an den Klemmen vermerkt. Die Teilspannung wird nach dem Verfahren b) gemessen. Ist der Wert der Teilung $1/a$, wo also a eine ganze Zahl, meist sogar eine Potenz von 10 ist, so wird $E = ar_x \cdot 10^\alpha$. Die Teilung wählt man natürlich so, daß E/a etwa 0,1—1 V beträgt.

Als Galvanometer wählt man am besten ein Drehspulen-Spiegelgalvanometer mit kleinem Widerstand und kurzer Schwingungsdauer. Man erreicht damit ohne Schwierigkeit eine Meßgenauigkeit von 0,01 %.

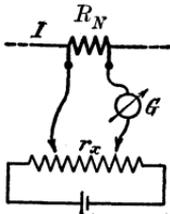


Abb. 70. Strommessung mit Kompensator.

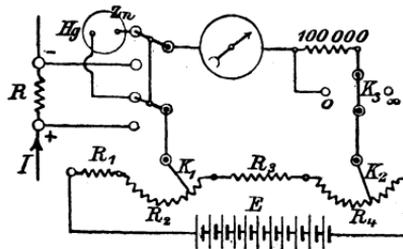


Abb. 71. Kompensationsapparat.

(201) Kompensationsapparate. Die im vorhergehenden beschriebenen Messungen lassen sich mit gewöhnlichen Widerstandskästen ausführen, erfordern dann aber große Aufmerksamkeit. Bequemer sind die Kompensationsapparate, in denen alle zum Gebrauch notwendigen Schaltungen zusammengebaut sind. Das wichtigste ist dabei die Anordnung, vermöge deren man in der Schaltung b (s. oben) die Abzweigpunkte auf dem Widerstand r verschiebt, ohne seinen Gesamtwiderstand zu ändern. Dies geschieht in einfacher und doch vollkommener Weise folgendermaßen.

Zwei Kurbeln $K_1 K_2$ (Abb. 71) schleifen auf den Kontakten von Dekadensätzen R_2 und R_4 . Diese beiden Hebel befinden sich an den Enden des Kompensationswiderstandes R_0 und entsprechen den beiden Kontakten der Abb. 70. Bei Verschiebung dieser Hebel bleibt offenbar der Widerstand im Hauptstromkreis ungeändert, während die Größe des Kompensationswiderstandes der jeweiligen Stellung dieser Hebel entspricht. Auf diese Weise erhält man also ohne weiteres zwei Stellen des Ergebnisses. Um die weiteren Stellen zu erhalten, werden zwei verschiedene Prinzipien benutzt.

Bei dem von Feußner angegebenen, von O. Wolff weitergebildeten Apparat (Zeitschr. Instrk. 1901, S. 227; 1903, S. 301) werden zwischen die beiden

Endhebel noch Doppelkurbeln eingefügt, welche selbsttätig den in den Kompensationskreis eingeschalteten Widerstand aus dem Hauptstrom ausschalten und umgekehrt. Die Kurbeln bestehen aus zwei voneinander isolierten Hälften, die auf den Kontakten zweier voneinander unabhängiger Dekadensätze schleifen. Solcher Kurbeln lassen sich beliebig viele zwischen den beiden Endkurbeln anbringen. Ein anderes Prinzip, nämlich das der Abzweigung, benutzt R a p s bei den Apparaten der Firma S i e m e n s & H a l s k e; es werden hier zwei weitere Dekaden dadurch gewonnen, daß an die Enddekaden (von je 1000 und je 10 Ω) Nebenschlüsse gelegt werden, durch welche die Unterabteilungen (Dekaden von 100 Ω und von 1 Ω) entstehen (vgl. Zeitschr. Instrk. Bd. 15, S. 215, 1895). Die Apparate anderer Firmen sind grundsätzlich den hier beschriebenen ähnlich.

Vgl. H a r t m a n n & B r a u n, Phys. Zeitschr. Bd. 1, S. 167, 1900. R. Franke, ETZ 24, S. 978, 1903, Lindeck und Rothe, Zeitschr. Instrk. 191, S. 249, 1899 und 20, S. 293, 1900. Feußner, ETZ Bd. 32, S. 187 und 215, 1914.

Zur Messung sehr kleiner Spannungen, wie sie z. B. in Thermoelementen auftreten, braucht man Kompensatoren, welche einen kleinen Gesamtwiderstand haben, und bei denen keine Fehler durch Thermokräfte an den Kontaktstellen entstehen können. Über dahingehende Konstruktionen siehe H a u s r a t h, Ann. d. Phys. (4) Bd. 17, S. 735, 1905. White, Zeitschr. Instrk. Bd. 27, S. 211, 1907, 34, S. 71, 107, 142, 1914. Diesselhorst, Zeitschr. Instrk. Bd. 26, S. 173, 1906; Bd. 28, S. 1, 1908.

(202) Technische Kompensationseinrichtungen. Ihr Prinzip sei durch ein Beispiel erläutert. Ein Widerstand R besitzt zwei End- und zwei Abzweigmessungen (Abb. 72). Die Widerstände zwischen diesen verhalten sich wie 3000 : 1019. An den

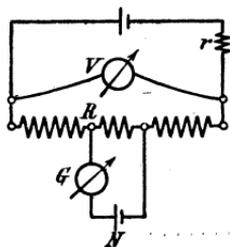


Abb. 72. Technische Kompensationseinrichtung.

Abzweigmessungen liegt ein Kreis, bestehend aus kleinem Zeigergalvanometer G und Westonelement N . Durch einen vor R geschalteten Regulierwiderstand r wird die Stromstärke in R so eingestellt, daß das Zeigergalvanometer den Ausschlag Null zeigt; dann ist offenbar die Spannung an den Endklemmen von R genau 3 V. An diesen liegt ein Feinspannungsmesser V mit dem Meßbereich 3 V. Stellt sich dessen Zeiger nicht genau auf den Endteilstrich ein, so wird durch eine Reguliervorrichtung das magnetische Feld, in dem die Drehspule sich befindet, so lange geändert, bis der Zeiger auf diesem Teilstrich einsteht. Der Spannungsmesser zeigt dann richtig. P a u l s, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1907, S. 749 und B r i o n, Helios 1909, S. 289.

Über Kompensationsmethoden für Wechselstrom s. (230).

(203) Messung hoher Spannungen durch Funkenschlagweite. Sehr hohe Spannungen können durch die Funkenschlagweite zwischen zwei Elektroden gemessen werden. Letztere ist von dem Durchmesser der Kugeln, zwischen denen die Entladung erfolgt, abhängig. Bei Anwendung einer nadelförmigen Elektrode setzt die Entladung zwar verhältnismäßig früh ein; da aber die Nadelspitzen eine undefinierte Krümmung besitzen, so hat die Eichung einer Nadelfunkenschlagweite keine lange Dauer. Zu empfehlen ist bei Messungen, die einigermaßen auf Genauigkeit Anspruch machen, den sog. „Entladeverzug“ durch Bestrahlung mit violettem oder ultravioletem Licht (Bogenlampen) aufzuheben.

Über Zusammenhang zwischen Kugeldurchmesser, Schlagweite und Spannung s. (58).

Literatur: Starke, Ztschr. f. Instrk. 1903, S. 54. — M. T o e p l e r, ETZ 1907, S. 998, 1025 und Ann. d. Phys. 29, S. 153; 1909. — W e i c k e r, ETZ 1911, S. 436, 460. Ferner: P e e k, Proc. Am. Inst. 33, S. 889/914; 1916. — E s t o r f f, ETZ 1916, S. 61, 76. — C l a r k s o n, El. World 59, S. 1307; 1912.

Elektrizitätsmenge.

(204) **Messung eines Stromstoßes**, d. i. eines Stromes von sehr kurzer Dauer. (154). Wird ein Kondensator durch ein empfindliches Galvanometer entladen, oder schickt man einen rasch verlaufenden Induktionsstoß durch das letztere, so erhält das bewegliche System einen Stoß. Die Beobachtung des ersten Umkehrpunktes ergibt den sogenannten ballistischen Ausschlag α . Dann ist die durch das Galvanometer geflossene Elektrizitätsmenge Q dem ballistischen Ausschlag proportional:

$$Q = C_{ball} \cdot \alpha.$$

C_{ball} heißt die ballistische Konstante. Diese Gleichung ist nur dann richtig, wenn der Stromstoß praktisch schon vollständig abgelaufen ist, bevor das bewegliche System seine Bewegung infolge des Stoßes beginnt.

C_{ball} ist merklich von der Dämpfung des beweglichen Systems abhängig; hat man also das ballistische Galvanometer geeicht, so darf man während seines Gebrauches die Dämpfung nicht ändern. Darauf ist besonders zu achten bei Drehspulgalvanometern; da hier die Dämpfung von dem Widerstand des Schließungskreises abhängt, der an die Galvanometerklemmen geschlossen ist, so darf dieser Widerstand nicht verändert werden, bzw. für jeden Widerstand des Schließungskreises ist eine besondere Eichung erforderlich. Am besten wählt man den Schließungswiderstand so groß, daß gerade der aperiodische Grenzzustand eintritt.

Über einen Nebenwiderstand, der die ballistische Empfindlichkeit im gegebenen Verhältnis herabsetzt, ohne die Dämpfung zu ändern s. **Volkman**, Ann. d. Phys. 10 S. 217 1903. (Zu beziehen durch S. & H.)

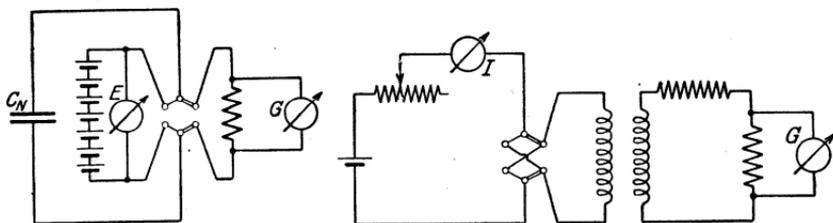


Abb. 73a und b. Eichung des ballistischen Galvanometers.

Abb. 73 a durch eine Kapazitätsnormale. Abb. 73 b. durch eine Induktivitätsnormale.

Eichung des ballistischen Galvanometers.

Man kann die ballistische Konstante aus der statischen berechnen; dies Verfahren ist aber wegen seiner Umständlichkeit wenig zu empfehlen; vgl. darüber z. B. **Kohlrausch**, Lehrbuch der praktischen Physik. Besser ist die Eichung durch Normale der Kapazität oder der Induktivität.

a) Eichung durch eine Kapazitätsnormale (Abb. 73a). Sie wird angewandt, wenn mit dem ballistischen Galvanometer Kapazitäten gemessen werden sollen.

Eine Batterie, deren Spannung durch einen Spannungsmesser E gemessen wird, lädt, wenn der Umschalter nach links gelegt ist, den Normalkondensator C_N , dessen Kapazität (in μF) genau bekannt sei. Wird der Umschalter nach rechts gelegt, so entlädt sich der Kondensator durch das ballistische Galvanometer G , zu dem nötigenfalls ein Nebenwiderstand gelegt ist; der ballistische Ausschlag sei α ; dann ist

$$C_{ball} = C_N E / \alpha.$$

Für verschiedene Nebenwiderstände zum Galvanometer ist wegen der veränderten Dämpfung jedesmal eine besondere Eichung vorzunehmen.

b) Eichung durch eine Induktivitätsnormale. (Schaltung nach Abb. 73 b). Man reguliert eine passende primäre Stromstärke ein und mißt

sie mit dem Strommesser I . Wird nun durch den Umschalter die primäre Stromstärke in der Induktivitätsnormale mit der bekannten Gegeninduktivität M gewendet, so entsteht in dem sekundären Stromkreis ein Stromstoß, der im ballistischen Galvanometer den ballistischen Ausschlag α hervorruft. Dann ist

$$R_2 \cdot C_{ball} = \frac{2MI}{\alpha}.$$

Darin ist R_2 der gesamte Widerstand des sekundären Kreises. C_{ball} ist von der Größe dieses Widerstandes abhängig. Da das Galvanometer beim Gebrauch nur mit genau demselben Schließungswiderstande R_2 gebraucht werden darf, mit dem es geeicht wurde, so geht auch in die Formeln beim Gebrauch nur das Produkt $R_2 \cdot C_{ball}$ ein. Man braucht also nur dafür zu sorgen, daß der Gesamtwiderstand des sekundären Kreises konstant bleibt; seinen absoluten Wert dagegen braucht man gar nicht zu kennen.

(205) Die Elektrizitätsmenge, welche während einer längeren Zeit durch einen Leiter strömt, wird mit dem Voltmeter gemessen. Aus der niedergeschlagenen bzw. aufgelösten Menge kann man mit Hilfe des elektrochemischen Äquivalentes ohne weiteres die Elektrizitätsmenge in Coulomb berechnen (78, 179).

Mittelbar kann man die durchgeströmte Menge bestimmen, wenn man die Stromstärke häufig beobachtet; dies geschieht z. B. beim Laden und Entladen von Akkumulatoren u. a. m. Zu demselben Zweck benutzt man schreibende Strommesser (178) oder Oszillographen (237,3). Die Fläche zwischen Stromkurve und Abszissenachse ist proportional der Elektrizitätsmenge.

Die von elektrischen Zentralstationen gelieferten Elektrizitätsmengen werden mit besonderen Instrumenten gemessen, vgl. Verbrauchsmessung (287 u. f.).

Wechselstromwiderstände.

(Induktivitäten und Kapazitäten.)

(206) Selbstinduktivitäten. Wird an eine beliebig geartete Spule eine sinusförmige Wechselspannung E gelegt, so entsteht ein Strom I , der in der Phase um den Winkel φ gegen die Spannung nach rückwärts verschoben ist. Man nennt (135):

$R_s = E/I$ den Scheinwiderstand,

$R_w = (E/I) \cos \varphi$ den Wirkwiderstand,

$R_b = (E/I) \sin \varphi$ den Blindwiderstand.

Es ist: $R_s^2 = R_w^2 + R_b^2$; $R_w = R_s \cos \varphi$; $R_b = R_s \sin \varphi$.

Im allgemeinen sind R_w und R_b in mehr oder weniger komplizierter Weise von der Stromstärke und der Frequenz abhängig.

Ist dagegen die Spule so gebaut, daß

a) weder in der Umgebung des Stromleiters sich magnetisierbare Substanzen befinden, noch der Stromleiter selber aus einer magnetisierbaren Substanz besteht,

b) weder in benachbarten Metallteilen, noch in dem Metall des Stromleiters selber Wirbelströme entstehen können,

c) die Spule keine merkliche Kapazität besitzt,

so stimmt R_w mit dem ohmschen Gleichstromwiderstand überein, und R_b ist proportional der Frequenz:

$$R_b = 2\pi f \cdot L$$

L ist in diesem Fall konstant und heißt die Selbstinduktivität der Spule.

Eine „reine“ SI ist z. B. eine auf ein nichtleitendes Material gewickelte Spule, deren Drähte nicht massiv sind, sondern aus einer größeren Zahl feiner, voneinander isolierter Drähte zusammengedrillt sind; vgl. (120 und 121).

Im allgemeinen müssen aber Wirk- und Blindwiderstände mit der Stromstärke und der Frequenz gemessen werden, mit der sie gebraucht werden sollen.

(207) Messung der Induktivität aus Strom I , Spannung E und Leistung N (Schaltung s. Abb. 74 a u. b). Aus den abgelesenen Werten von E , I und N ergibt sich

$$R_w = N/I^2; \quad R_s = E/I; \quad R_b = \sqrt{R_s^2 - R_w^2}.$$

Man muß prüfen, inwieweit der Eigenverbrauch der Meßapparate zu berücksichtigen ist.

Schaltung a) Strommesser und Hauptstromspule des Leistungsmessers haben zusammen den Wirkwiderstand r_i und den Blindwiderstand x_i . Dann ist als

Korrektion von N abziehen $r_i I^2$,

von E abziehen $I(r_i \cos \varphi + x_i \sin \varphi)$, wo $\cos \varphi = \frac{N}{EI}$ ist.

Schaltung b) Spannungsmesser und Spannungskreis des Leistungsmessers haben zusammen den Wirkleitwert g_e und den Blindleitwert y_e . Dann ist als

Korrektion von N abziehen $g_e E^2$,

von I abziehen $E(g_e \cos \varphi + y_e \sin \varphi)$.

Über Berücksichtigung der Kurvenform s. Bull. Bur. of Stand. 1, S. 125, 1905.

(208) Die Wheatstonesche Brücke wird unter Verwendung von Wechselstrom gebraucht um Widerstandsoperatoren miteinander zu vergleichen. Sind:

$$z_1 = s_1 e^{p_1 j} \dots z_4 = s_4 e^{p_4 j}$$

die Operatoren der vier Zweige, so ist die Bedingung dafür, daß die Brücke stromlos bleibt:

$$s_1 : s_2 = s_3 : s_4 \text{ und}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4$$

d. h. eine Doppelbedingung, weil der Spannungsabfall in den Zweigen 1 und 3 nicht nur der Größe, sondern auch der Phase nach übereinstimmen muß.

In den Hauptzweig kommt eine Wechselstromquelle, welche zweckmäßig so eingerichtet ist, daß sie während der Versuche konstante, im übrigen aber stark veränderbare Frequenzen hervorbringen kann. Dazu eignen sich a) Saitenunterbrecher, bei denen die Schwingungen einer abstimmbaren Saite zur Unterbrechung eines Gleichstroms benutzt werden (M. Wien, Wied. Ann. Bd. 44, S. 683, 1891), b) Summer (Dolezalek, Zeitschr. Instrk. Bd. 23, S. 243, 1903), Larsen, ETZ 1911, S. 284, c) kleine Hochfrequenzmaschinen (M. Wien, Ann. d. Phys. (4) Bd. 4, S. 426, 1901, Dolezalek (a. a. O.); Hartmann & Braun, Phys. Zeitschr.

Bd. 10, S. 1018, 1909 und Arch. f. El. Bd. 3, S. 75, d) Hochvakuumröhren s. (98). Diese liefern in der Schaltung nach Abb. 75 bei niedrigem Heizstrom eine von Heizstrom und Anodenspannung praktisch unabhängige Frequenz von so großer Konstanz, daß man die Anordnung unter Verwendung verschiedener Spulen und Kondensatoren als Normaltonskale benutzen kann (Zeitschr. f. Instrk. 1920, S. 120).

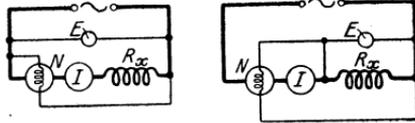


Abb. 74 a und b. Schaltungen für Leistungsmessungen.

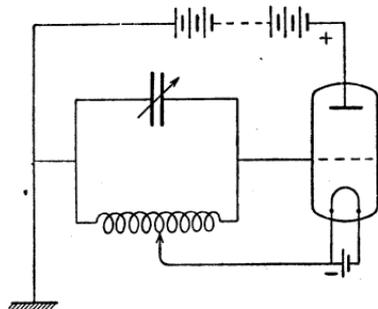


Abb. 75. Hochvakuumröhre als Wechselstromgenerator.

In den Brückenweig der Wheatstoneschen Brücke schaltet man ein Hörtelefon oder, wenn die Einstellung von der Frequenz abhängig ist, besser ein Vibrationsgalvanometer (171).

Um Störungen, die durch die Kapazität der ganzen Meßanordnung entstehen können, auszuschließen, bringt man den Brückenweig auf das Potential Null gegen Erde ohne im übrigen die Stromverteilung zu stören. Am einfachsten wird dies dadurch erreicht, daß man zu der ganzen Verzweigung einen weiteren Zweig parallel schaltet, der aus denselben Wechselstromwiderständen, wie die parallelen Zweige der Brückenordnung besteht und in diesem Zweige die Stoßstelle der beiden Widerstände erdet (Abb. 76, Punkt A) (K. W. Wagner, ETZ 1911, S. 1004). Über das Ablesen von Oberschwingungen durch Kettenleiter (147) s. K. W. Wagner, Arch. f. El. Bd. 3, S. 74. Über Hochfrequenzbrücke ETZ 1922, S. 1390.

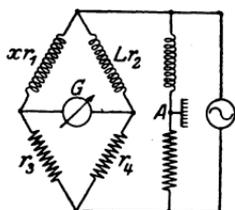


Abb. 76. Vergleich zweier Selbstinduktivitäten.

a) Vergleich zweier Selbstinduktivitäten (Abb. 76). Zweig 1 enthält die unbekanntes Selbstinduktivität, deren „wirksame“ SI x sei; Zweig 2 eine „reine“ bekannte SI vom Betrage L ; zu Zweig 1 oder 2 kann nach Bedarf ein induktionsloser Widerstand zugeschaltet werden; es sei r_1 der gesamte wirksame Widerstand von Zweig 1, r_2 der gesamte ohmsche Widerstand von Zweig 2. Zweig 3 und 4 bestehen aus induktionslosen Widerständen r_3 und r_4 . Dann lautet die Nullbedingung für den Brückenweig $x : L = r_1 : r_2 = r_3 : r_4$.

Für L nimmt man entweder Normalrollen (vgl. M. Wien, Wied. Ann. Bd. 58, S. 553, 1896 und Dolezalek, Ann. d. Phys. (4) Bd. 12, S. 1142, 1903) oder Selbstinduktionsvarioren (vgl. M. Wien, Wied. Ann. Bd. 57, S. 249, 1896; Hausrath, Zeitschr. Instrk. Bd. 27, S. 302, 1907; Land- und Seekabelwerke, Köln-Nippes; Bull. Bur. of St. 1916, S. 569). Diese bestehen aus einem festen und einem beweglichen Spulensystem, von denen das letztere um einen Durchmesser des ersteren drehbar ist; jeder gegenseitigen Lage, die an einem Teilkreis abgelesen wird, entspricht ein bestimmter Wert der Selbstinduktivität. Zweig 3 und 4 wird zweckmäßig durch einen Schleifdraht gebildet, der für genauere Messungen durch Zusatzwiderstände an den Enden gewissermaßen verlängert werden kann (191).

Durch abwechselndes Verschieben des Schleifkontaktes und Drehen der Variorenschleife oder, wenn statt der Varioren eine Normalspule benutzt wird, durch Regulieren des zwischen Zweig 1 und 2 geschalteten induktionslosen Widerstandes wird die Nulleinstellung herbeigeführt. Dann wird x aus Lr_3/r_4 berechnet.

Ist die zu messende SI nicht rein, so ist auf die Stromstärke und bei Wechselstrom auch auf die Frequenz zu achten. Erstere findet man am bequemsten durch einen geeigneten Strommesser im Hauptzweig; gibt dieser den Strom I an, so ist, wenn die Brücke abgeglichen ist, der Strom im Zweige 1 gleich $I r_4 / (r_3 + r_4)$, und zwar gleichgültig, ob mit Gleichstrom oder Wechselstrom gemessen wird.

Wird mit Wechselstrom gemessen, so findet man den wirksamen Widerstand der Spule aus $r_1 = r_2 r_3 / r_4$. Macht man nach Beendigung der Wechselstrommessung eine Gleichstrommessung, so muß man r_2 um den Betrag δ verkleinern, um das in die Brücke geschaltete Galvanometer stromlos zu machen, d. h. der ohmsche Widerstand der Spule ist gleich $(r_2 - \delta) r_3 / r_4$. Der Wert $\delta r_3 / r_4$ mit dem Quadrate des die Spule ursprünglich durchfließenden Wechselstromes (effektiv gemessen) multipliziert, ergibt somit die in der Sekunde durch Hysterese und Wirbelströme verlorene gehende Energie in Watt.

Besondere Aufmerksamkeit wegen der zahlreichen Fehlerquellen erfordert die Messung sehr kleiner SI, z. B. einfacher Drahtringe, gerader Drähte, wie sie u. a.

bei der drahtlosen Telegraphie gebraucht werden. Auch hierfür ist die vorstehende Methode brauchbar, wobei man zweckmäßig mit dem Brückenverhältnis 1 : 10 bis 1 : 100 arbeitet (vgl. Prerauer, Wied. Ann. Bd. 53, S. 772, 1894). Über die Messung kleiner SI bei verhältnismäßig großen Widerständen s. Giebe, Ann. d. Phys. (4) Bd. 24, S. 941, 1907. Wagner und Wertheimer, Phys. Zschr. 1912, S. 368. Schering u. Schmidt, Arch. f. El. 1, S. 423. Grover u. Curtis, Bull. Bur. of St. 8, Nr. 3, 1912. Über die Anwendung der Thomsonbrücke zur Messung kleiner Induktivitäten s. Schering, ETZ 1917, S. 424, 436.

Meßbrücken für große und kleine SI nach Dolezalek von Siemens & Halske, Zeitschr. Instrk. Bd. 23, S. 246, 1903.

b) Vergleich einer SI L mit einer Kapazität C (Abb. 77). Zweig 1 enthält die SI L vom Widerstand r_1 ; die übrigen Zweige enthalten induktionslose Widerstände r_2, r_3, r_4 ; zu r_4 , das dem Zweige 1 gegenüberliegt, ist die Kapazität C parallel geschaltet. Der Brückenstrom ist gleich Null, wenn

$$r_1/r_2 = r_3/r_4 \text{ und } L/C = r_2 r_3 \text{ ist.}$$

Mit dieser Methode lassen sich dieselben Messungen wie unter a) ausführen, nur daß man als Normal statt einer Induktionsrolle eine Kapazität benutzt.

(209) Vergleich zweier Selbstinduktivitäten mit dem Differentialtelephon. Auf einen Eisenkern sind zwei genau einander gleiche Wicklungen (1, 2) zusammen aufgewickelt (Abb. 78). Werden beide Wicklungen mit entgegengesetzter Stromrichtung an eine Wechselstrommaschine M angeschlossen, so wird die Induktion im Eisen aufgehoben, wenn Selbstinduktionen L, L und Widerstände r, r in den beiden äußeren Kreisen einander gleich sind; das Verschwinden der Induktion wird an einer tertiären (3) Wicklung mittels Telephons T beobachtet. Man kann auf diese Weise eine unbekannte SI mit einem Normal vergleichen. Gibt man den beiden primären Wicklungen verschiedene Windungszahlen, so müssen sich SI und Widerstände wie die Windungszahlen verhalten. Die Methode eignet sich zur Messung der Induktivität eisenhaltiger Spulen in Maschinen und Transformatoren (s. Hausrath, Unters. elektr. Systeme, S. 61. J. Springer. Berlin 1907. Land- und Seekabelwerke, Köln-Nippes.)

(210) Gegeninduktivitäten. a) Man schickt in die primäre Wicklung den gemessenen Gleichstrom I , wendet den Strom und mißt mittels ballistischen Galvanometers den Stromstoß Q , der in der sekundären Wicklung induziert wird. Ist R_2 der Gesamtwiderstand des sekundären Kreises, so ist die Gegeninduktivität $M = Q \cdot R_2 / 2 I$. Über die Eichung des ballistischen Galvanometers s. (204).

Einen direkten Vergleich von zwei Gegeninduktivitäten erhält man auf folgendem Wege:

Die Gegeninduktivität der Rollen A und a sei bekannt und $= M$; diejenige der Rollen A' und a' unbekannt $= M'$; M' soll mit M verglichen werden. Man schaltet nach Abb. 79. Sollen die Induktivitäten für stationäre Zustände ver-

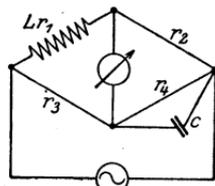


Abb. 77. Vergleich einer Selbstinduktivität mit einer Kapazität.

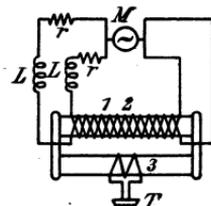


Abb. 78. Vergleich zweier SI mit Differentialtelephon.

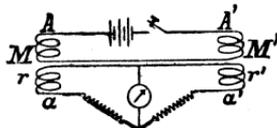


Abb. 79. Vergleich zweier Gegeninduktivitäten.

gleiches werden, so benutzt man eine Gleichstromquelle und ein ballistisches Galvanometer; beim Vergleich mit Wechselstrom eine Wechselstromquelle und ein Telephon oder Vibrationsgalvanometer. Man stellt auf verschwindenden Strom ein; Bedingung dafür ist $M : M' = L : L' = r : r'$; darin sind L und L' die Selbstinduktivitäten der sekundären Spulen. Man muß also unter Umständen zu a und a' Ballastvariablen hinzufügen.

b) Ist M die Gegeninduktivität zweier Spulen, deren Selbstinduktivitäten L_1 und L_2 sein mögen, so mißt man zunächst nach einer der Methoden (207, 208) die Selbstinduktivität L' der hintereinander geschalteten Spulen, wobei die Ströme in beiden Spulen einander gleichgerichtet sein sollen; dann ist $L' = L_1 + L_2 + 2M$. Dreht man die Stromrichtung in einer der Spulen um, so findet man auf demselben Wege $L'' = L_1 + L_2 - 2M$; daraus ergibt sich: $M = 1/4 (L' - L'')$. Die Methode ist nicht zu brauchen, wenn L_1 und L_2 sehr verschieden groß sind.

Über andere Methoden, namentlich solche mit Hilfe von Variatoren für Gegeninduktivitäten Campbell, Nat. phys. Lab. coll. res. Bd. 4, S. 223, 1908.

(211) Vergleich einer Gegeninduktivität mit einer Kapazität. Schaltung nach Abb. 80. Die unbekannte Gegeninduktivität M wird mit dem Normalkondensator C verglichen.

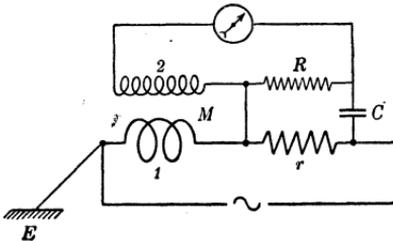


Abb. 80. Vergleich einer Gegeninduktivität mit einer Kapazität.

Die Methode ist für kleine ωM (bis zu 4Ω) brauchbar. r ist ein fester Widerstand. R wird reguliert bis das Vibrationsgalvanometer zur Ruhe kommt; r muß klein gegen $\frac{1}{\omega C}$ bleiben. Dann ist: $M = C \cdot r \cdot R$.

Für größere Induktivitäten eignet sich besser die Schaltung nach Abb. 81. R muß groß gegen ωL , ωC groß $\frac{1}{\rho}$ sein. ρ ist ein fester Widerstand, der Nullstrom des Galvanometers wird durch Regeln von R herbeigeführt. Dann ist

$$M = R \rho C.$$

In R ist der Spulenwiderstand eingeschlossen. (Schering und Engelhardt, Zeitschr. f. Instrk. 1920, S. 122; 1921, S. 139.)

(212) Vergleich von Kapazitäten. Die beiden Kondensatoren werden miteinander verbunden, um sie auf gleiches Potential zu bringen; sie werden geladen und voneinander getrennt. Darauf entlädt man sie nacheinander durch ein ballistisches Galvanometer (204). Die Ausschläge des Galvanometers geben das Verhältnis der Kapazitäten an.

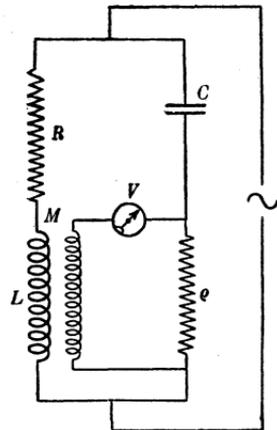


Abb. 81. Vergleich einer großen Gegeninduktivität mit einer Kapazität.

Oder man mißt nur die Differenz ihrer Kapazitäten nach der Schaltung Abb. 82 (Thomson'sche Methode); r_1 und r_2 sind große Widerstände, e ein verschiebbarer Erdkontakt. Zunächst werden die Verbindungen ap und bq hergestellt und die Kondensatoren geladen. Dann werden diese Verbindungen aufgehoben und pm und nq verbunden; die Ladungen gleichen sich bis auf einen Rest aus, der gemessen wird, indem man r mit s verbindet. Verschiebt man e so lange, bis der Rest gleich null ist, so gilt $C_1 : C_2 = r_2 : r_1$.

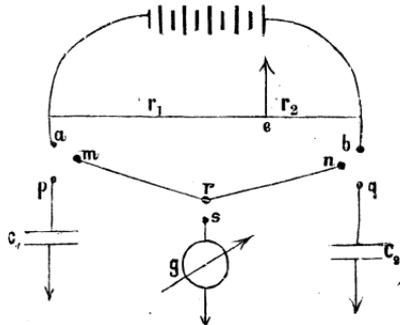


Abb. 82. Vergleich zweier Kapazitäten mit Galvanometer.

(213) Messung der Kapazität in der Wheatstoneschen Brücke mit Wechselstrom.

Der Vergleich zweier Kapazitäten miteinander wird in der Wheatstoneschen Brücke nach Abb. 83 unter Benutzung von Wechselstrom ausgeführt. $C_1 : C_2 = r_4 : r_3$ ist die Bedingung für Schweigen des Telefons. Dabei ist vorausgesetzt, daß im Kondensator keine Energieverluste auftreten (dielektrische Hysterese). Ist letzteres der Fall, so kann man sich einen solchen Kondensator durch einen verlustlosen von der Kapazität C ersetzt denken, dem ein Widerstand ρ (Verlustwiderstand) vorgeschaltet ist. Statt der Verlustwiderstände gibt man häufig die Verlustwinkel δ an, wo $\delta = \omega C \rho$ ist (ω Kreisfrequenz). (50, 95).

Es sei in Zweig 1 der unbekannte mit Verlusten behaftete Kondensator; man bringt in Zweig 2 einen verlustfreien Luftkondensator und schaltet parallel zu r_4 einen verlustfreien Drehkondensator C_4 ; dann ist mit genügender Genauigkeit die Gleichgewichtsbedingung:

$$C_1 : C_2 = R_4 : R_3$$

$$\delta_1 = \omega C_4 R_4.$$

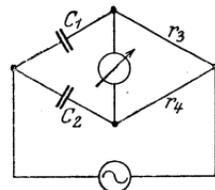


Abb. 83. Vergleich zweier Kapazitäten mit Wechselstrom.

Fehler, die durch Eigenkapazitäten der einzelnen Zweige gegen Erde, Induktivität der für die Abgleichung erforderlichen Widerstände usw. auftreten können, werden bei einer Austauschmethode vermieden. Man vertauscht in der zuletzt angewandten Schaltung den Verlustkondensator C_x in Zweig 1 durch einen regelbaren verlustfreien Normalkondensator C_n . Man bringt die Brücke durch Regeln von C_n und C_4 ins Gleichgewicht. Ist ΔC_4 die Änderung, die beim Übergang von C_x auf C_n in C_4 erforderlich ist, so ist dies die Gleichgewichtsbedingung. Diese Methode ist besonders für Verlustmessungen geeignet (Giebe u. Zickner, Arch. f. El. 11. S. 109, 1922). Geysger, Arch. f. El. Bd. 12, S. 370. Über die Messung der Teilkapazitäten von mehradrigen Kabeln s. K. W. Wagner, ETZ 1912, S. 635.

Die Betriebskapazität kann nach Kipfmüller (ETZ 1922, S. 461) durch die Schaltung nach Abb. 84a gemessen werden. C_1 ist die Teilkapazität zwischen den Leitern eines zweiadrigen Kabels, $C_2 C_3$ sind die Teilkapazitäten gegen den Mantel. Die Brücke muß zunächst so justiert werden, daß die Punkte a und b auf entgegengesetzt gleiches Potential kommen. Dies geschieht mittels einer Hilfsbrücke (Abb. 84b) aus zwei einander gleichen Widerständen $R_1 R_2$ und den regulierbaren Kapazitäten $C_1 C_2$ nebst zwischengeschaltetem Widerstand r . Nachdem auf diese Weise die Stromquelle symmetriert ist, wird in der Hauptbrücke durch r_0, C_0 der Fernhörer zum Schweigen gebracht. Die Messungen werden nach

Vertauschung der Teilkapazitäten gegen Erde miteinander wiederholt und die Ergebnisse gemittelt. Dann ist $C_0 = C_1 + \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}$ die Betriebskapazität, r_0 der Verlustwiderstand des Kabels. Eine andere Schaltung bei Jordan, ETZ 1922, S. 10.

Über Messung mit Hochfrequenz: Seibt, Zeitschr. f. Schwachstr. 1911, S. 654.

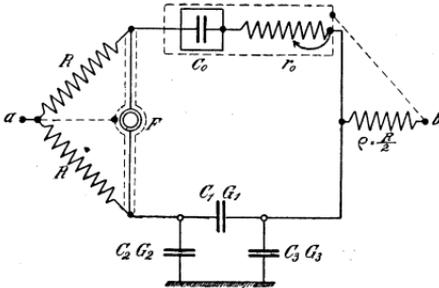


Abb. 84 a. Messung einer Betriebskapazität.

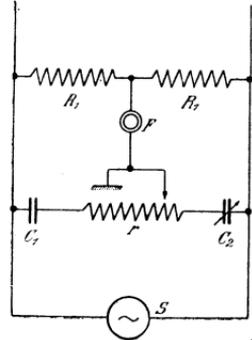


Abb. 84 b. Hilfsbrücke zum Abgleich der Endpotentiale.

Über die absolute Messung einer Kapazität s. Maxwell (Electr. II, § 557), J. J. Thomson, Phil. Tr. Bd. 174, S. 707, 1883; Giebe, Zeitschr. Instrk. 1909, S. 205, 269, 301.

(214) Resonanzmethode. Bei Anwendung von Wechselströmen höherer Frequenz benutzt man am besten eine Resonanzmethode. Man schließt die zu messende Kapazität und eine passende Induktivität zu einem Kreise und erregt diesen mit Hochfrequenz [am besten durch eine Hochvakuumröhre (98) u. (208)]; die Resonanzlage wird z. B. durch Detektor mit Galvanometer festgestellt. Um von den besonderen Eigenschaften des Schwingungskreises unabhängig zu werden, ersetzt man die unbekannte Kapazität durch einen geeichten Drehkondensator und stellt mit diesem die Resonanzlage wiederum ein. Seine Kapazität ist dann gleich der unbekanntenen.

(215) Kapazität von Spulen. Größere Spulen besitzen eine gewisse Eigenkapazität; sie verhalten sich bis zu hohen Frequenzen wie Spulen ohne Kapazität, denen ein Kondensator von der Kapazität C parallel geschaltet ist. Hat die Spule den Wirkwiderstand R und die Induktivität L , so ist der Operator angenähert:

$$z = R(1 + 2\omega^2 LC) + i\omega L(1 + \omega^2 LC).$$

Man bestimmt C , indem man die Spulenklammern durch ein Heliumröhrchen überbrückt und den so gebildeten Kreis mit einem Hochfrequenzgenerator von regulierbarer Frequenz induktiv koppelt. Man bestimmt die Wellenlänge λ , bei der das Röhrchen aufleuchtet (Resonanz) durch einen geeigneten Wellenmesser, dann ist:

$$C = \lambda^2 / 36 \pi^2 \cdot 10^{10} L.$$

C in μF , λ in m, L in H (Ann. d. Phys. Bd. 41, S. 543).

(216) Die Dielektrizitätskonstante ϵ wird bestimmt durch die Vergleichung eines Plattenkondensators, der erst mit Luft und dann mit dem zu untersuchenden Stoffe gefüllt ist, mit einem anderen, ihm nahezu gleichen Kondensator. Zur Vermeidung der Streuung müssen die Endplatten dem gleichen Pol angehören (G r ü n eisen u. G i e b e, Verh. d. phys. Ges. 1912, S. 921).

Ist C_0 die Kapazität des mit Luft gefüllten Kondensators, C diejenige des mit dem zu untersuchenden Dielektrikum gefüllten, so ist $\epsilon = C/C_0$. Dabei ist voraus-

gesetzt, daß das Dielektrikum den Raum zwischen den Platten vollständig ausfüllt. Dies ist bei Flüssigkeiten immer der Fall, bei festen Körpern in der Regel nicht. Besitzt der Kondensator einen Plattenabstand a , und ist die Dicke des eingeschobenen festen Körpers d , so ist: $1/\epsilon = 1 - (a/d) \cdot (C - C_0)/C$.

Die Resultate werden fehlerhaft, wenn die Dielektriken nicht vollkommen isolieren.

(217) Dielektrizitätskonstanten von unvollkommenen Isolatoren werden nach Methoden von Nernst gefunden.

a) Kompensation des Leitvermögens. Die Schaltung ist im wesentlichen die gleiche wie in (216). Der Versuchskondensator c (Abb. 85), dessen Boden zur Erde abgeleitet ist, besitzt einen konstanten Plattenabstand. Er kann entweder zu dem konstanten Hilfskondensator c_2 oder zu dem meßbar variierbaren Kondensator c_1 parallel geschaltet werden. Letzterer besteht aus einem Plattenkondensator mit verschiebbarer Glasplatte; die Abhängigkeit der Kapazität von der Stellung der Glasplatte

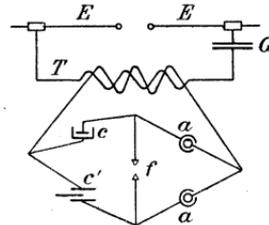
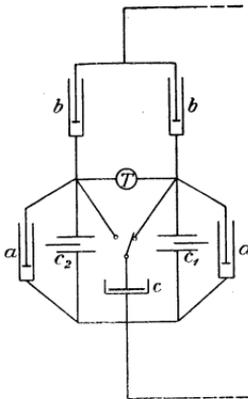


Abb. 85 und 86. Dielektrizitätskonstante unvollkommener Isolatoren.

ist durch besonderen Versuch bestimmt. Den Kondensatoren parallel geschaltet sind regulierbare Flüssigkeitswiderstände $a a$, welche ein eventuelles Leitvermögen des Dielektrikums kompensieren sollen. Die übrigen beiden Zweige der Wheatstoneschen Brücke werden ebenfalls durch zwei regulierbare, einander gleiche Flüssigkeitswiderstände $b b$ gebildet. Man schaltet zunächst c luftgefüllt parallel zu c_2 und reguliert c_1 und die Widerstände, bis das Telefon schweigt. Danach wird c parallel zu c_1 geschaltet und von neuem eingestellt. Durch die Verschiebung der Glasplatte von c_1 wird das Doppelte der Kapazität c einschl. Zuleitung en gefunden.

Füllt man nun den Kondensator mit einer Flüssigkeit von der bekannten Dielektrizitätskonstanten ϵ_0 , so findet man durch dieselbe Methode die Kapazität c_0 . Schließlich wird die Kapazität c_x des mit einer Flüssigkeit von der Dielektrizitätskonstanten ϵ_x gefüllten Kondensators gemessen; dann folgt

$$2\epsilon_x - 1 = (\epsilon_0 - 1) \cdot (c_x - c) / (c_0 - c).$$

b) Messung in der Wheatstoneschen Brücke mittels sehr schneller Schwingungen. Die raschen Schwingungen werden mittels Induktors $E E$ (Abb. 85), Glasplattenkondensators G und Lufttransformators T erzeugt. Zwei Zweige der Wheatstoneschen Brücke werden durch zwei einander annähernd gleiche Leidener Flaschen $a a$ gebildet. c ist der Versuchskondensator, c' der mittels der Glasplatte regulierbare (vgl. 217a). Als Indikator der Stromlosigkeit in der Brücke dient eine Funkenstrecke f , die durch zwei fein einstellbare, aufeinander senkrechte Platinschneiden gebildet wird.

Es wird ebenso wie unter a) eine Messung an dem mit Luft gefüllten Kondensator gemacht. Dann wird der Kondensator mit einer Flüssigkeit von bekannter

Dielektrizitätskonstanten gefüllt und schließlich mit der zu untersuchenden Flüssigkeit. Die Berechnung erfolgt nach derselben Formel wie unter a). S. auch Phys. Zschr. 17; S. 117.

Literatur: Orlich, Kapazität und Induktivität. Braunschweig 1909.

Wechselstrommessungen.

(218) Spannung, Strom, Leistung. Effektive Spannung und effektive Stromstärke werden wie bei Gleichstrom durch geeignete Spannungs- und Strommesser gemessen. Während aber bei Gleichstrom die Leistung durch einfache Multiplikation der getrennt gemessenen Werte von Strom und Spannung erhalten wird, ist bei Wechselstrom zu beachten, daß, sobald Strom und Spannung in der Phase um den Winkel φ gegeneinander verschoben sind, die Leistung gleich $E I \cos \varphi$ ist; vgl. (130). Die Messung der Leistung von Wechselströmen erfordert somit besondere Methoden und Apparate.

(219) Methoden der Leistungsmessung. Die Leistung eines Wechselstromes $E I \cos \varphi$ wird am einfachsten durch geeignete Leistungsmesser ermittelt, die gewöhnlich aus zwei Stromkreisen bestehen: dem Strompfad, der vom Arbeitsstrom I durchflossen wird, und dem Spannungspfad, an den die Spannung E gelegt wird. Die Leistungsmesser werden je nach Art der zu messenden Leistung verschieden geschaltet. [Vgl. auch (189)].

a) Einphasiger Wechselstrom. Es bedeute N die Angabe des Leistungsmessers, p_s den Eigenverbrauch des Leistungsmessers im Spannungspfad (z. B. beim Dynamometer $i^2 \times$ Gesamtwiderstand des Spannungspfades), p_h den Eigenverbrauch des Leistungsmessers im Strompfad (beim Dynamometer $I^2 \times$ wirksamer Widerstand des Strompfades); dann ist:



Abb. 87a und 87b. Schaltung von Leistungsmessern.

Schaltung Abb.	Abgegebene Leistung einer Energiequelle	Verbrauch in einer Belastung
87 a	$N + p_s$	$N - p_h$
87 b	$N + p_h$	$N - p_s$

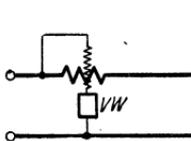


Abb. 88a.
Richtige Schaltung
des Vorwiderstandes eines Leistungsmessers.

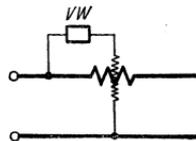


Abb. 88 b.
Falsche Schaltung

Über die Zweckmäßigkeit der einen oder der anderen Schaltung s. v. Stud-niarski, ETZ Bd. 30, S. 821.

b) Zur Messung der gesamten Leistung eines beliebig belasteten

Drehstromsysteme sind zwei Leistungsmesser erforderlich, die nach Abb. 89 angeordnet werden, und zwar gleichgültig, ob die Belastung in Stern oder in Dreieck geschaltet ist. Die Gesamtleistung ist gleich der Summe der Angaben der Leistungsmesser. Im Diagramm (Abb. 90) sind die für die Leistungsmessungen

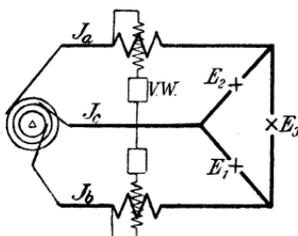


Abb. 89. Drehstromleistung (Aronsche Schaltung).

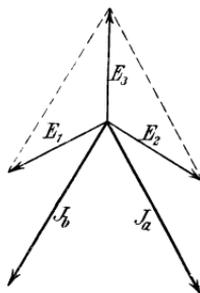


Abb. 90. Drehstromdiagramm für induktionslose Last.

in Betracht kommenden Teilspannungen $E_1 E_2$ sowie die Teilströme $I_b I_a$ für den Fall einer gleichmäßigen induktionslosen Belastung in allen drei Phasen eingezeichnet. Wird die Belastung gleichmäßig und induktiv, so hat man die Ströme $I_b I_a$ gegen das Spannungskreuz um den der induktiven Belastung entsprechenden Phasenwinkel φ zu verschieben. Für $\varphi = 60^\circ$ wird der Ausschlag des einen Leistungsmessers gleich Null ($\angle E_2 I_a = 90^\circ$); ist φ noch größer, so hat man die Richtung des Spannungstromes in diesem Leistungsmesser umzudrehen und seine Angaben negativ in Rechnung zu setzen. Es sind Umschalter konstruiert worden (S. & H.), durch welche derselbe Leistungsmesser nacheinander in zwei der Hauptleitungen gelegt wird. Sind bei gleichmäßiger Belastung in den drei Phasen N_1 und N_2 die in der Schaltung Abb. 89 gemessenen Teilleistungen, so wird die Phasenverschiebung zwischen Strom und zugehöriger Spannung in der Belastung berechnet aus:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}.$$

Gleichbelastetes Drehstromsystem. Sind die Belastungen in den drei Zweigen nach Stromstärke und Phase einander gleich, so genügt zur Messung der Gesamtleistung ein Leistungsmesser, der nach Abb. 91 geschaltet wird.

Die Spannungsspule liegt in dem sog. Sternschaltungswiderstand; die drei Widerstände zwischen den drei Polen der Drehstromleitung und dem „künstlichen Nullpunkt“ N sind einander gleich. Beträgt jeder $R \Omega$ und ist K die Konstante des dynamometrischen Leistungsmessers (223), so ist die Gesamtleistung des gleichmäßig belasteten Drehstromsystems gleich $3KR \cdot \alpha$.

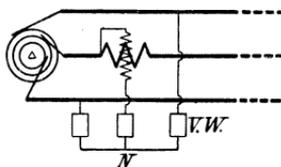


Abb. 91. Leistung eines gleichmäßig belasteten Drehstromsystems.

c) Drehstromsystem mit viertem Leiter. Besitzt das Drehstromsystem einen vierten „neutralen Leiter“, der vom Sternpunkt der Energiequelle ausgeht, so braucht man für eine strenge Messung der Gesamtleistung 3 Leistungsmesser, deren Strompfade in die 3 Außenleiter gelegt werden, während die Spannungspfade zwischen Außenleitern und neutralem Leiter liegen. Vereinfachte Schaltungen s. ETZ 1901, S. 214, und 1903, S. 976. Genaue Formeln bei Orlich, ETZ 1907, S. 71.

(220) **Methode der drei Spannungsmesser.** Um die zwischen den Punkten ab (Abb. 92) eines Stromkreises verbrauchte Leistung N zu finden, wird hinter dem Verbrauchskreis zwischen die Punkte b und c der induktionslose Widerstand R geschaltet. Die Spannung zwischen ac sei gleich E , zwischen ab gleich E_1 , zwischen bc gleich E_2 . Diagramm in Abb. 93. Dann ist

$$\cos \varphi = \frac{E^2 - E_1^2 - E_2^2}{2E_1 E_2}$$

und daher die gesuchte Leistung $N = (E^2 - E_1^2 - E_2^2)/2R$. Der Eigenverbrauch der Spannungsmesser ist zu berücksichtigen (vgl. ETZ 1901, S. 98).

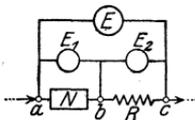


Abb. 92. Leistung aus drei Spannungsmessungen.

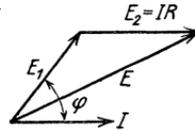


Abb. 93. Diagramm der Methode der drei Spannungsmesser.

(221) **Methode der drei Strommesser (Fleming).** Schaltet man zum Verbrauchskreis einen induktionslosen Widerstand R parallel, nennt den unverzweigten Strom I , die Ströme in der Verbrauchsleitung und in dem induktionslosen Widerstand bzw. I_1, I_2 , so ist die gesuchte Leistung gleich $\frac{1}{2} R (I^2 - I_1^2 - I_2^2)$.

(222) **Die Wechselstrommeßapparate** zur Messung von Spannung, Stromstärke und Leistung zerfallen in zwei Klassen:

I. Diejenigen Apparate, die für Gleichstrom und Wechselstrom die gleichen Angaben machen. Die mit Gleichstrom geprüften Apparate können ohne weiteres mit Wechselstrom gebraucht werden; zuweilen ist eine berechenbare Korrektur erforderlich. Hierhin gehören die Dynamometer, Elektrometer und Hitzdrahtapparate.

II. Diejenigen Apparate (bzw. Hilfsapparate), die nur auf Wechselstrom ansprechen. Die im beweglichen System fließenden Ströme werden durch Induktion erzeugt; das bewegliche System bedarf somit keiner Zuleitungen. Die Angaben sind mehr oder weniger von der Frequenz abhängig; diese Apparate müssen in der Regel mittels der Apparate der vorhergehenden Klasse geprüft werden. (Induktionsmeßgeräte, Strom- und Spannungswandler.)

(223) **I. Apparate für Gleichstrom und Wechselstrom.** a) Die Dynamometer [vgl. (167) bis (169)] sind als Spannungsmesser, Strommesser und Leistungsmesser ausgebildet worden.

Sämtliche Spulen des dynamometrischen Spannungsmessers sind hintereinander geschaltet; die Kraftwirkung der Spulen aufeinander ist somit proportional dem Quadrat des effektiven Spannungstromes. Wird also dem Dynamometer ein induktionsloser Widerstand vorgeschaltet, so erhält man einen Apparat zur Messung der effektiven Spannungen; da aber für Wechselstrom nicht der ohmsche Widerstand des Spannungspfades R , sondern der Scheinwiderstand $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ in Frage kommt, so ist eigentlich eine Korrektur erforderlich. Diese Korrektur ist aber meistens, namentlich bei der Messung höherer Spannungen, zu vernachlässigen, weil die Selbstinduktivität der Spulen (gewöhnlich von der Größenordnung 0,01–0,1 H) gegenüber dem induktionslosen Vorwiderstand zu gering ist. Die Abweichung ist bei einem Strom der Frequenz 50 kleiner als ein Tausendstel, wenn $L \leq 6 \cdot 10^{-6} R$ ist.

Es werden direkt zeigende dynamometrische Spannungsmesser für Gleich- und Wechselstrom gebaut, bei denen feste und bewegliche Spule mit einem induktionslosen Widerstand hintereinander geschaltet sind. Die bewegliche Spule ist

in Spitzen gelagert und trägt einen über einer ungleichmäßigen Skale spielenden Zeiger. Der Strom wird der beweglichen Spule durch zwei flache Spiralfedern zugeführt, die gleichzeitig die Richtkraft liefern (ETZ 1900, S. 399 und 891).

Der kleinste Meßbereich, für den direkt zeigende Spannungsmesser gebaut werden, ist 15 V; der Stromverbrauch dieser Apparate beträgt etwa 0,5 A.

Dynamometrische Strommesser. Größere Vorsicht erfordert die Verwendung des Dynamometers im Nebenschluß als Strommesser. Man kann es zweckmäßig in der Weise verwenden, daß man feste und bewegliche Spule unter Vorschaltung geeigneter Widerstände in beiden Zweigen einander parallel schaltet. Die Angaben eines derartig geschalteten Dynamometers sind von der Frequenz unabhängig und können nach der für die Gleichstromrechnung in dieser Schaltung gefundenen Konstanten berechnet werden, wenn das Verhältnis von Widerstand zur Selbstinduktion für beide parallel geschaltete Zweige dasselbe ist (vgl. M. Wien, Wied. Ann., Bd. 63, S. 390; Journ. Inst. El. Eng. 48, S. 515, 1912).

Diese Schaltung wird angewandt bei den direkt zeigenden Feinstrommessern für Gleich- und Wechselstrom von Siemens & Halske und der AEG. (ETZ 1900, S. 399 und S. 891); diese sind für maximale Ströme von 0,03 A bis 200 A konstruiert und können zwei mittels Stöpsel umschaltbare Meßbereiche enthalten, die sich wie 1 : 2 verhalten. Über eine besondere Form von Dynamometern mit Spanndrahtaufhängung und nahezu gleichmäßiger Skale zur Strommessung (Meßbereiche 0,015 A bis 5 A) s. Bruger, ETZ 1904, S. 822 (Hartmann & Braun).

Dynamometrische Leistungsmesser. Man schickt den Hauptstrom I durch die festen Spulen und schließt die bewegliche unter Vorschalten eines geeigneten induktionslosen Widerstandes wie einen Spannungsmesser an die Spannung an. Bedeutet R den Gesamtwiderstand des Spannungskreises, so ist, wenn man die SI der Spannungsspule vernachlässigt, der Spannungsstrom $i = E/R$.

Ist K (167), die dynamometrische Konstante, gemäß der Gleichung $K \cdot \alpha = I i$ gemessen, wo α den Ausschlag bedeutet, so ist die zu messende Leistung gegeben durch die Gleichung $N = K R \cdot \alpha$. Die Dynamometerkonstante mit dem jeweiligen Gesamtwiderstand des Spannungskreises (Spule + Vorschaltwiderstand) multipliziert ergibt also die Leistungsmesserkonstante.

Die so gefundene Konstante ist auch für Wechselstrommessungen gültig; enthält aber der Spannungspfad eine größere SI L , so ist das Resultat noch zu multiplizieren mit $(1 \pm \frac{\omega L}{R} \cdot \text{tg } \varphi)$, wo φ die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Hauptstrom bedeutet. Das negative Zeichen gilt, wenn der Strom in der Phase hinter der Spannung zurückbleibt, das positive, wenn er vorausseilt.

Fehlerquellen können bei der Verwendung mit Wechselstrom durch Wirbelströme zustande kommen, die in benachbarten Metallteilen oder in der Hauptstromspule selbst erzeugt werden. Deshalb ist es ratsam, möglichst nur die Stromleiter aus Metall herzustellen und stärkere Stromleiter in geeigneter Weise zu unterteilen.

Bei den direkt zeigenden dynamometrischen Leistungsmessern kann es durch geeignete Form bzw. Abmessung der Spulen erreicht werden, daß die Skale eine fast gleichmäßige ist; das bewegliche System besitzt meist eine Luftdämpfung, der Spannungsstrom beträgt in der Regel maximal 0,03 A.

Diese Apparate werden für Hauptstromstärken von 0,5 bis zu 400 A gebaut; die Hauptstromspule kann aus zwei oder vier einander gleichen Wicklungen hergestellt werden, die nebeneinander oder hintereinander geschaltet werden können. Man erhält somit Strommeßbereiche mit dem Verhältnis 1 : 2 : 4 (z. B. Siemens Zschr. 1922, S. 421). Die Selbstinduktivitäten der Spannungsspulen sind so gering, daß die durch sie verursachte Korrektur praktisch vernachlässigt werden kann. Namentlich bei höheren Spannungen ist darauf zu achten, daß nur eine verhältnismäßig geringe Potentialdifferenz zwischen Spannungsspule

und Hauptstromspule besteht; dementsprechend ist der Vorwiderstand des Spannungskreises zu schalten. Vgl. Abb. 88 auf S. 164. Siemens-Zschr. 1922, S. 494.

Über ferrodynamische Leistungsmesser s. Dolivo-Dobrowolsky, ETZ 1913, S. 113. Über Leistungsmesser mit eisengeschlossenem System s. Skirl, Siemens Zschr. 1921, S. 167.

Nähere Einzelheiten in Skirl, Meßgeräte und Schaltungen für Wechselstrom-Leistungsmessungen, Berlin 1920.

(224) b) Elektrometer eignen sich zu Spannungs- und Leistungsmessungen. Zu Spannungsmessungen wird das Elektrometer in der idiotastischen oder Doppelschaltung angewandt (vgl. 174, 3). Um einen kommutierten Ausschlag zu erhalten, hat man die Verbindungen nach Abb. 94 auszuführen. Eine mit Gleichspannung gemessene Konstante des Apparates ist für die Wechselstrommessungen ohne weiteres anwendbar, sofern nicht der Widerstand des Aufhängedrahtes zu groß ist (173). Mit einem Platinfaden von 0,005 mm Durchmesser kann man bei 2 m Skalenabstand für 1 V 130 Skalenteile kommutierten Ausschlag erhalten (Zeitschr. Instrk. 1904, S. 143). Über statische Spannungsmesser als direkt zeigende Apparate s. (175); sie zeichnen sich dadurch aus, daß sie keine Energie verbrauchen.

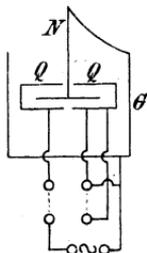


Abb. 94. Spannungsmessung mit Elektrometer.

Hat man eine Spannung zu messen, die über den Meßbereich des Spannungsmessers hinausgeht, so ist es am zweckmäßigsten, die zu messende Spannung durch einen großen Widerstand R zu schließen und den Spannungsmesser an eine Unterabteilung desselben von geeigneter Größe R_1 anzuschließen. Seine Angaben sind dann mit R/R_1 zu multiplizieren.

An Stelle eines Widerstandes kann man auch eine Reihe hintereinander geschalteter Kondensatoren nehmen (175). Doch kann man aus den Kapazitäten nur dann die Spannungen berechnen, wenn Kondensatoren sowohl wie Elektrometer einen sehr hohen Grad von Isolation besitzen. Ist die Kapazität des Elektrometers nicht verschwindend gegenüber den Kapazitäten der verwandten Kondensatoren, so ist sie in Rechnung zu setzen. Über die Messung kleiner Wechselspannungen mit Transformator und Elektrometer s. Gewecke, Arch. f. El. Bd. 7, S. 203.

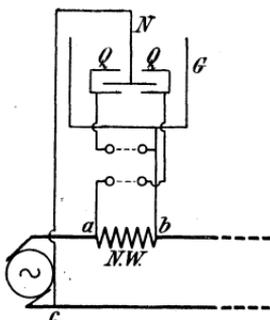


Abb. 95. Leistungsmessung mit Elektrometer.
N.W. induktionsfreier Normalwiderstand.
QQ Quadrantenpaar.
NG Nadel und Gehäuse.

(225) Leistungsmessungen mit dem Elektrometer werden zweckmäßig nur mit dem Spiegel-elektrometer vorgenommen. Schaltung nach Abb. 95. Es wird der Ausschlag a beobachtet, der beim Wenden des Umschalters entsteht. Dann ist die zu messende Leistung gleich $Ka/R - \frac{1}{2}I^2R$, worin K die Elektrometerkonstante, R den NW bedeutet. K wird durch Messung in der Quadrantenschaltung unter Verwendung von Gleichspannung gefunden, wobei die Nadelspannung numerisch gleich der Betriebsspannung des Wechselstromes sein muß. $\frac{1}{2}I^2R$ ist in der Regel nur eine Korrektur (vgl. Orlich, Zeitschr. Instrk. 1903, S. 97; 1909, S. 33 und ETZ 1909, S. 435, 466), Petersen, Arch. f. El. Bd. 1,

S. 95; Journ. Inst. El. Eng. 51, S. 294, 1913.

Die Messungen mit dem Elektrometer kommen nur für Laboratorien in Frage. Ihr Vorteil besteht darin, daß in Verbindung mit einem geeigneten Satz von Widerständen mit demselben Elektrometer Messungen bei beliebig hohen Spannungen und großen Strömen gemacht werden können.

(226) c) Hitzdrahtapparate (172) werden unter Verwendung geeigneter Vor- und Nebenwiderstände als Strom- und Spannungsmesser gebraucht. Mit Gleichstrom geprüft, bedürfen ihre Angaben bei Wechselstrommessungen keiner weiteren Korrektur. Doch ist die erreichbare Genauigkeit nicht so groß wie bei den dynamometrischen Apparaten. Bei Hitzdrahtapparaten mit Nebenwiderständen ist, namentlich wenn es sich um höhere Frequenzen oder große Stromstärken handelt, sorgfältig auf die Leitungsführung zu achten, Abb. 96 (ausgezogene Linie richtige Leitungsführung, punktierte Linie falsche Leitungsführung). Vgl. auch (186).

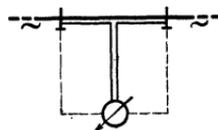


Abb. 96. Nebenwiderstand für Wechselstrom.

Bei den Apparaten, welche thermoelektrische Kräfte benutzen (172 c) kommt unter Umständen durch den Peltiereffekt ein kleiner Unterschied zwischen den Angaben für Gleichstrom- und Wechselstrom zustande (Schering a. a. O.). Die Apparate können in Verbindung mit geeigneten Nebenwiderständen zur Messung jeder beliebigen Wechselstromstärke benutzt werden.

Über ein Hitzdrahtleistungsmessers. ETZ 1903, S. 530.

(227) d) Weicheisenapparate machen im allgemeinen für Gleichstrom und Wechselstrom nicht die gleichen Angaben. Bei neueren Apparaten jedoch ist dieser Unterschied selbst bei Anwendung höherer Frequenzen nicht vorhanden. Die Apparate haben daher, zumal sie verhältnismäßig billig und unempfindlich gegen Überlastung sind, die weiteste Verbreitung gefunden. Mit mehreren Meßbereichen s. ETZ 1922 S. 122.

(228) II. Apparate, die nur auf Wechselstrom ansprechen. a) Drehfeldmeßgeräte beruhen auf der Herstellung eines künstlichen Drehfeldes (Ferraris). Es kommen dabei dieselben Schaltungen wie bei den Induktionszählern in Frage (291), außerdem die 90°-Schaltung nach Görges und Schrottke (ETZ 1901, S. 657), welche eine Wheatstonesche Brückenverzweigung benutzt, und von Görner (ETZ 1899, S. 750). Die Schaltungen werden zur Konstruktion von Strom-, Spannungs- und Leistungsmessern angewandt. Die Apparate zeichnen sich durch Unempfindlichkeit gegen störende Magnetfelder und große Drehmomente für die beweglichen Systeme aus. Sie sind deshalb besonders als schreibende Meßgeräte (178) zu gebrauchen.

(229) Spannungs- und Stromwandler dienen bei Wechselstrommessungen denselben Zwecken, wie bei Gleichstrommessungen Vorwiderstände für Spannungsmesser und Nebenwiderstände für Strommesser (197, 198). Regeln für die Bewertung und Prüfung von Meßwandlern s. ETZ 1921, S. 209 u. 836; daselbst auch Einteilung in verschiedene Klassen je nach Belastbarkeit und zulässigen Fehlergrenzen. Bedingungen für die Beglaubigung von Meßwandlern ETZ 1915, S. 358.

Spannungswandler werden vorzugsweise zur Messung von Hochspannung verwandt. Die zu messende Hochspannung wird an die primäre Wicklung des Spannungswandlers angeschlossen, ein passender Niederspannungsmesser an die sekundäre Wicklung; die Spannung wird im Verhältnis der Windungszahlen herabgesetzt. Werden primäre und sekundäre Wicklung gut voneinander isoliert, so erreicht man den Vorteil, daß das Meßinstrument selber nicht mit der Hochspannungsleitung in Berührung ist.

Bei den Stromwandlern wird der Hauptstrom durch die primäre Wicklung geschickt, während an die sekundäre die Stromspule eines Strommessers angeschlossen ist. Die Sekundärwicklung ist demnach fast kurz geschlossen, und die Ströme verhalten sich umgekehrt wie die Windungszahlen.

Stromwandler werden zur Messung hoher Stromstärken und zur Trennung der Strommesser von Hochspannungsleitungen angewandt. Leistungsmesser werden mit Strom- und Spannungswandlern ausgerüstet.

Das Übersetzungsverhältnis der Strom- und Spannungswandler stimmt infolge von Energieverlusten und Streuung nicht genau mit dem Sollwert überein. Auch sind die Ströme bzw. Spannungen des sekundären Kreises in der Phase nicht genau entgegengesetzt gerichtet denen des primären, sondern weichen um einen kleinen Winkel ab. Die Größe dieser Abweichungen hängt von der Größe der Belastungen der sekundären Kreise ab. Besonders empfindlich sind darin die Stromwandler.

Die Phasenverschiebung in den Meßwandlern macht sich bei der Leistungsmessung bemerklich. Sei ein Leistungsmesser mit Strom- und Spannungswandler ausgerüstet, und seien δ_i und δ_e die kleinen Winkel (in Minuten gemessen), um welche die sekundären Vektoren gegen die primären nach vorwärts verschoben sind; dann sind zu den Angaben des Leistungsmessers

$$2,9 (\delta_e - \delta_i) \cdot \text{tg } \varphi \text{ Proz.}$$

zu addieren. Dabei ist $\cos \varphi$ der Leistungsfaktor der mit dem Leistungsmesser zu messenden induktiven Belastung. Es entsprechen sich die Werte:

$$\begin{array}{cccccccccccc} \cos \varphi = & 1 & 0,9 & 0,8 & 0,7 & 0,6 & 0,5 & 0,4 & 0,3 & 0,2 & 0,1 \\ \text{tg } \varphi = & 0 & 0,45 & 0,75 & 1,02 & 1,33 & 1,73 & 2,29 & 3,18 & 4,90 & 9,95. \end{array}$$

Bei normalem Betriebe ist die Kraftliniendichte im Stromwandler sehr gering. Wird er dagegen, während er primär von Strom durchflossen wird, sekundär geöffnet, so steigt die magnetische Induktion sehr stark und kann ihn so stark erwärmen, daß er dadurch beschädigt wird. Da auch eine kurze Öffnung des sekundären Kreises eine Änderung von Übersetzungsverhältnis und Phasenabweichung zur Folge haben kann, so muß die Regel befolgt werden, daß ein

primär erregter Stromwandler sekundär nie offen sein darf.

Man kann an Meßwandlern gleichzeitig mehrere Apparate anschließen, und zwar werden die Spannungspfade an die Spannungswandler einander parallel, die Hauptstrompfade der Apparate an die Stromwandler in Reihe

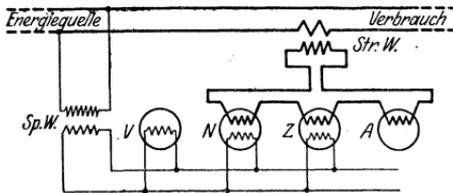


Abb. 97. Meßschaltung für einen Hochspannungskreis.

geschlossen. Abb. 97 stellt eine viel gebrauchte Schaltung dar; Spannungsmesser V , Leistungsmesser N , Zähler Z und Strommesser A sind gleichzeitig an einen Spannungswandler und einen Stromwandler angeschlossen (s. auch Abb. 100).

Die Phys.-Techn. Reichsanstalt prüft Strom- und Spannungswandler und gibt die Abweichungen des Übersetzungsverhältnisses und der Phase in Abhängigkeit von sekundären Belastungen an.

Ein vereinfachter Strommesser für rohe Messungen ist der Anleger von Dietze (280), Abb. 114 (Hartmann & Braun), ETZ 1902, S. 843; 1911, S. 35; 1916, S. 235.

Literatur: Lloyd u. Agnew, Agnew u. Fisch, Bull. of the Bur. of Stand, Bd. 6, S. 273, 281, 1909; Bd. 7, S. 422; Bd. 10, S. 419. — Sharp u. Crawford, Proc. of the Amer. Inst. of Electr. Eng., Bd. 29, S. 1207, 1910; Proc. of Am. Inst. El. Eng. 28, S. 1004, 1909. — Orlich, Helios, Bd. 1912, S. 225. — Keinath, Diss. München 1909. — Möllinger u. Gewecke, ETZ 1911, S. 922 u. 1912, S. 270. ETZ 1915 S. 253. — Alberti und Vieweg, Arch. f. El. 2, S. 209. — Schering u. Alberti, Arch. f. E. 2, S. 263. — Wirz, ETZ 1915 S. 450, 467, 532; Arch. f. El. 6, S. 23. — Schering, Arch. f. El. 7 S. 47. — H. & Br., Ztschr. f. Instrk. 1913, S. 368; ETZ 1914, S. 854; 1915, S. 272. — Schrader, Kurzschlußsichere Stromwandler ETZ 1922, S. 1478. — Keinath, ETZ 1920, S. 788. Kettenstromwandler für sehr große Stromstärken

(230) **Kompensationsmethode.** Vgl. (200). Wechselspannungen können auch kompensiert werden, und zwar muß dies sowohl der Amplitude wie der Phase nach geschehen. Dafür sind zwei Methoden angegeben:

α) **F r a n k e s c h e** Maschine (ETZ 1891, S. 447 und 1913, S. 433. *D r y s d a l e*, Phil. Mag. Bd. 17, S. 402, 1909). Die Maschine besitzt zwei gleiche, eisenfreie Anker; der Feldmagnet dreht sich. Der eine Anker kann meßbar aus dem Felde gezogen und damit die Amplitude seiner EMK geändert, der andere in der Phase gegen den ersten verschoben werden; außerdem kann man Teile der Ankerwicklung aus- und einschalten. Mit dem einen Anker (I) schickt man Strom in den zu untersuchenden Stromkreis ABDE (Abb. 98), der andere (II) wird an diejenigen Punkte AB gelegt, deren Spannung zu messen ist; ein eingeschaltetes Telephon dient dazu, die Einstellung zu finden, indem man in I die Amplitude, in II die Phase des Stromes ändert.

β) **Komplexer Kompensator** (*L a r s e n*, ETZ 1891, S. 1039. *D r y s d a l e*, Electr. Bd. 75, S. 157. *D é g u i s n e*, Arch. f. El. Bd. 5, S. 303). Um die unbekannte Spannung V (Abb. 99) zu messen, schließt man eine gleichperiodige bekannte Spannung E durch einen Widerstand AB und die feste Spule BB' eines Variators für gegenseitige Induktion. Durch den Abzweig CD am Widerstand AB wird die Amplitude, durch Drehen der beweglichen Spule des Variators die Phase der unbekanntten Spannung kompensiert. Es wird auf Verschwinden des Tones im Telephon eingestellt.

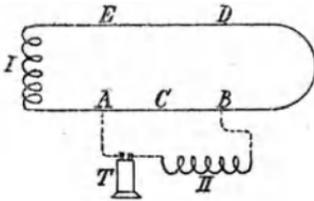


Abb. 98. Kompensation bei Wechselstrom.

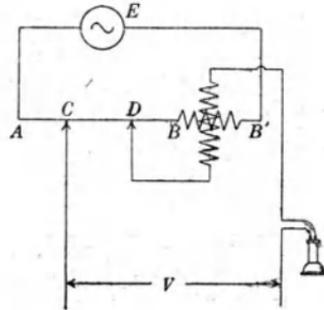


Abb. 99. Komplexer Kompensator.

(231) **Messung der Phasenverschiebung.** Um die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom zu messen, hat man im allgemeinen Spannung E , Strom I und Leistung N zu messen; dann ist definitionsgemäß (130) $\cos \varphi = N/EI$.

Der **Phasenmesser** von *B r u g e r* (Phys. Zeitschr. Bd. 4, S. 881, 1903; ETZ 1913, S. 998 u. 1915, S. 595, Verfertiger H. & Br.) besteht aus einer Hauptstromspule, in deren Felde sich eine Spannungsspule in Spitzen drehbar befindet. Letztere besteht aus vier halbkreisförmigen Spulen, die mit der geraden Seite an der Achse so befestigt sind, daß ihre Ebenen um je 90° gegeneinander versetzt sind. Der Spannungskreis besteht aus zwei parallel geschalteten Zweigen, von denen der eine aus zwei um 90° versetzten Teilspulen und einem induktionslosen Widerstand besteht (hintereinander geschaltet), der andere aus den beiden anderen Teilspulen und einem hohen induktiven Widerstand (ebenfalls hintereinander geschaltet). Das bewegliche System besitzt keine Richtkräfte wie Federn oder dgl., hat also im unbelasteten Zustand keine eindeutige Ruhelage. Bei Belastung erfährt es eine feste Einstellung, die lediglich vom Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung abhängt, dagegen von der Größe von Strom und Spannung unabhängig ist. Über andere Phasenmesser s. *T u m a*, Zeitschr. Elektrotechn. Wien 1898, S. 14, 235, *M a r t i e n s s e n*, ebenda, S. 93, 108, 117. — *W e s t o n G e s.* ETZ 1912, S. 1147; 1914, S. 450. — *K e i n a t h*, ETZ 1915, S. 28. — *G r u h n*, ETZ 1913, S. 998. Leistungsfaktor bei Drehstrom (219) durch Doppelmeßgerät, ETZ 1921, S. 149.

(232) Frequenz. Die Frequenz findet man am direktesten aus der Drehzahl der erzeugenden Wechselstrommaschine. Ist die Maschine nicht zugänglich, so kann man die Umläufe eines kleinen synchronen Hilfsmotors zählen. Die Drehzahl kann durch geeignete Tachometer gemessen werden.

Sehr verbreitet sind die auf dem Resonanzprinzip beruhenden Apparate (Hartmann & Braun), ETZ 1901, S. 9 und 1904, S. 44, Vibrationstachometer nach Frahm, Siemens & Halske; s. auch (263). Eine Reihe von Stahlzungen sind auf verschiedene Töne abgestimmt, deren Schwingungszahlen um eine konstante Zahl fortschreiten. Ein vom Wechselstrom erregter Elektromagnet steht dem Zungenkamm gegenüber und bringt die Zunge gleicher Schwingungszahl zum Schwingen.

Martienssen benutzt folgende Anordnung: Eine Maschinenspannung wird durch eine eisengeschlossene kleine Drosselspule und einen dahinter geschalteten Kondensator geschlossen; dann ist bei richtiger Wahl der Abmessungen die Klemmenspannung der Drosselspule innerhalb eines gewissen Bereiches nahezu unabhängig von der Maschinenspannung, dagegen steigt sie in demselben Spannungsbereich proportional mit der Frequenz. Ein Spannungsmesser an der Drosselspule kann somit nach Frequenzen geeicht werden. Der Apparat hat den Vorzug auch als Registrierapparat gebraucht werden zu können. (Siemens & Halske, ETZ 1910, S. 204. Keinath, ETZ 1916, S. 271).

Eine Stromverzweigung nach Art der Wheatstoneschen Brücke benutzt die Westongesellschaft ETZ 1912, S. 1149, Gruhn, ETZ 1914, S. 39. Schering und Engelhardt, Zschr. f. Instr. 1920, S. 87. Velandier, ETZ 1922, S. 352. Zusammenfassender Bericht über Frequenzmesser s. Zschr. f. Feinmechanik Bd. 23, S. 67, 86, 94, 101, 111, 118 und Zschr. f. Fernmeldetechnik 1921, S. 5, 19, 105, 121. Auf einer Resonanzmethode beruht der direkt zeigende Frequenzmesser von Clincker, ETZ S. 1235, 1428.

Prüfung von Spannungs-, Strom- und Leistungsmessern.

(233) α) Gleichstrom. Für die Spannungsmesser und Spannungskreise der Leistungsmesser braucht man eine vielzellige Akkumulatoren-Batterie von kleiner Kapazität. Durch einen geeigneten Vorschaltwiderstand (Ruhstrat) stellt man den Zeiger des Apparates genau auf den Teilstrich ein, den man zu prüfen wünscht, und mißt die zugehörige Spannung mit dem Kompensator (200, 201). Strommesser und Hauptstromspulen von Leistungsmessern schaltet man mit einem passenden Normalwiderstand in Reihe, an dessen Potentialklemmen man mittels Kompensators den Spannungsabfall und damit den Strom mißt.

Man prüft zweckmäßig zuerst eine Reihe von Punkten bei wachsendem Ausschlag, läßt den Apparat eine Stunde lang mit maximaler Last eingeschaltet, wiederholt danach die erste Reihe in umgekehrter Reihenfolge und beobachtet die Nulllage des unbelasteten Apparates. Hierdurch zeigt sich der Einfluß von elastischen Nachwirkungen der Federn und von der Stromwärme. Man muß den Einfluß des Erdfeldes bzw. fremder magnetischer Felder (Zuleitungen) beachten.

(234) β) Wechselstrom. Als Stromquelle ist am meisten eine Drehstromdoppelmaschine (Ph.-Techn. Reichsanstalt, Zschr. Instrk. Bd. 22, S. 124, 1902; Stern, ETZ 1902, S. 774; Hans Boas, ETZ 1912, S. 853) zu empfehlen. Die eine der Drehstrommaschinen ist normal gebaut, die andere dagegen hat einen mit Zahnstange und Trieb drehbaren Ständer. Bei der Prüfung von Leistungsmessern speist die eine Maschine den Spannungskreis, die andere den Hauptstromkreis des Leistungsmessers. Die gewünschten Spannungen und Ströme werden durch Zwischenschalten geeigneter Transformatoren erzeugt; die Regulierung erfolgt am bequemsten durch die Erregungen der Maschinen. Die Phasenverschiebung wird durch Verstellen des beweglichen Ständers auf den gewünschten Wert gebracht. Für Spannungs- und Leistungsmesser sind elektrometrische Methoden (224, 225),

für Strommesser Prüfung durch Thermogalvanometer mit Nebenschlüssen (Schering, 226) zu empfehlen. Hingang, Dauereinschaltung, Rückgang wie unter (233).

(235) Prüfung eines Stromwandlers. In den primären und sekundären Strom des Stromwandlers *Str. W.* (Abb. 100) wird je ein Normalwiderstand N_1 bzw. N_2 eingeschaltet. Um die nach Größe und Phase verschiedenen Spannungen $i_1 N_1$ und $i_2 N_2$ miteinander vergleichen zu können, wird N_1 durch die Parallelwiderstände $r_1 + r_2$ überbrückt und durch Kondensator C die Phase der Stoßstelle von r_1 und r_2 verschoben. Man macht nun die Spannungen an r_1 und N_2 nach Größe und Phase einander gleich; diese Gleichheit wird mit dem Vibrationsgalvanometer VG. festgestellt. Gleichgewichtsbedingung ist:

$$I_1/I_2 = \frac{N_2(r_1 + r_2)}{N_1 r_1} \quad \text{und}$$

$$\text{tg}(I_1/I_2) = \omega C r_2^2 / (r_1 + r_2)$$

Schering und Alberti, Arch. f. El. Bd. 2, S. 263.

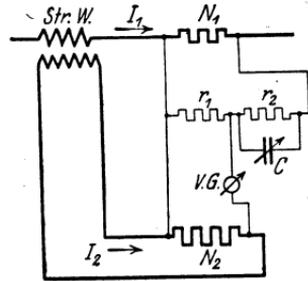


Abb. 100. Prüfung eines Stromwandlers.

Aufnahme von Stromkurven und deren Analyse.

Die Aufnahme einer periodischen Stromkurve kann experimentell entweder in der Weise erfolgen, daß man zunächst aus einer Reihe von Perioden nur eine einzelne Phase herausgreift, den Augenblickswert des Stromes in dieser Phase mißt und dann zu anderen Phasen übergeht, bis die Kurve punktförmig aufgenommen ist, oder es wird der ganze Verlauf der Kurve innerhalb einer jeden Periode aufgenommen.

(236) A. Punktförmige Aufnahme nach Joubert. Auf die Achse der Maschine, welcher der aufzunehmende Wechselstrom entnommen wird, ist eine Scheibe aus isolierendem Material aufgesetzt, in deren Rand an einer Stelle des Umfanges ein wenige mm breiter Metallstreifen eingesetzt ist. Eine feststehende Bürste, die auf dem Rande schleift, macht dadurch jedesmal in derselben Phase Kontakt mit dem Metallstreifen. Werden Streifen und Bürste mit der aufzunehmenden Spannung und einem Kondensator verbunden, so erfährt der Kondensator eine dem betreffenden Augenblickswert der Spannung proportionale Ladung, die man durch Entladen durch ein ballistisches Galvanometer messen kann. Setzt man die Bürste auf einen mit der Maschine konzentrischen Teilkreis, so kann man durch langsames Drehen dieses Kreises die Augenblickswerte für jede einzelne Phase messen. Ist die Maschinenachse nicht zugänglich, so wird der Kontaktmacher auf die Achse eines von derselben Wechselstromquelle getriebenen Synchronmotors gesetzt.

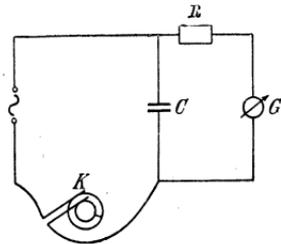


Abb. 101. Kurvenaufnahme mit Kontaktmacher.

Die aufzunehmende Wechselspannung wird durch den Kontaktmacher K , durch ein Galvanometer G und einen Widerstand R geschlossen. Parallel zu Widerstand und Galvanometer ist ein Kondensator C geschaltet (Abb. 101). Während des Kontaktes lädt sich der Kondensator, um sich gleich darauf durch das Galvanometer zu entladen; die periodischen Stromstöße verursachen im Galvanometer einen dem Augenblickswert der Spannung proportionalen konstanten Ausschlag. Bei der Aufnahme von niedrigen Spannungen (z. B. Spannungsabfall an einem Normalwiderstand) wird die Methode leicht unzuverlässig.

Nach dieser Methode sind vollständige Kurvenapparate konstruiert von R. Franke (ETZ Bd. 20, S. 802, 1899 und Zeitschr. Instrk. Bd. 21, S. 11, 1901, Land- und Seekabelwerke, Köln-Nippes und von Hospitalier (Zeitschr. Instrk. Bd. 12, S. 166, 1902).

(237) B. Stetige Aufnahme. 1. Braunsche Röhre. Eine Vakuumröhre erhält an einem Ende eine Erweiterung, in der ein fluoreszierender Schirm angebracht wird. Die Kathodenstrahlen erzeugen auf letzterem einen hellen Fleck, der Schwingungen ausführt, wenn eine von dem zu untersuchenden Wechselstrom durchflossene Spule neben der Röhre angebracht wird; die Kraftlinien der Spule sollen den Weg der Kathodenstrahlen kreuzen. Die Bewegungen des Flecks kann man im rotierenden Spiegel betrachten. Strom- und Spannungsspule gleichzeitig liefern Lissajoussche Figuren, aus denen man die Phasendifferenz bestimmen kann. (Wied. Ann. Bd. 60, S. 552.) Betr. photographischer Darstellung vgl. Zenneck (Wied. Ann. Bd. 69, S. 838, 1899) und Wehnelt und Donath (Wied. Ann. Bd. 69, S. 861, 1899). Rogowski, Arch. f. El. 9. S. 115. Benzinger, Phys. Zschr. 22, S. 491.

2. Glimmlichtoszillograph (Gehrcke, Zeitschr. Instrk. Bd. 25, S. 33, 278, 1905). Eine Entladungsröhre wird mit Stickstoff von 7—8 mm Druck gefüllt. Die Elektroden bestehen aus zwei schmalen etwa 10 cm langen Nickelblechen, die in derselben Ebene in der Achse der Röhre liegen. Geht ein Strom durch die Röhre, so überzieht sich die Kathode mit einer Lichthaut, und zwar ist die Länge der Lichthaut, vom freien Ende des Bleches an gemessen, proportional der Stromstärke, die durch die Röhre fließt. Die Einstellung der Lichthaut folgt momentan; betrachtet man also in einem rotierenden Spiegel die Röhre, die von einem Wechselstrom durchflossen wird, so erblickt man seine Kurvenform. Die Röhre wird in der drahtlosen Telegraphie vielfach zur Messung der Frequenz gebraucht.

3. Oszillographen sind Galvanometer mit außerordentlich kleinen beweglichen Systemen. Ist die Eigenfrequenz dieser Systeme sehr groß gegen die Frequenz des aufzunehmenden Wechselstromes, so ist der Ausschlag des Galvanometers in jedem Augenblick proportional dem jedesmaligen Augenblickswert des Wechselstromes. Literatur s. Zeitschr. Instrk. Bd. 21, S. 239, 1901; Bd. 23, S. 63, 1903.

a) Nadeloszillographen. Zwischen den messerförmigen Polen eines starken Magnetes oder Elektromagnetes befindet sich das bewegliche System in Form eines schmalen dünnen Eisenbandes, das entweder in Spitzen gelagert oder zwischen zwei Backen ausgespannt ist. Das Eisenband, das durch den Magnet eine Quermagnetisierung erfährt, erhält durch zwei vom Wechselstrom durchflossene Spulen, die dicht an das Eisenband herangeschoben werden, eine drehende Ablenkung. Mittels eines winzigen Spiegels (1 mm²) werden die Schwingungen des beweglichen Systems sichtbar gemacht. Ein Nachteil dieser Oszillographen besteht darin, daß durch die ablenkenden Spulen eine Selbstinduktivität in den Stromkreis eingefügt wird, der Vorzug in der einfachen Behandlungsweise gegenüber den unter b) genannten. Die Eigenschwingungen des beweglichen Systems können nach Blondels Angabe bis auf 40 000 Per/s gesteigert werden (Blondel).

b) Bifilare Oszillographen. Zwischen den Polen eines kräftigen Magnetes oder Elektromagnetes ist ein schmales Kupferband hin- und hergezogen, so daß die beiden Teile der Schleife parallel und dicht nebeneinander liegen. Durch das Band wird der aufzunehmende Wechselstrom geschickt; der Apparat ist also ein Spulengalvanometer mit nur einer Windung. Durch ein Spiegelchen (0,5 mm²), das quer über beide Bänder geklebt ist, werden die Schwingungen der Bänder sichtbar gemacht. Über einen bifilaren Oszillographen für Hochspannungsmessungen s. Ramsay, Electrician, Bd. 57, S. 884, 1909.

Über Oszillographen mit bedeutend größeren Systemen s. Abraham, Zeitschr. Instrk. Bd. 18, S. 30, 1898, ETZ 1901, S. 207. Über einen Projektionsapparat nach diesem Prinzip s. Journ. de phys., Bd. 8, S. 265, 1909.

Über die Aufnahme von Hochfrequenzströmen s. Arch. f. El. Bd. 5, S. 314 und Bd. 6, S. 161.

(238) Analyse von Wechselstromkurven. Vgl. (132). Eine Wechselstromkurve, welche unterhalb der Abszissenachse ebenso verläuft, wie oberhalb derselben, im übrigen aber eine beliebige Form hat, kann mathematisch durch eine Fouriersche Reihe dargestellt werden in der Form: $A_1 \sin \omega t + A_3 \sin 3 \omega t + A_5 \sin 5 \omega t + \dots + B_1 \cos \omega t + B_3 \cos 3 \omega t + B_5 \cos 5 \omega t + \dots$ oder $I_1 \sin (\omega t + \alpha_1) + I_3 \sin (3 \omega t + \alpha_3) + I_5 \sin (5 \omega t + \alpha_5) + \dots$ wobei die Amplituden mit geradzahligem Index verschwinden. (131).

Um die Fouriersche Reihe für einen Wechselstrom zu bestimmen, kann man entweder die nach (236, 237) aufgenommenen Kurven auf mathematischem Wege analysieren, oder man kann die Koeffizienten der Reihe direkt experimentell messen.

Für die mathematische Analyse kommen in der Praxis folgende Methoden in Frage.

a) Die Methode von Fischer-Hinnen (ETZ 1901, S. 396). Enthält die Reihe nur die ungeradzahigen Oberschwingungen, so grenzt man auf der Abszissenachse eine einer vollen Periode entsprechende Länge l ab, teilt diese nacheinander in $n=3, 5, 7, 9, \dots$ Teile und entnimmt die zugehörigen Ordinaten der Wechselstromkurve. Dann wird für jedes n der Mittelwert e_n der Ordinaten (Vorzeichen berücksichtigen) gebildet. Danach wird eine zweite Reihe von n Mittelwerten in derselben Weise genommen, nachdem der Anfang der Periode um den Betrag $l/4 \cdot n$ verschoben worden ist; die so entstehenden Mittelwerte werden mit e'_n bezeichnet. Dann ist:

$$I_n = \sqrt{e_n^2 + e'_n{}^2} \quad \sin \alpha_n = \frac{e_n}{\sqrt{e_n^2 + e'_n{}^2}} \quad \text{für } n=7, 9, 11, 13, 15$$

und

$$\begin{aligned} I_3 \sin \alpha_3 &= e_3 - e_9 - e_{15} & I_5 \sin \alpha_5 &= e_5 - e_{15}, \\ I_3 \cos \alpha_3 &= e_3' + e_9' - e_{15}' & I_5 \cos \alpha_5 &= e_5' + e_{15}', \\ I_1 \sin \alpha_1 &= e_1 - e_3 - e_5 - e_7 - e_{11} - e_{13} + e_{15}, \\ I_1 \cos \alpha_1 &= e_1' - e_3' - e_5' - e_7' - 2e_9' - e_{11}' - e_{13}' - e_{15}'. \end{aligned}$$

Man kann diese Methode dahin vervollständigen, daß man l in $n=6, 10, 14, \dots$ Teile teilt, das Vorzeichen der zu den früheren neu hinzutretenden Ordinaten umkehrt, und im übrigen genau so rechnet, wie vorher (s. Encycl. der math. Wissensch. Teubner 1904. Bd. II, 1, S. 652 und S. Thompson, Proc. Phys. Soc. 23, S. 334, 1911). Ferner: Beattie, Electrician, Bd. 67, S. 326, 370, 847, 1911.

b) Methode von Runge. ETZ 1905, S. 247. Man teilt eine halbe Welle in 12 gleiche Teile und errichtet in den 11 Teilpunkten die Ordinaten, deren Längen mit $a_1 a_2 \dots a_{11}$ bezeichnet werden mögen. Dann bildet man:

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{1}{2} (a_1 + a_{11}) & m_2 &= \frac{1}{2} (a_2 + a_{10}) \dots m_6 = a_6, \\ n_1 &= \frac{1}{2} (a_5 - a_7) & n_2 &= \frac{1}{2} (a_4 - a_8) \dots n_6 = 0. \end{aligned}$$

Daraus findet man:

$$\begin{aligned} A_1 &= 0,0863 m_1 + 0,1667 m_2 + 0,2358 m_3 + 0,2887 m_4 + 0,3220 m_5 + 0,1667 m_6, \\ A_3 &= 0,2358 m_1 + 0,3333 m_2 + 0,2358 m_3 && - 0,2357 m_5 - 0,1667 m_6, \\ A_6 &= 0,3220 m_1 + 0,1667 m_2 - 0,2357 m_3 - 0,2886 m_4 + 0,0863 m_5 + 0,1667 m_6, \\ A_7 &= 0,3220 m_1 - 0,1667 m_2 - 0,2357 m_3 + 0,2886 m_4 + 0,0863 m_5 - 0,1667 m_6, \\ A_9 &= 0,2358 m_1 - 0,3333 m_2 + 0,2357 m_3 && - 0,2358 m_5 + 0,1667 m_6, \\ A_{11} &= 0,0863 m_1 - 0,1667 m_2 + 0,2358 m_3 - 0,2887 m_4 + 0,3220 m_5 - 0,1667 m_6. \end{aligned}$$

Setzt man in diese Formeln an Stelle der m die entsprechenden n , so erhält man $B_1, -B_3, B_5, -B_7, B_9, -B_{11}$.

Dieselbe Methode kann zur Berechnung von je 36 Koeffizienten angewandt werden (vgl. L o p p é (Ecl. él. Bd. 16, S. 525), R u n g e, Zeitschr. f. Math. u. Phys. 1902, S. 443, P r e n t i s s, Phys. Rev. Bd. 15, S. 257, 1902). Weitere Methoden ähnlicher Art bei S c h l e i e r m a c h e r (ETZ 1910, S. 1246). P i c h e l m a y e r u. S c h r u t k a, ETZ Bd. 33, S. 129, 1912. H a k, ETZ 1921, S. 484.

c) Harmonische Analysatoren sind Apparate, welche — beruhend auf der Formel für die Koeffizienten einer Fourierschen Reihe — die Analyse der Kurven mechanisch (nach Art der Planimeter) ausführen; dahin gehören die Apparate von L o r d K e l v i n (Proc. Roy. Soc., London, Bd. 24, S. 266, 1876), C o r a d i (vgl. H e n r i c i, Phil. Mag., Bd. 38, S. 110, 1894) M i c h e l s o n und S t r a t t o n (Amer. Journ. of Science Bd. 5, S. 1, 1898; Zschr. Instrk. 1898. S. 93). M a d e r, (ETZ Bd. 30, S. 847, 1909).

d) Über die Resonanzmethode s. P u p i n (Amer. Journ. of Sc. 1894, S. 379, 473), A r m a g n a t (Journ. de phys. (4) Bd. 1, S. 345, 1902), R o t h (Arch. f. El. Bd. 6, S. 359, 388).

L i t e r a t u r: O r l i c h, Aufnahme und Analyse von Wechselstromkurven. Braunschweig 1906. — H a u s r a t h, Helios 1912. — G a l l e, Die mathematischen Instrumente. Teubner. — G r i x, Helios 1921, S. 145.

Magnetische Messungen.

(239) Bestimmung eines magnetischen Momentes mit dem Magnetometer.

Der zu untersuchende Magnet wird in dem großen Abstände r von einer Bussole mit Kreisteilung oder Spiegelablesung in der ersten oder zweiten Hauptlage (S. 35) aufgestellt und die Ablenkung der Bussole beobachtet, wenn man den Magnet um 180° dreht; die Hälfte dieses Winkels sei $= \varphi$. Hierbei wirkt auf die Nadel in erster Hauptlage einmal das vom Magnet mit dem Moment \mathfrak{M} ausgeübte Drehmoment $2\mathfrak{M}' \cos \varphi / r^3$ (34), andererseits das Drehmoment der senkrecht zur Nadel gerichteten Komponente der Horizontalstärke h des Erdmagnetismus $\mathfrak{M}' h \sin \varphi$. Da die Nadel unter der Wirkung beider Drehmomente in Ruhe bleibt, müssen diese gleich sein, und es folgt daraus für die erste Hauptlage $\mathfrak{M} = \frac{1}{2} \cdot r^3 h \operatorname{tg} \varphi$, für die zweite entsprechend $r^3 h \operatorname{tg} \varphi$. Sollen die Formeln auf 1 % genau sein, so muß der Abstand r sechsmal so groß sein wie die Länge des Magnetes; ist r nur dreimal so groß wie diese Länge, so beträgt der Fehler etwa 4 %. Genauere Formeln s. K o h l r a u s c h, Praktische Physik, oder G u m l i c h, Leitfaden der magnet. Messungen.

Bei langen Stäben kann man eine andere Methode verwenden. Im Abstand r von der Bussole wird der Stab von der Länge l senkrecht aufgestellt, und zwar der eine Pol in der Höhe der Nadel, der andere entfernt von der letzteren; man verschiebt den Magnet in der Achsenrichtung, bis der Ausschlag φ ein Maximum wird. Dann ist $\mathfrak{M} = 5/6 \cdot l r^2 h \operatorname{tg} \varphi$. Soll die Formel auf 1 % genau sein, so darf der Abstand r nicht mehr als $1/5$ der Magnetlänge betragen; ist $r = 1/3$ der Magnetlänge, so beträgt der Fehler etwa 5 %.

Bei der Untersuchung von Eisenstäben in stromdurchflossener Spule hat man die Wirkung der Magnetisierungsspule zu berücksichtigen; dies geschieht am besten durch Ausgleichung, indem man eine vom magnetisierenden Strome durchflossene Hilfsspule der Bussole so gegenüberstellt, daß sie die Wirkung der Magnetisierungsspule ohne Eisenstab genau aufhebt.

Astasiertes Magnetometer. Bei der Messung kurzer Stäbe mit kleinem magnetischen Moment muß man, da man den Stab der Magnetometernadel nicht beliebig nähern darf, zur Erzielung hinreichend großer Ausschläge φ die erdmagnetische Richtkraft h schwächen, entweder mittels geeignet angebrachter Hilfsmagnete oder besser mittels einer ringförmigen stromdurchflossenen Spule, deren Ebene in den magnetischen Meridian gestellt wird und die die Magnetometernadel aufnimmt. Hiermit läßt sich durch bloße Regulierung des Stroms jede beliebige Empfindlichkeit (nötigenfalls auch geringere!) herstellen (G u m l i c h, Leitfaden).

Störungsfreies Torsionsmagnetometer. Je größer die Empfindlichkeit, desto größer auch die Störungen durch Erdströme, Stromschleifen, elektrische Bahnen usw.; diese vermeidet das störungsfreie Torsionsmagnetometer von Kohlrausch und Holborn. Hier ist die Magnetnadel ersetzt durch ein System von zwei genau gleich starken, durch eine leichte Stange von etwa 2 m Länge verbundene Magnetstäbchen, die entgegengesetzt gerichtet sind, so daß die Erdriechkraft überhaupt nicht wirkt; sie wird ersetzt durch die Torsionskraft des dünnen Aufhänge drahtes aus Platiniridium, mit dem das gegen Luftströmungen geschützte System an der Zimmerdecke befestigt ist. Aus dem beobachteten Ablenkungswinkel φ erhält man das Moment \mathfrak{M} mittels der Formel $\mathfrak{M} = C \cdot \frac{1}{2} \cdot r^3 \varphi (1 + \frac{1}{2} \varphi^2 + \dots)$. Hierin bedeutet C eine Konstante, die von der Torsionskraft des Fadens abhängt und in ähnlicher Weise mittels eines stromdurchflossenen Hilfskreises zu ermitteln ist, wie beim gewöhnlichen Magnetometer. Da der Probekörper nicht nur auf den unteren, sondern in geringem Maße auch auf den oberen Magnet wirkt, so ist eine von der Beschaffenheit des Instruments und dem Abstand des Probekörpers abhängige Korrektion anzubringen. Die Ruhelage ist um so besser, je weiter die Störungsquelle, deren Stärke eine geringere Rolle spielt, vom Instrument entfernt ist (Kohlrausch und Holborn, Ann. d. Phys. R. 4, Bd. 10, S. 287; 1903; Gumlich, Leitfaden).

(240) Die Stärke der Magnetisierung \mathfrak{J} wird gefunden, indem man das nach dem Vorigen bestimmte Moment des Stabes bzw. eines Ellipsoids durch $\frac{5}{6}$ des Volumens bzw. durch das ganze Volumen dividiert.

Die zugehörige Feldstärke \mathfrak{H} ergibt sich nach (39) aus $\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' - N\mathfrak{J}$. Man kann somit nach dem magnetometrischen Verfahren auch absolute Magnetisierungskurven bestimmen, genau jedoch nur mit Rotationsellipsoiden, bei denen die Magnetisierung im Innern gleichmäßig und N (vgl. Tab. S. 42) konstant ist, was bei kürzeren Stäben nicht der Fall ist. Bei diesen gilt die Formel für \mathfrak{H} genau nur dann, wenn \mathfrak{J} Null ist, d. h. bei der Koerzitivkraft. Diese für die Charakterisierung des Materials so wichtige Größe läßt sich also mit dem Magnetometer auch an Stäben von beliebiger Gestalt genau und rasch folgendermaßen ermitteln:

(241) Bestimmung der Koerzitivkraft mit dem Magnetometer: Man magnetisiert den Probestab in der Spule reichlich hoch (bei weichem Material bis zu $\mathfrak{H} = 150$, bei hartem bis zu mindestens $\mathfrak{H} = 300$), läßt den Strom auf Null abnehmen, kommutiert ihn und läßt ihn so lange wieder anwachsen, bis der Ausschlag der scheinbaren Remanenz verschwunden ist, das Magnetometer also wieder auf Null steht. Aus der hierzu nötigen Stromstärke IA und der Spulenkonstante K ergibt sich der Wert der Koerzitivkraft zu $\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' = 0,4\pi KI$ (36).

(242) Bestimmung der Horizontalstärke \mathfrak{h} . Nur bei ungenaueren Messungen kann man \mathfrak{h} einer Tafel (Deutsche Seewarte) entnehmen, bei genaueren muß man es bestimmen, am besten und einfachsten mit Hilfe eines elektrischen Stromkreises von großem Radius ρ mit einer oder wenigen (w) Windungen, etwa einer Tangentenbussole. Dieser wird so aufgestellt, daß seine Ebene in den magnetischen Meridian fällt und das in seinem Mittelpunkt errichtete Lot die Mitte des Magnetometermagnets trifft. Ein Strom von IA erzeugt dort ein Feld $F_1 \perp \mathfrak{h}$, das die Ablenkung φ_1 hervorbringen möge; dann gilt $F_1 = \mathfrak{h} \cdot \text{tg } \varphi_1$;

hieraus folgt \mathfrak{h} ; dabei ist $F_1 = \frac{0,2\rho^2 \pi w \cdot I}{\sqrt{(r^2 + \rho^2)^3}}$.

(243) Messung einer Kraftlinienmenge mit dem Schwingungsgalvanometer. Eine bequeme und verbreitete Methode der magnetischen Untersuchung des Eisens besteht darin, daß man einen Probestab durch den Strom magnetisiert und die erzeugte oder bei Stromunterbrechung verschwindende Kraftlinienmenge mit einer Prüfspule mißt; das Nähere s. (244, 245). Die entstehende oder ver-

schwindende Kraftlinienmenge Φ bringe am Schwingungsgalvanometer den Ausschlag α_1 hervor, dann gilt

$$\Phi = \frac{R_2}{w_2} \cdot g \cdot \frac{t}{\pi} \cdot \alpha_1 \cdot k^{\frac{1}{\pi} \arctg \frac{\pi}{\delta}},$$

worin R_2 und w_2 Widerstand des ganzen sekundären Kreises und Windungszahl der Prüfspule, t die Dauer der Halbperiode der Nadel im ungedämpften Zustand, k ihr Dämpfungsverhältnis (153); $\delta = \log \text{nat } k$, g eine Galvanometerkonstante. Um die umständliche Rechnung zu vermeiden, mißt man mit demselben Galvanometer den Induktionsstoß aus einer Normalspule, d. i. einer langen Magnetisierungsspule von K Windungen auf 1 cm und einer genau bekannten Windungsfläche S ; diese umgibt man mit einer kurzen Sekundärspule von w_s Windungen, welche mit dem Galvanometer zu einem Kreis vom Widerstand R_s verbunden ist. Kommutiert man den primären Strom I , so durchfließt das Galvanometer die Elektrizitätsmenge $8\pi K I S w_s / R_s$, welche den Ausschlag α_2 hervorruft; es ist dann

$$\frac{8\pi K I S w_s}{R_s} = g \cdot \frac{t}{\pi} \alpha_2 \cdot k^{\frac{1}{\pi} \arctg \frac{\pi}{\delta}}$$

und hieraus (204)

$$\Phi = \frac{R_2}{R_s} \cdot \frac{w_s}{w_2} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot 8\pi K S \cdot I = C \cdot I \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}.$$

Hierbei ist darauf zu achten, daß in beiden Fällen der Schließungswiderstand des Galvanometers der gleiche ist, da sich sonst das Dämpfungsverhältnis ändert.

Die Normalspulen sind sehr sorgfältig herzustellen und auszumessen; sie können von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeicht werden. Man beachte, daß in all diesen Formeln die elektrischen Größen im absoluten (CGS) Maße einzusetzen sind.

(244) Messung der Feldstärke §. Mit der Prüfspule, nach dem Vorigen. Die als sekundäre Spule benutzte Drahtrolle wird in dem zu messenden Felde aufgestellt, so daß ihre Windungsebene zur Richtung des Feldes senkrecht steht. Das Feld wird nun plötzlich erzeugt, aufgehoben oder um 180° gedreht; oder die Prüfspule wird rasch aus dem Felde gezogen oder darin um 180° gedreht. Man erhält wie in (243) Φ , die Gesamtmenge der durch die Spule gehenden Kraftlinien, welche man noch durch den Spulenquerschnitt S zu dividieren hat, um ξ zu erhalten.

Mit dem magnetischen Spannungsmesser. Der kleine Apparat, der auf dem Satz beruht, daß das Linienintegral der magnetischen Feldstärke Null oder $4\pi w I$ ist, je nachdem der Integrationsweg keine oder $w I$ AW umschließt, besteht aus einem biegsamen Eisenkern von gleichmäßigem Querschnitt, dessen Bewicklung aus zahlreichen Windungen mit dem Schwingungsgalvanometer verbunden ist. Die Spule wird entweder aus dem zu messenden Feld herausgezogen oder das Feld kommutiert. Der Galvanometerausschlag entspricht entweder direkt dem zu messenden Feld, falls der Spannungsmesser keine Magnetisierungswindungen umschließt, oder, wenn dies der Fall ist, der Differenz zwischen dem scheinbaren, durch die Durchflutung gegebenen und dem wahren Feld, also der sogenannten Scherung. Der leicht zu eichende Apparat kann auch da Verwendung finden, wo andere Methoden versagen, z. B. bei der Messung eines Teiles des magnetischen Kreises einer Dynamomaschine (Rogowski und Steinhaus, Arch. f. Elektr. Bd. 1, S. 141).

Mit der Wismutspirale. Ein gepreßter und zur flachen Spirale gewundener Wismutdraht wird, mit der Windungsebene senkrecht zur Richtung der Kraftlinien, in das Feld gebracht. Der Draht ändert im Felde seinen Widerstand; diese Änderung muß für jede Spirale besonders ermittelt werden.

Eisenuntersuchung.

(245) **Hystereseschleife.** A. Am Probestab nach der Jochmethode. 1. Mit dem Schwingungsgalvanometer. Von der zu untersuchenden Eisensorte wird ein Probestab in genau zylindrischer Form (oder ein Dynamoblech-Bündel) vom Querschnitt q und der Länge l hergestellt; er wird in seinem mittleren Teil möglichst dicht umschlossen von der Prüfspule (Windungszahl w_2) und umgeben mit der Magnetisierungsspule (Windungszahl w_1 , Länge l_1), die so zu bemessen ist, daß ein Strom I_1 , der $\mathfrak{H} = 0,4 \pi w_1 I_1 / l_1$ zu 300 macht, noch keine starke Erwärmung hervorruft. Der Probestab wird in ein Schlußstück (Joch) aus Eisen mit möglichst hoher Anfangspermeabilität (246) eingesetzt, welches seine beiden Enden magnetisch möglichst gut verbindet (Klemmbacken oder besser noch Kugelkontakte); die Form des Joches ist nicht wesentlich; sein Querschnitt soll groß, die Länge des Kraftlinienweges klein sein; der Querschnitt (oder die Summe der parallel geschalteten Querschnitte) q' möglichst größer als 200 q . Die Magnetisierungsspule wird mit einer Sammelbatterie, Regulierwiderständen, Strommesser und Stromwender zu einem Stromkreis verbunden, die Prüfspule mit dem Schwingungsgalvanometer nach (243). Man beginnt mit einem Strom, der \mathfrak{H} etwa zu 150 für Eisen, 300 für Stahl macht, und mißt die Kraftlinienmengen, welche induziert werden, wenn man den magnetisierenden Strom um geeignete Beträge (ohne Stromunterbrechung) plötzlich ändert. Ist der Strom Null geworden, so wechselt man seine Richtung und läßt ihn zu dem vorigen höchsten Betrag wieder ansteigen, dann wieder zu Null abnehmen, wechselt die Richtung und läßt ihn wieder bis zum höchsten Betrag wachsen. Für jeden Schritt in der Widerstandsänderung erhält man einen Ausschlag, der der Änderung der Kraftlinienmenge $\Delta \Phi$ proportional ist; es ist jedoch darauf zu achten, daß die einzelnen Sprünge nur klein sein dürfen, da durch große Sprünge die Form der Magnetisierungskurve nicht unbedeutend beeinflusst werden kann. Von der gefundenen Kraftlinienmenge muß man genau genommen diejenige Menge abziehen, die auf den Raum zwischen der Prüfspule und dem Eisen entfällt; umschlingt die Prüfspule den Querschnitt q_1 , und ist der Querschnitt des Eisens q , so ist abzuziehen $(q_1 - q) \Delta \mathfrak{H}$; bei mäßigen Feldstärken kann jedoch, wenn die Prüfspule den Stab eng umschließt, diese Korrektur meist vernachlässigt werden. Summiert man alle (berichtigten) $\Delta \Phi$ zwischen zwei entgegengesetzt gleichen höchsten Stromwerten, so ist die Hälfte davon die höchste erzielte Kraftlinienmenge. Aus der Stromstärke I erhält man $\mathfrak{H} = 0,4 \pi K I$ (36), aus der Kraftlinienmenge Φ die Induktion $\mathfrak{B} = \Phi / q$. Die Beobachtungen liefern je einen Zuwachs (Abnahme) von \mathfrak{B} für eine Vergrößerung (Verkleinerung) von \mathfrak{H} und sind demgemäß aufzutragen. Man erhält eine Kurve wie in Abb. 18, S. 37. Diese Kurve ist nun allerdings noch keine absolute Magnetisierungskurve, wie sie ein gleichmäßig bewickelter, geschlossener Ring oder ein Ellipsoid liefern würde, da beim Joch in den Weg der Induktionslinien noch Widerstände durch die Jochteile selbst, hauptsächlich aber durch die Luftschlitze eingeschaltet sind, deren Überwindung eine gewisse magnetische Spannung erfordert. Die mit dem Joch erhaltene Kurve hat daher eine zu gestreckte Gestalt und muß mit Hilfe einer Scherung auf die absolute Kurve reduziert werden.

Zur Bestimmung dieser Scherungswerte dreht man einen im Joch untersuchten Stab zum Ellipsoid ab und untersucht dieses mit dem Magnetometer (239). Die Differenzen zwischen entsprechenden Werten der so gewonnenen absoluten Kurve und der Jochkurve geben die Verbesserungen für die beim Joch beobachteten Werte der Feldstärke; man trägt sie am besten graphisch als sogenannte Scherungskurve auf. Ist man nicht in der Lage, magnetometrische Beobachtungen mit dem Ellipsoid durchzuführen, so untersucht man einen Stab im Joch, dessen absolute Kurve bekannt ist, und verfährt entsprechend; die Reichsanstalt liefert oder untersucht derartige Stäbe.

Da die Scherung in hohem Maße von der Natur des zu untersuchenden Materials abhängt, so kann man nicht dieselbe Scherungskurve für weiches Eisen (Stahlguß,

Schmiedeeisen, Dynamoblech), Gußeisen, weichen und harten Stahl verwenden; man bedarf vielmehr für jede dieser Arten mindestens einer besonderen Scherungskurve. Bei genaueren Messungen empfiehlt es sich, für jeden Stab die wahre Koerzitivkraft noch gesondert mit dem Magnetometer zu bestimmen (241). Kennt man sie, so kennt man auch die Jochscherung für den Punkt der Koerzitivkraft genau und kann die Scherungskurve in geeigneter Weise durch diesen Punkt hindurchlegen (Gumlich und Schmidt, ETZ 22, S. 695, 1901). Derartige Scherungskurven sind für jeden auf dem Jochprinzip beruhenden Apparat notwendig.

2. Mit dem doppelten Schlußjoch (Ewing): Um den Einfluß des Jochwiderstandes zu verringern, kann man zwei lange, dünne, mit Primär- und Sekundärspule versehene Stäbe aus gleichem Material verwenden, welche möglichst dicht nebeneinander gelagert und durch zwei kurze und dicke Jochstücke verbunden werden (vgl. auch 3 und 4). Der Widerstand der Luftschlitze zwischen Stab und Joch wird gering, wenn die konisch zugespitzten Stäbe in eine konische Bohrung der Joche passen und mit einer Schraube festgezogen werden. (Kapp, ETZ 1908, S. 833); es muß aber hier, wie bei allen Befestigungsarten von Stäben im Joch, dafür gesorgt werden, daß die Stäbe keinerlei Biegung oder Spannung erleiden; dies kann erheblich größere Fehler verursachen, als zu schwaches Festklemmen.

3. In der magnetischen Brücke (Holden, El. World Bd. 24, S. 617; Ewing, Electrician Bd. 37, S. 41, 115). Zwei zu vergleichende Stäbe, ein Normalstab und ein gleich dicker Stab aus dem zu untersuchenden Eisen, werden durch zwei kräftige Joche zu einem magnetischen Kreis verbunden; jeder Stab ist mit einer Magnetisierungsspule umgeben. Auf den beiden Jochen steht die magnetische Brücke, ein eiserner Bogen, der in der Mitte durchschnitten ist; in diesem Schlitz schwingt eine Magnetnadel, deren Nullage durch einen Richtmagnet senkrecht zur Richtung der Brücke gelegt wird. Werden die magnetischen Spannungen durch Änderung des Stromes in der einen Spule so abgeglichen, daß durch die Brücke keine Kraftlinien gehen, so sind die Kraftlinienmengen in beiden Stäben gleich; bei gleichem Querschnitt sind dann die Permeabilitäten je umgekehrt proportional den magnetischen Spannungen. — Um den hierzu erforderlichen Normalstab zu untersuchen, benutzt man nur die Joche des Apparates, nachdem man die Brücke entfernt hat. Zwei gleiche Stäbe werden eingespannt, einmal mit der freien Länge 4π cm mit Spulen von 100 Windungen und das zweite Mal mit der freien Länge 2π cm und mit Spulen von 50 Windungen. In jedem Falle wird mit dem Schwingungsgalvanometer die \mathfrak{B} - \mathfrak{H} -Kurve bestimmt; ist das zu einem gewissen \mathfrak{B} gehörige \mathfrak{H} für den ersten Fall \mathfrak{H}_1 , für den zweiten \mathfrak{H}_2 , so ist die wegen des Joches und der Stoßstellen berichtigte magnetische Kraft $2\mathfrak{H}_1 - \mathfrak{H}_2$ für \mathfrak{B} . Man erhält so die berichtigte \mathfrak{B} - \mathfrak{H} -Kurve für die beiden Normalstäbe.

4. Mit dem kompensierten Doppeljoch von Burrows (Circ. Bureau of Standards Nr. 17; 1916). Die Anordnung entspricht der von 3. Es wird versucht, durch zusätzliche Magnetisierungswindungen, welche um das Joch und um die Enden beider Probestäbe gelegt sind und einen besonderen Stromkreis bilden, die zusätzlichen Widerstände von Jochteilen und Luftspalten zu überwinden; in diesem Falle bedarf man keiner Scherung für die Feldstärke $\mathfrak{H} = 0,4\pi K I$. Ist der Zweck erreicht, dann tritt keine Streuung ein, der Induktionsfluß ist also über die ganze Länge der Stäbe konstant. Man erkennt dies mit Hilfe mehrerer, in der Mitte und in bestimmten Abständen davon angebrachter Prüfspulen, welche beide Stäbe umschließen und entweder direkt mit dem Schwingungsgalvanometer verbunden oder gegeneinander geschaltet werden, je nachdem es sich darum handelt, zwei Stäbe aus dem gleichen Material absolut zu untersuchen oder die Eigenschaften des Probestabs mit den bekannten des Normalstabs zu vergleichen.

Die Methode gibt unzweifelhaft genauere Werte, als die gewöhnliche Jochmethode mit der etwas willkürlichen Scherung, ist aber sehr verwickelt und zeit-

raubend (drei unabhängige Magnetisierungsstromkreise und mehrere Sekundärkreise!).

5. Mit dem Permeameter von Fahy, das sich im Prinzip dem Burrowschen Doppeljoch nähert (El. World Bd. 69, S. 315, 1917; Jahrb. 1917, S. 163). Es besteht aus einem I-förmigen Jochteil, an dessen wagrechte Balken auf der einen Seite der zu untersuchende Vierkantstab, auf der anderen Seite ein bekannter Vergleichsstab angeklemt wird, die beide von je einer Induktionsspule umgeben sind. Der im mittleren Jochteil durch eine Magnetisierungsspule erzeugte Induktionsfluß verzweigt sich durch die beiden Stäbe und kann hier ballistisch gemessen werden. Haben beide Stäbe nahezu gleiche Permeabilität, so stimmt die zugehörige Feldstärke für den Probestab mit derjenigen des Vergleichsstabs überein und kann dessen bekannter Magnetisierungskurve entnommen werden, andernfalls muß man durch passend geschaltete Kompensationsspulen dafür sorgen, daß die Streuflüsse beim Übertritt aus dem Joch in den Stab beiderseits gleich sind. — Zur Ausführung von absoluten Messungen beseitigt man den Normalstab, führt die Kompensation ebenso aus, wie vorstehend angegeben, und mißt die an der Stelle des Normalstabes herrschende Feldstärke direkt mit einer Prüfspule von der Länge des Stabes (Meßgenauigkeit etwa 5% nach Angabe des Bureau of Standards).

Für technische Messungen soll eine vereinfachte Form des Instruments dienen, bei der das Joch nur einseitig ausgebildet ist: (Chem. Met. Eng. 19, Nr. 5—6; 1918. — Jahrb. d. M. 1918, S. 186). Der zu untersuchende, mit einer Prüfspule umgebene Stab wird wieder an die horizontalen Backen angeklemt und schließt den durch die Magnetisierungsspule im Joch erzeugten Induktionsfluß. Die jeweilige Induktion im Stab wird ballistisch mittels der Prüfspule gemessen, die zugehörige Feldstärke durch eine neben dem Stab angebrachte leere Prüfspule (Gesetz vom stetigen Übergang der Tangentialkomponente des Feldes). Ein erhebliches Maß von Genauigkeit ist wenigstens von dieser vereinfachten Form nicht zu erwarten.

6. Mit dem Permeameter von Picou (Bull. Soc. Intern. d. El. 1902, S. 745) und von Illioyici (Bull. Soc. Intern. d. El. 1913, S. 581). Der Apparat soll ebenfalls Werte geben, welche keiner Scherung bedürfen. Er besteht aus zwei Jochen, welche an zwei entgegengesetzten Flächen des zu untersuchenden Vierkantstabes angesetzt werden. Beide Joche sind mit einer Spule *A* und *B*, der Stab ist mit einer Spule *C* umgeben. Schaltet man zunächst *A* und *B* hintereinander, während *C* stromlos bleibt, so durchsetzt der Kraftlinienfluß nur die beiden Joche, die vier Luftschlitze zwischen dem Stab und den Jochen sowie die doppelte Stabdicke. Dreht man dann die Stromrichtung in der Spule *B* um und schickt nun auch durch *C* einen Strom von solcher Stärke, daß der vorher beobachtete Kraftlinienfluß in den beiden Jochen ungeändert bleibt, dann liefert der durch *C* gehende Strom gerade diejenige Feldstärke, welche der in dem Probestab herrschenden Induktion entspricht, da die beiden Ströme in *A* und *B* die zur Überwindung des magnetischen Widerstandes in den Jochen und Luftschlitzen notwendige magnetomotorische Kraft liefern. Der Apparat kann natürlich auch zur Untersuchung von Blechstreifen verwendet werden.

Das Universalpermeameter von Illioyici kann als eine Kombination des Permeameters von Picou mit der magnetischen Brücke von Holden (245,3) aufgefaßt werden. Alle drei Apparate dürften kaum strengen Anforderungen an Genauigkeit genügen und haben sich auch, als zu verwickelt, in der deutschen Technik nicht eingebürgert.

7. Mit der Drehspule (Koepsel). Der mit der Magnetisierungsspule umgebene Probestab (Dynamoblech-Bündel) ist durch ein einfaches Joch geschlossen; dies Joch wird an einer Stelle durch einen Luftzwischenraum in Gestalt einer zylindrischen Bohrung unterbrochen, deren Achse senkrecht zu den Kraftlinien steht, und die durch Eisen bis auf einen Zwischenraum von 1 mm wieder ausgefüllt ist; der ausfüllende Kern ist umgeben von einer Spule nach Art der im

Drehspulengalvanometer verwendeten, deren Ebene durch Spiralfedern parallel zu den Kraftlinien gestellt wird. Durch die Drehspule schickt man einen konstanten, vom Querschnitt des Probestabes abhängigen Strom. Die am Zeiger abzulesende Ablenkung ist diesem Strom und der Feldstärke im Luftzwischenraum proportional und gibt demnach bei bestimmtem Querschnitt sogleich die Induktion \mathfrak{B} im Eisen. Um die Wirkung der Magnetisierungsspule auf das Joch aufzuheben, trägt letzteres einige Windungen, die zu der Magnetisierungsspule in Reihe und mit entgegengesetzter Wirkung geschaltet sind. Bei der Aufstellung des Apparates ist der Erdmagnetismus zu beachten; auch sonst sind stärkere äußere magnetische Einflüsse (z. B. von Strom- und Spannungsmessern) fernzuhalten. Der Apparat wird von Siemens & Halske gebaut und ist bei einer für technische Zwecke meist hinreichenden Genauigkeit (Scherung notwendig!) sehr bequem.

8. Durch die Zugkraft (du Bois'sche Wage). Der mit der Magnetisierungsspule umgebene wagrecht gestellte Probestab wird durch ein einfaches halbkreisförmiges Joch geschlossen, das durch einen wagrechten Schnitt nahe beim Probestab zwei gleichgroße Trennungsf lächen erhält. Der obere Teil ist auf einer seitwärts von der Mittelebene des Joches angebrachten Schneide gelagert, so daß die beiderseits gleichen Zugkräfte in den Trennungsf lächen ungleiche Drehmomente ausüben; der Unterschied wird durch verschiebbare Laufgewichte gemessen. Man erhält aus der Wägung den Wert von \mathfrak{J} oder von \mathfrak{B} . Die Scherungslinien werden mit einem beigegebenen Probestab bestimmt; nach deren Ermittlung darf die Stellschraube, welche die Bewegung des beweglichen Jochteils begrenzt, nicht mehr verstellt werden. Der Erdmagnetismus ist zu beachten oder durch einen Hilfsmagnet zu kompensieren. (Zeitschr. f. Instrk. 1900, S. 113 u. 129.)

Eine gute Wage gibt recht genaue Resultate, ist aber gegen Erschütterungen sehr empfindlich; sie eignet sich daher mehr für wissenschaftliche als für technische Messungen. Nach Einschieben von zwei Eisenplatten in die Luftschlitze des Jochs und Einführung einer den Stab umschließenden Prüfspule ist die Wage ohne weiteres auch für ballistische Messungen zu verwenden.

B. Untersuchung an größeren Blöcken, Permeameter von Drysdale. Aus dem zu untersuchenden Block wird mit einem Hohlbohrer ein Loch ausgebohrt, in dessen Mitte ein kleiner zylindrischer Zapfen stehen bleibt, der als Probeobjekt dient. In den Hohlraum der Bohrung wird ein Stöpsel eingeführt, der eine Magnetisierungs- und eine Prüfspule enthält. Den Rest der Öffnung verschließt ein Eisenkern, der zwischen Zapfen und umgebender Eisenmasse einen magnetischen Schluß herstellt. (Bull. Soc. Intern. d. El. 1902, S. 729.)

C. Untersuchung am fertigen Stück. Denso (Inaug.-Dissert.) untersucht fertige Gußstücke, z. B. das Eisengerüst einer Dynamomaschine. An einer Stelle, wo keine Streuung stattfindet, wird eine Spule, die senkrecht zum Eisen schmal ist, dicht an das Eisen angelegt und hier \mathfrak{J} bestimmt (stetiger Übergang der Tangentialkomponente des magnetischen Feldes!), darauf mit umgelegter Prüfspule \mathfrak{B} im Eisen; die der Remanenz entsprechende Induktion muß besonders bestimmt werden, z. B. bei einer Dynamomaschine aus der Ankerspannung bei stromlosen Schenkeln. Die Windungsf läche der schmalen Spule ergibt sich durch Vergleich mit einer ausmeßbaren Spule im gleichmäßigen Feld.

D. Magnetisierbarkeit größerer Proben von Eisenblech in Epstein'scher Anordnung (S. 185) für 25 bis 300 AW.

1. Meth. Epstein: Messung der mittleren Induktion durch Sekundärspulen über die ganzen Bündel, der AW/cm durch wI/l (l = mittlere Eisenlänge 200 cm) (ETZ 1911, S. 334). Luftschlitze und Streuung verursachen Fehler, die etwas geringer werden, wenn man für l statt der Eisenlänge die Spulenlänge setzt (Sumec, ETZ 1915, S. 145).

2. Meth. Gumlich-Rogowski: Messung von Induktion und Feldstärke in der (streuungsreichen) Mitte der Bündel durch Induktions- und Feld-

stärkenspulen; letztere sind, wie bei Denso (C) parallel zur Blechoberfläche angeordnet. (ETZ 1912, S. 262; Gumlich, Leitfaden.)

3. Meth. van Lonkhuyzen (S. & H., Wernerwerk): Vergleichung der Proben mit Normalbündeln, deren Eichung die P. T. R. nach 2 ausführt. Die Messung ist sehr bequem. (ETZ 1911, S. 1131.)

(246) Messungen bei sehr kleinen Feldstärken (Anfangspermeabilität). Hauptbedingung ist außerordentlich gute Entmagnetisierung der Probe (251). Jochmethoden sind hier nicht anwendbar, da der remanente, schwer zu beseitigende Magnetismus des Jochs starke Fehler verursachen kann. Messungen entweder mit dem Magnetometer oder ballistisch an bewickeltem Ring oder Ellipsoid (gestrecktem Stab) mit Probepule von hoher Windungszahl in offener Magnetisierungsspule. Stabmessungen sind auf solche am Ellipsoid mit bestimmtem Dimensionsverhältnis zu beziehen. (Gumlich und Rogowski, ETZ 1911, S. 613.)

(247) Messungen bei hoher Feldstärke. (Sättigungswert.) 1. Nach der verbesserten Ewingschen Isthmusmethode (Gumlich, ETZ 1909, S. 1065). Zwei Polstücke eines kräftigen Elektromagnets sind konisch abgedreht und durch eine Messingfassung verbunden (Abb. 102). Das zu untersuchende Stäbchen von etwa 30 mm Länge und 3 mm Durchmesser wird beiderseits in die einige mm tiefe Bohrung an der Spitze der Kegel eingeschoben. Es ist umgeben von einer doppelten, mit dem Schwingungsgalvanometer verbundenen Prüfspule, deren innere das Stäbchen eng umschließt, während zwischen der inneren und äußeren Spule ein etwa 1 mm breiter Zwischenraum bleibt. Das ganze Probestück läßt sich um eine zwischen den Polen des Elektromagnets angebrachte Achse um 180° drehen. Hierbei entspricht der Galvanometer-Ausschlag, den die innere Spule allein gibt, der Induktion im Stäbchen, der Ausschlag bei Gegeneinanderschaltung beider Spulen der zugehörigen Feldstärke. Die Windungszahl beider Spulen müssen gleich, die Windungsflächen genau bekannt sein; die zwischen Spule und Stäbchen verlaufenden Kraftlinien sind zu berücksichtigen. Auch aus Dynamoblech lassen sich derartige Stäbchen herstellen.

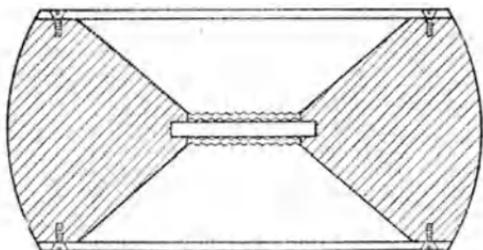


Abb. 102. Isthmusmethode nach Ewing.

2. Nach der Joch-Isthmus-Methode (Gumlich, Arch. f. El. Bd. 2, S. 465, 1914 und Leitfaden). Zu den Messungen dient der zylindrische Probestab der gewöhnlichen Jochmessungen; er wird in einen ins Joch passenden Einsatz eingeführt, der aus zwei Hohlzylindern aus weichem Eisen von etwa der halben Jochlänge, 25 mm äußerem und 6 mm innerem Durchmesser besteht. Beide Eisenzylinder sind durch einen etwa 12 mm breiten Zwischenraum getrennt, in welchem vier konzentrisch angeordnete, durch kleine Zwischenräume voneinander getrennte Meßspulen liegen, von denen, wie bei 1., die innerste Spule bei der Kommutierung des Stroms in der Jochspule die Induktion im Stab mißt, während bei Gegeneinanderschaltung der Spulen $1/2$; $2/3$; $3/4$ der Galvanometerausschlag dem in den Zwischenräumen der betreffenden Spulen vorhandenen Kraftlinienfluß, also der dort herrschenden Feldstärke entspricht, die sich ziemlich stark ändert. Trägt man die gewonnenen Werte graphisch auf, so findet man durch Extrapolation auch die an der Oberfläche des Stabes herrschende, also die gesuchte,

Feldstärke mit ziemlicher Genauigkeit. Für gewöhnliche Messungen kann man sich mit der Bestimmung der Feldstärke durch die Spulen $1/3$ und einer mittels genauer Vergleichsversuche gewonnenen Korrektur (Scherung) begnügen. Erwärmung des Stabes durch den Magnetisierungsstrom ist zu vermeiden (Sinken des Sättigungswertes mit steigender Temperatur). Die Anordnung in der Reichsanstalt liefert Feldstärken von 7—8000 Gauß; sie läßt sich auch auf kürzere Stäbe mit Ansatzstücken, auf Ellipsoide und bei Verwendung eines anderen Einsatzes auch auf Dynamoblech anwenden. Weiches Material (Schmiedeeisen, Stahlguß usw.) ist etwa von $\mathfrak{S} = 2000$ ab gesättigt, hartes (Stahl usw.) erst bei noch höheren Feldstärken. Die Reichsanstalt bestimmt Sättigungswerte [vgl. auch (39)] von festem Material und Dynamoblech.

(248) Nullkurve, jungfräuliche Kurve. Wenn man den Probestab zunächst entmagnetisiert (251) und ihn dann in einem Untersuchungsapparat der von Null aus ohne Unterbrechung bis zum Maximum ansteigenden Magnetisierung unterwirft, so erhält man eine Kurve, wie sie in Abb. 18 strichpunktiert angegeben ist.

(249) Kommutierungskurve. Man beginnt mit dem unmagnetischen Zustand (251); der magnetisierende Strom wird auf einen bestimmten Wert eingestellt, mehrmals kommutiert und schließlich der Ausschlag des Schwingungsgalvanometers bei der Kommutierung abgelesen (243); auf diese Weise geht man bis zum Maximum des Stromes; der Ausschlag entspricht dem *d o p p e l t e n* Wert der Induktion. Die Kommutierungskurve liegt im allgemeinen etwas über der Nullkurve.

(250) Untersuchung von Dynamoblech mit Wechselstrom. Aus dem zu untersuchenden unterteilten Eisen stellt man einen geschlossenen magnetischen Kreis her. Mittels einer Spule vom Widerstande R_1 und eines Wechselstromes von der Stärke I und Frequenz f (in 1 s) wird dieser Eisenkreis magnetisiert. Ein an die Enden der Spule angelegter Spannungsmesser dient zur Bestimmung der Induktion (S. 185). Von der Leistung N , welche ein eingeschaltetes Wattmeter angibt, zieht man den Energieverbrauch durch den Strom in der Magnetisierungsspule $I^2 R_1$ sowie den Verbrauch im Spannungsmesser E^2/R_2 und in der Spannungsspule des Wattmeters E^2/R_3 ab, dann ist der Verlust im Eisen vom Volumen V :

$$N_e = N - (I^2 R_1 + E^2/R_2 + E^2/R_3) = fV (\eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6} + f \cdot \xi \cdot \mathfrak{B}^2) 10^{-7}.$$

Zur Vermeidung des Korrektionsgliedes $I^2 R$ in N_e empfiehlt sich bei höheren Stromstärken die Verwendung einer besonderen Spannungsspule.

In der Formel für N_e entspricht das erste Glied rechter Hand dem Hystereseverlust, das zweite dem Verlust durch die im Eisen entstehenden Wirbelströme. Dividiert man die Gleichung durch f , so erhält man rechter Hand eine lineare Funktion von f ; man kann also durch zwei oder mehr Messungen bei derselben Induktion, aber möglichst verschiedener Periodenzahl den Hystereseverlust $fV \cdot \eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6} \cdot 10^{-7}$ und den Wirbelstromverlust $f^2 \cdot V \xi \cdot \mathfrak{B}^2 \cdot 10^{-7}$ und somit auch den Hysteresekoeffizienten η und den Wirbelstromkoeffizienten ξ einzeln ermitteln. Am einfachsten geschieht dies graphisch, indem man die gefundenen Werte von N_e/f als Funktionen von f aufträgt; man erhält dann eine Gerade, deren Abschnitt auf der Ordinatenachse den Hystereseverlust $V \cdot \eta \cdot \mathfrak{B}^{1,6} \cdot 10^{-7}$ ergibt, während die Tangente des Neigungswinkels mit der Abszissenachse den Wirbelstromverlust $V \cdot \xi \cdot \mathfrak{B}^2 \cdot 10^{-7}$ liefert. Zur Bestimmung der Verluste in 1 kg Eisen hat man die obige Gleichung noch mit $\frac{10^3}{s \cdot V}$ zu multiplizieren ($s = \text{spez. Gewicht}$).

Der gesamte Energieverbrauch bei der Ummagnetisierung von 1 kg Eisenblech bei 50 Perioden, $\mathfrak{B} = 10\,000$ bzw. 15 000 und einer Temperatur von 20° heißt Verlustziffer [V_{10} bzw. V_{15}]. Im Durchschnitt findet man für die Verlustziffern etwa folgende Werte:

normales Blech	$d = 0,5 \text{ mm}$	$V_{10} > 3,0$;	$V_{15} > 7,0$	$s = 7,80$
schwach legiertes Blech	$d = 0,5 \text{ mm}$	$V_{10} = 2,6-3,0$;	$V_{15} = 6-7$	$s = 7,75$
mittel legiertes Blech	$d = 0,5 \text{ mm}$	$V_{10} = 1,85-2,6$;	$V_{15} = 4-6$	$s = 7,65$
hoch legiertes Blech	$d = 0,5 \text{ mm}$	$V_{10} < 1,85$	$V_{15} < 4$	$s = 7,55$
hoch legiertes Blech	$d = 0,3 \text{ mm}$	$V_{10} < 1,6$	$V_{15} < 3,6$	$s = 7,55$

Einige Kurven für Verlustziffern sind in Abb. 103 nach Messungen in der Reichsanstalt wiedergegeben; die punktierten Werte über $\mathfrak{B} = 16000$ sind extrapoliert. η liegt bei hochlegierten Transformatorblechen bei etwa $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Erg/cm}^3 (\text{Per/s})$ und steigt mit abnehmendem Si-Gehalt bis zu etwa $1,8 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Erg/cm}^3 (\text{Per/s})$; ξ ist ungefähr umgekehrt proportional dem Quadrat der Blechdicke δ ; ξ/δ^2 ist bei hochlegierten Blechen von der Größenordnung $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Erg/cm}^3 (\text{Per/s})$ und steigt mit abnehmenden Si-Gehalt bis zu etwa $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Erg/cm}^3 (\text{Per/s})$.

Empfehlenswerte Versuchsanordnungen sind angegeben von:

1. Epstein (Lahmeyer A.-G.): Vier Magnetisierungsspulen von 42 cm Länge, in quadratischer Anordnung auf einem Brett befestigt, nehmen je 2,5 kg Eisenblech in Gestalt von 50 cm langen und 3 cm breiten Streifen auf; die aus den Spulen herausragenden Enden der Blechbündel werden durch Klammern fest gegeneinander gepreßt. Die einzelnen Blechstreifen müssen wegen der Wirbelströme durch Papier oder dergl. gegeneinander isoliert sein. Bequeme Anordnung nach van Lonkhuyzen (ETZ 1912, 531).

2. Möllinger (Siemens-Schuckertwerke). Die Probestücke werden als geschlossene Ringe, deren Breite klein ist im Verhältnis zum Durchmesser, ausgestanzt, mit Papierzwischenlagen übereinander geschichtet und festgepreßt. Die Magnetisierungsspule wird gebildet durch 100 Windungen aus dickem, biegsamem Kabel, von denen jede mittels eines Steckkontaktes geöffnet bzw. geschlossen werden kann.

3. Richter (Siemens & Halske). Eine aus Holzleisten bestehende zylinderförmige Trommel von 1 m Höhe und 2 m Umfang trägt außen die Magnetisierungswindungen aus starkem Kupferdraht, in welche vier ganze Blechtafeln von $100 \times 200 \text{ cm}$ Größe eingeschoben werden können. Die durch Papiermanschetten isolierten Enden der Tafeln werden abwechselnd übereinander gelegt und durch eine Leiste festgedrückt. Der Apparat gestattet Messungen ohne Materialverlust, ist aber nur für Tafeln bestimmter Maße zu verwenden.

4. Lloyd (in England und Amerika viel verwendet). Die Anordnung unterscheidet sich von der Epstein'schen im wesentlichen durch geringere Länge der Probepäckchen (25 cm) sowie durch Einführung rechtwinkliger gebogener Eckstücke aus ähnlichem Material, welche zwischen die Fugen der einzelnen Bleche eingesetzt werden, um den Übergangswiderstand der Luftschlitze zu verringern; ihr Einfluß muß bei der Messung berücksichtigt werden.

Bei diesen Messungen hängt die Spannung E mit der Induktion \mathfrak{B} zusammen durch die Formel: $E = \mathfrak{B} \cdot q \cdot w \cdot 4f \cdot \alpha \cdot 10^{-8}$. Hierin bedeutet q den Querschnitt der Blechprobe, w die Windungszahl der Magnetisierungsspule, f die Frequenz und α den sogenannten Formfaktor, d. h. das Verhältnis der effektiven zur mittleren

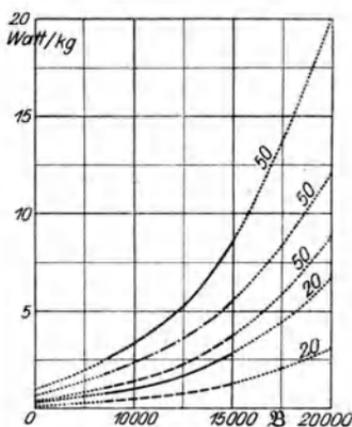


Abb. 103. Verlustziffer.

Spannung. α soll = 1,11 sein (sinusförmige Spannungskurve); hat der Formfaktor einen anderen Wert, so ist der aus den Beobachtungen berechnete Koeffizient ξ noch mit $(1,11/\alpha)^2$ zu multiplizieren; dementsprechend ist auch der Wert der Verlustziffer zu reduzieren. Mit wachsender Temperatur nimmt der Wirbelstromverlust ab, und zwar bei den gewöhnlichen Blechsorten für 1 Grad ungefähr um 0,5 %. Die oft recht beträchtliche Erwärmung macht sich bei der Berechnung von η und ξ dadurch geltend, daß die Werte von N_e/f scheinbar nicht genau auf einer geraden Linie, sondern auf einer nach unten konkaven Kurve liegen; die Abweichung verschwindet bei Berücksichtigung der Temperatur (Messung am sichersten mit dem Thermoelement). Neuerdings ist es gelungen, magnetisch vorzügliche Eisensorten mit hohem Leitungswiderstand und entsprechend geringem Wirbelstromverlust herzustellen [sog. legiertes Blech (39)]. Mit wachsendem Siliziumgehalt sinkt auch der Temperaturkoeffizient des Widerstands entsprechend folgender Tabelle und damit die Korrektur des Wirbelstromverlustes wegen der Temperatur; bei höheren Legierungen ist sie ganz zu vernachlässigen (Gumlich, Wiss. Abh. der P. T. R. IV, H. 3, und Leitfad.).

Si %	0	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Temperaturkoeffizient %	0,57	0,33	0,24	0,15	0,11	0,08	0,06

Methoden zur Untersuchung der Hysterese: Searle (Electrician Bd. 36, S. 800) umwickelt die ringförmige Eisenprobe vom Querschnitt q mit zwei Spulen; die primäre hat K Windungen auf 1 cm Länge und wird von einem Strom I durchflossen, der auch durch die feststehende Spule eines Dynamometers geht; die sekundäre Spule hat w Windungen und ist mit der beweglichen Spule des Dynamometers, deren Schwingungsdauer t ist, verbunden; der Widerstand dieses sekundären Kreises R ist annähernd induktionsfrei. Läßt man nun den magnetisierenden Strom mit Hilfe eines geeigneten Schalters die Werte von $+I$ durch $0, -I, 0, +I$ nicht zu rasch durchlaufen, so erfährt die bewegliche Spule des Dynamometers einen Stoß, der den Ausschlag α hervorbringt. Wenn darauf die konstanten Ströme i_1 und i_2 durch die beiden Spulen des Dynamometers gesandt werden, so bringen sie eine Ablenkung α_0 (Einstellung) hervor. Dann ist die durch Hysterese verbrauchte Energie für diese springende Änderung der Magnetisierung, welche jedoch von dem Verbrauch bei stetiger Änderung nicht unbedeutend abweichen kann,

$$\frac{1}{4\pi} \int \mathfrak{H} d\mathfrak{B} = \frac{KR}{wq} \cdot \frac{t}{2\pi} \cdot i_1 i_2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_0}$$

Zeigt das Dynamometer Dämpfung, so ist wie bei (243) angegeben zu verfahren.

Schickt man in die primäre Spule einen Wechselstrom von der Stärke I und f Per/s, so ist

$$\frac{1}{4\pi} \int \mathfrak{H} d\mathfrak{B} = \frac{KR}{wq} \cdot f \cdot i_1 i_2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_0}$$

Hier ist α eine Einstellung; Schwingungsdauer des Dynamometers und Einfluß der Dämpfung fallen weg.

In den Apparaten von Ewing (ETZ 1895, S. 292) und von Blondel-Carpentier (ETZ 1898, S. 178) wird eine kleinere Menge des zu untersuchenden Eisenbleches in das Feld eines kräftigen Stahlmagnets gebracht. In Ewings Apparat wird die Eisenprobe, ein längliches Päckchen aus Blechen ($1,5 \times 8$ cm), gedreht, und der Stahlmagnet folgt der Drehung; in dem Blondelschen Apparat

wird der Magnet gedreht, und die Eisenprobe folgt. Aus dem Ausschlag kann man die Hysteresis berechnen. Jeder Apparat ist nur für eine bestimmte Induktion zu benutzen. Die Angaben sind wenig genau und haben nur Vergleichswert.

(251) Entmagnetisieren von Eisenproben. Den angenähert unmagnetischen Zustand erreicht man durch wechselnde Magnetisierungen mit abnehmender Stromstärke; man magnetisiert mit Wechselstrom, den man durch Einschalten von Widerstand allmählich schwächt, oder mit Gleichstrom, den man wendet und gleichzeitig schwächt.

Völlige Entmagnetisierung ist nur durch besondere Vorsichtsmaßregeln, namentlich ganz gleichmäßige Abnahme des Entmagnetisierungsstromes zu erreichen (vgl. ETZ 1911, S. 180).

Literatur: Du Bois, Magnetische Kreise, deren Theorie und Anwendung. Berlin 1894. Jul. Springer. — Ewing, Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen, deutsch von Holborn und Lindeck. Berlin 1892. Jul. Springer. — E. Gumlich, Leitfaden der magnetischen Messungen. Braunschweig 1918. Fried. Vieweg u. Sohn. — Erich Schmidt, Die magnetische Untersuchung des Eisens und verwandter Metalle. Halle a. S. 1900. Wilh. Knapp.

Zweiter Abschnitt.

Technische Messungen.

Messungen an elektrischen Maschinen.

(252) Arten der Messung. Messungen an elektrischen Maschinen und Transformatoren werden ausgeführt: In elektrotechnischen Fabriken zur Prüfung der fertiggestellten Fabrikate; hierbei ist zu unterscheiden zwischen der sorgfältigen Erprobung neuer Modelle oder einzeln angefertigter Sondermaschinen und der Massenprüfung normaler Maschinen. Ferner bei Abnahmeprüfungen zum Nachweis der gewährleisteten Eigenschaften abgelieferter Maschinen.

(253) Zu messende Größen. Gemessen werden regelmäßig: Spannung, Stromstärke, Drehzahl und bei Wechselstrom auch die elektrische Leistung und die Frequenz. Die mechanische Leistung (Aufnahme bei Dynamos, Abgabe bei Motoren) wird meist aus der gemessenen elektrischen Leistung und den gemessenen Verlusten errechnet, seltener unmittelbar gemessen. Ferner wird die Temperatur oder Erwärmung und die Isolierfestigkeit gemessen, bei Wechselstrom auch manchmal die Kurvenform festgestellt.

(254) Prüffeldeinrichtung. Die Messungen finden meist im Prüffeld statt. Zur Ausrüstung eines solchen gehören in erster Linie Einrichtungen zur Erzeugung der erforderlichen Stromarten: Gleichstrom von 110, 220, 440 und 550 V, Drehstrom von 120, 220, 380 und 500 V, sowie Hochspannung nach Bedarf; Frequenz regelbar von etwa 25 bis wenigstens 60 Per/s. Auch Gleichstrom von niedriger Spannung, etwa 25 V ist wünschenswert. Zur Erzeugung dieser Stromarten ist eine Reihe von Umformern nötig. Meist steht Energie in Form von Drehstrom mit 50 Per/s zur Verfügung und mit dieser Stromart werden auch die meisten Prüfungen durchgeführt. Es sind dann ein oder mehrere Transformatoren mit umschaltbarer Sekundärwicklung erforderlich, um die gebräuchlichen Spannungen zu erzeugen. Sehr zweckmäßig ist die Aufstellung einiger Drehtransformatoren, um die Spannung an den Prüfständen nach Belieben regeln zu können. Drehstrom von abweichender Frequenz wird durch Motorgeneratoren erzeugt, und zwar kommen als Antriebsmotoren wegen der notwendigen Drehzahlregelung nur Gleichstrommotoren in Frage. Es empfiehlt sich, wenigstens einen Drehstromgenerator umschaltbar zur Abgabe von Zweiphasenstrom einzurichten. Gleichstrom-Drehstrom-Einanker-Umformer sind ungeeignet, da ihre Drehzahl bei Abgabe von Blindstrom stark ansteigt. Die Feldregler für den Gleichstrommotor und die Dynamo des Motorgenerators werden in der Nähe des Prüfstandes angebracht, um die Spannung und die Frequenz während der Prüfung bequem einstellen zu können. Häufig kommt auch Fernsteuerung der Regler zur Anwendung. Zur Erzeugung des Gleichstroms ist ein Einanker-Umformer oder Motorgenerator für 2×220 V Gleichstrom zweckmäßig. Außerdem ist ein Motorgenerator erforderlich, dessen Dynamo Gleichstrom von 0 bis 110 V abgeben kann. Durch Reihen- oder Gegenschaltung dieser Maschinen lassen sich alle Spannungen von 0 bis 550 V erzeugen.

Umlaufende Maschinen.

(255) Antrieb und Belastung der Maschinen. Zum Antrieb der zu prüfenden Generatoren und zur Belastung der zu prüfenden Motoren sind Gleichstrommaschinen mit regelbarer Drehzahl vorzusehen. Diese geben bei Prüfung von Motoren die Energie an das Netz zurück, gegebenenfalls durch den Betriebsumformer, der dann Gleichstrom in Drehstrom umformt. Auch die zu prüfenden Generatoren arbeiten in der Regel unmittelbar oder durch Umformer auf das Netz. Belastung durch Widerstände kommt nur selten zur Anwendung; z. B. für genaue Messungen, bei denen auf möglichst gleichbleibende Belastung Wert gelegt wird. Für solche Fälle ist es vorteilhaft, wenn ein, meist aus frei ausgespannten Nickelindrahtspiralen bestehender, Belastungswiderstand zur Verfügung steht.

Behelfsmäßig lassen sich auch Wasserwiderstände zur Belastung von Maschinen gut verwenden. Z. B. genügt eine wassergefüllte Tonne, in die Elektroden aus Eisenblech eintauchen, für kurzzeitige Belastungen bis etwa 30 kW. Bei niedrigen Spannungen wird dem Wasser Soda zugesetzt. Zur Belastung großer Stromerzeuger bei Prüfungen im Kraftwerk wird ein Wasserbehälter mit dauerndem Zu- und Abfluß benutzt, in den Eisenelektroden eintauchen. Auf diese Weise lassen sich leicht mehrere 1000 kW vernichten. In Wasserkraftanlagen hängt man gelegentlich auch die Elektroden in den Wasserkanal.

(256) Regelung und Anlassen. Spannung, Drehzahl und Belastung werden meist durch Änderung der Erregerstromstärke geregelt. Es wird demnach im Prüffeld eine größere Zahl von Feldreglern für verschiedene Stromstärken und Widerstände gebraucht. Neben solchen der üblichen Bauart mit Kontaktplatte sind zur Feineinstellung sogenannte Schiebewiderstände vorteilhaft. (Spiralförmig aufgewickelter Widerstandsdraht, auf dem ein verschiebbarer Kontakt schleift.) Zum Anlassen von Motoren werden zweckmäßig Wasserwiderstände verwendet, da diese sich den in weiten Grenzen verschiedenen Spannungen und Stromstärken am besten anpassen.

(257) Durchführung der Messungen. Maßgeblich für die Prüfung elektrischer Maschinen sind die vom Verband Deutscher Elektrotechniker aufgestellten „Regeln für die Bewertung und Prüfung elektrischer Maschinen“. (REM, s. ETZ 1922, S. 657 u. 1442).

(258) Widerstände. Zur Messung der Widerstände von Anker- und Magnetwicklungen können Meßbrücken (191, 192) dienen, meist zieht man aber ihre Berechnung aus Strom- und Spannungsmessung (189) vor, besonders bei den niedrigen Widerständen der meisten Ankerwicklungen. Hier ist besondere Sorgfalt beim Anlegen der Meßleitungen zu beobachten, um Fehler durch Übergangswiderstände sowie Beschädigungen der Instrumente durch Induktionsstöße zu vermeiden. Stets ist erst der Stromkreis zu schließen und dann der Spannungsmesser anzulegen. Hierzu werden zweckmäßig besondere Anschlußstifte benutzt, die das selbsttätig bewirken (S c h e r i n g, ETZ 1923, S. 11).

Die genaue Messung des Widerstandes mehrpoliger Gleichstromanker bietet Schwierigkeiten. Am besten ist es, die Meßleitung an 2 Lamellen im Abstand einer Polteilung anzulegen und den kombinierten Widerstand der Wicklung aus dem Ergebnis zu berechnen (vgl. W e t t l e r, ETZ 1902, S. 8). — In der Regel erfolgt die Widerstandsmessung hauptsächlich zur Feststellung der Erwärmung (Widerstandzunahme). Dann kommt es auf den tatsächlichen Widerstand weniger an als auf das Verhältnis der Meßergebnisse in kaltem und warmem Zustand. Um hier Fehler zu vermeiden, ist es bei Kommutatormaschinen notwendig, beide Messungen an denselben Lamellen vorzunehmen. Zu diesem Zweck müssen 2 Lamellen im Abstand einer Polteilung deutlich gekennzeichnet werden.

Über die Messung des Übergangswiderstandes von Bürsten vgl. ETZ 1900, S. 429; Arch. f. El. Bd. 2, S. 70 und Bd. 5, S. 16. — Meist wird dieser Widerstand aber nicht gemessen. Für die Verlustbestimmung verwendet man die in § 61 der REM angegebenen Erfahrungswerte (s. auch weiter unten: Messung der Einzelverluste).

Sollen die Widerstände R_1, R_2, R_3 von drei in Stern geschalteten Zweigen gefunden werden, so mißt man die Widerstände, r', r'', r''' zwischen den Klemmen VW, WU und UV ; dann ist:

$$R_1 = (r'' + r''' - r')/2, \quad R_2 = (r''' + r' - r'')/2, \\ R_3 = (r' + r'' - r''')/2.$$

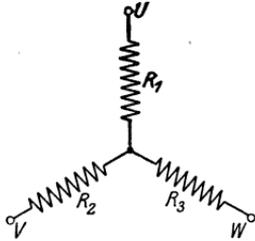


Abb. 104. Verzweigter Widerstand.

Die Messung von Isolationswiderständen wird von dem REM nicht verlangt, und sie unterbleibt deshalb meist. Immerhin ist diese Messung nützlich, um festzustellen, ob die Maschine genügend ausgetrocknet ist. Gemessen wird der Isolationswiderstand am einfachsten mit Gleichspannung von 220 oder 440 V, wobei ein gewöhnlicher Spannungsmesser als Strommesser für den durch die Isolation fließenden schwachen Strom benutzt wird. Zur Erzeugung der Meßspannung dient häufig ein Magnetinduktor mit Handbetrieb, der in einem gemeinsamen Gehäuse mit dem Meßinstrument vereinigt ist (279). Diese Apparate sind besonders in England und Amerika sehr verbreitet.

(259) Isolierfestigkeit. Über die Messung s. (194, 195) u. REM § 48 u. f. — Neben der Prüfung der Wicklungen mit erhöhter Spannung gegen Eisen und gegeneinander wird bei Maschinen für mehr als 2500 V Betriebsspannung noch eine „Sprungwellenprobe“ vorgenommen, um festzustellen, ob die Windungsisolation den im Betriebe möglicherweise vorkommenden Sprungwellen (Wanderwellen) stand hält. Näheres s. REM § 51.

(260) Magnetische Messungen. Magnetische Spannungen zwischen zwei Punkten können experimentell mit dem magnetischen Spannungsmesser ermittelt werden (244). Flüsse werden am besten dadurch gemessen, daß Hilfswicklungen angebracht werden, welche die Flächen umschließen, die von den zu untersuchenden Flüssen durchsetzt werden. Bei statischer Magnetisierung wird die Hilfswicklung mit einem ballistischen Galvanometer untersucht, bei periodischer Magnetisierung mit einem Spannungsmesser oder einem Oszillographen.

Messung der Streuung (244). Man legt die Hilfswicklung einmal um denjenigen Eisenquerschnitt, der vom maximalen Magnetfluß durchsetzt wird (Schenkel) und andererseits denjenigen, von dem festgestellt werden soll, um wieviel der Fluß in dem betreffenden Querschnitt kleiner geworden ist. Anstatt die ballistischen Ausschläge nacheinander zu messen, kann durch geeignetes Gegeneinanderschalten eine Nullmethode angewandt werden (ETZ 1902, S. 314).

Feldverteilung längs des Ankerumfanges. Die Messung kann bei ruhender Maschine mit einer Wismutspirale ausgeführt werden. Besser ist es bei Gleichstromankern zwei Hilfsbürsten anzuwenden, die auf zwei aufeinanderfolgenden Kollektorsegmenten aufliegen; die an den Bürsten gemessene Spannung ist der magnetischen Induktion an der betreffenden Stelle des Magnetgestelles proportional. Durch allmähliches gemeinsames Verschieben der beiden Bürsten erhält man die Kurve der magnetischen Verteilung.

(261) Spannung, Strom und elektr. Leistung. Hierfür dienen die in (164, 172 a, 175, 197, 202, 218 u. folg.) beschriebenen Instrumente, und zwar bei Gleichstrom Drehpuleninstrumente mit getrennten Vorschaltwiderständen und Nebenschlüssen (164, 197), bei Wechselstrom am besten dynamometrische Spannungsmesser (223) und Weicheisen-Strommesser (227). Zur Leistungsmessung bei Drehstrom bedient man sich der Aronschaltung (Abb. 89) oder Zweiwattmeter-Methode. Die Verwendung nur eines Instruments mit Umschalter an Stelle von 2 Wattmetern ist bei Maschinenmessungen nicht zu empfehlen, da es meist nicht möglich ist, eine genau gleichbleibende Belastung zu erreichen. Für sehr starke Ströme und hohe Spannungen benutzt man Meßwandler (229). — Zur Messung schnell ver-

änderlicher Ströme und Spannungen sowie zur Aufnahme von Wechselstromkurven ist ein Oszillograph (237, 3) unentbehrlich.

(262) Drehzahl. Im Prüffeld werden fast ausschließlich Handtachometer verwendet, die für alle vorkommenden Drehzahlen von mehreren Firmen hergestellt werden. Die meisten Instrumente besitzen mehrere Meßbereiche, z. B. 100 bis 300, 250 bis 750, 700 bis 2100 und 2000 bis 6000 U/min. — Bei Anschaffung ist darauf zu achten, daß die am häufigsten vorkommenden Drehzahlen z. B. 900 bis 1000 und 1400 bis 1500 gut ablesbar sind. Die früher in Verbindung mit einer Sekundenuhr viel benutzten Umlaufzähler sind als veraltet anzusehen, da ihre Verwendung zu zeitraubend ist. Auch geben sie stets nur den Mittelwert der Drehzahl über einen bestimmten Zeitraum (z. B. 1 min) an, während bei genauem Versuchen der Augenblickswert gleichzeitig mit den übrigen Meßinstrumenten abgelesen werden muß.

Bei ganz kleinen Motoren würde man durch Anlegen eines Tachometers den Gang zu sehr beeinflussen. Benischke (ETZ 1899, S. 143) verwendet in diesem Fall einen zweiten Motor, dessen Geschwindigkeit reguliert werden kann; auf die Achse dieses Motors setzt er eine Scheibe mit sektorförmigen Ausschnitten und auf die Achse des zu untersuchenden Motors eine ähnliche Scheibe oder einen mehrstrahligen Stern. Beide Motoren werden in Drehung versetzt und die vom zu untersuchenden Motor gedrehte Scheibe durch die Ausschnitte der anderen angesehen. Man reguliert die Geschwindigkeit des Hilfsmotors so lange, bis die erstere Scheibe (oder Stern) still zu stehen scheint. Sind beide Scheiben gleich geteilt, so stimmen die Umdrehungsgeschwindigkeiten genau überein; bei verschiedener Teilung kann man das Verhältnis leicht bestimmen; enthält die Scheibe des zu untersuchenden Motors m Speichen, Schlitze oder Strahlen, die des Hilfsmotors p Speichen, so ist die Geschwindigkeit des Hilfsmotors, welche besonders gemessen wird, mit p/m zu multiplizieren. Über die Messung sehr großer Drehzahlen nach der stroboskopischen Methode s. Schillo, ETZ 1912, S. 159.

Ungleichförmigkeitsgrad. Schwankt die Winkelgeschwindigkeit einer Welle während einer Umdrehung, so ist $(\omega_{\max} - \omega_{\min})/(\omega_{\max} + \omega_{\min})$ der Ungleichförmigkeitsgrad.

- a) Messung mit der Stimmgabel. Man läßt eine Stimmgabel auf dem Umfange des ungleichförmig rotierenden Zylinders ihre Schwingungen schreiben und mißt die Länge der einzelnen Schwingungen aus.
- b) Vergleich mit einer gleichförmigen Bewegung. Man stellt der ungleichförmig rotierenden Scheibe eine gleichförmig rotierende gegenüber und zeichnet die relative Bewegung beider zueinander auf. (Göpel, Franke, ETZ 1901, S. 887).
- c) Bestimmung durch Kurvenaufnahme. Man kuppelt mit der drehenden Welle eine kleine Gleichstrommaschine mit konstanter Erregung und nimmt mittels Kontaktmachers oder Oszillographen (236, 237) die Spannungskurve innerhalb einer Umdrehung auf. (Franke, a. a. O.; Bull. Soc. int. 2, S. 557. Runge, Zsch. Ver. D. I. 59, S. 664, 687.)

(263) Frequenz. Am meisten verwendet werden Vibrationsfrequenzmesser der Bauart Hartmann-Kempf oder Frahm (232). Mangels eines solchen ermittelt man die Frequenz durch Drehzahlmessung an einem Synchronmotor oder (mit genügender Annäherung) leerlaufenden Asynchronmotor.

(264) Schlüpfung. Die Schlüpfung von Asynchronmotoren ergibt sich bei bekannter Frequenz aus der Drehzahl. Diese Messung ist aber ungenau, da es sich um eine Differenz zweier nur wenig voneinander verschiedener Größen handelt. Es gibt mehrere Verfahren zur unmittelbaren Schlüpfungsmessung, die meist auf stroboskopischer Beobachtung beruhen. (ETZ 1899, S. 412; 1911, S. 219; 1904, S. 392; 1907, S. 557; 1917, S. 587; 1901, S. 194; 1905, S. 1046; 1911, S. 46; 1912, S. 60). Praktisch werden diese Verfahren wenig benutzt. Wenn sehr geringe Schlüpfungen genau gemessen werden sollen, so kann bei Schleifringmotoren ein Dreh-

spulenstrommesser in den Läuferkreis geschaltet werden. Der Zeiger schwingt im Takte des Schlupfes, der sich demnach durch Abzählen der Schwingungen ergibt. Statt des Strommessers kann man auch ein Millivoltmeter benutzen, das an die Klemmen des kurzgeschlossenen Anlassers gelegt wird (ETZ 1901, S. 194). — Bei stärkeren Strömen genügt schon eine gewöhnliche Magnethadel (Kompaß), die in die Nähe des Läufers gehalten wird. Dieses Verfahren ist auch bei Kurzschlußmotoren anwendbar.

(265) Mechanische Leistung. Gewöhnlich wird nur die von kleineren Motoren abgegebene mechanische Leistung (Abgabe) unmittelbar gemessen; bei größeren Motoren wird sie aus der zugeführten elektrischen Leistung (Aufnahme) durch Subtraktion der getrennt gemessenen Verluste berechnet (vgl. REM § 55 und folgende). — Zur unmittelbaren Messung der mechanischen Leistung eines Motors werden gewöhnlich Bremsen benutzt, deren bekannteste der Pronysche Zaum ist. Die Bremscheibe (Abb. 105) wird zwischen zwei Holzbacken geklemmt, an denen sich ein Hebelarm befindet, dessen Eigengewicht ausgeglichen ist und an den Gewichte gehängt werden können. Es werden P kg angehängt und die Schrauben der Bremse so fest angezogen, daß der Hebel zwischen den Anschlägen $a a$ frei schwebt. Dann ist (429)

$$N = 0,001028 P d n \text{ Kilowatt}$$

die mechanisch abgegebene Leistung des Motors. Darin bedeutet d den Hebelarm in m und n die Drehzahl in der Minute.

Während des Bremsversuches muß man die Klemmbacken durch Wasser (am besten Seifenwasser) kühlen.

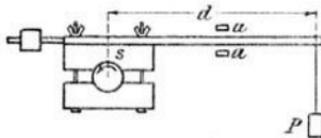


Abb. 105. Pronyscher Zaum.

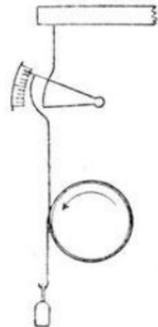


Abb. 106. Seilbremse.

Anstatt Gewichte anzuhängen, kann man auch einen am Hebelarm befestigten senkrechten Stift auf eine Feder- oder Brückenwage drücken lassen.

In vielen Fällen ist es bequem, am Ende des Hebelarmes statt eines Gewichtes eine Spiralfeder anzubringen, deren Ausdehnung und Spannung an einer Skala abgelesen wird und die nach kg* geeicht ist. Eine solche Feder vermag der etwas wechselnden Leistung besser zu folgen als das einmal aufgelegte Gewicht.

Für die Messung kleinerer Leistungen sind die Seilbremsen (Abb. 106) sehr zweckmäßig. Ein Seil wird ein- oder mehrmals um eine wassergekühlte Bremscheibe geschlungen und am Ende durch ein Gewicht belastet, während in den auflaufenden Teil des Seiles ein Federdynamometer eingeschaltet ist. Für P ist in obenstehender Formel die Differenz des angehängten Gewichtes und des von dem Federdynamometer angegebenen Zuges zu setzen; für d der halbe Durchmesser der Seilscheibe (Seildicke berücksichtigen!). Durch Anschläge muß dafür gesorgt werden, daß das Gewicht mit Seil nicht weggeschleudert werden kann.

Es ist vorteilhafter, den Motor in umgekehrter Richtung laufen zu lassen als durch den Pfeil in Abb. 106 angegeben ist. Seilbremsen sind besonders zweckmäßig zur Messung des Drehmoments während der Anlaufperiode.

Über Flüssigkeitsbremsen s. Z. d. V. d. I. 1907, S. 607. Selbsttätige Einstellung bei Robertson, Electrician Bd. 69 S. 525, 1912.

Mechanische Bremsen pflegen unruhig zu arbeiten. Durchaus ruhige Einstellungen und damit genauere Resultate erhält man mit Wirbelstrombremsen

(Pasqualini, *Elettricista* 1892, S. 177; Rieter, *ETZ* 1901, S. 195; Feußner, *ETZ* 1901, S. 608; Siemens & Halske, *Nachrichten* 1902, Nr. 32, Morris Lister, *Journ. Inst. El. Eng.* 1904, Bd. 35, S. 445. Rüdtenberg; *Energie der Wirbelströme in elektrischen Bremsen und Dynamomaschinen*. Ferd. Enke, Stuttgart 1906). Bei diesen Bremsen rotiert eine auf die Achse des Motors aufgesetzte Metallscheibe zwischen den Polen eines Elektromagnets. Der Elektromagnet ruht auf Schneiden; dem durch die Wirbelströme in der Metallscheibe auf ihn ausgeübten Drehmoment wird durch aufgelegte Gewichte das Gleichgewicht gehalten. Durch Regulieren der Erregung des Elektromagnets kann man die abgegebene Leistung in weiten Grenzen ändern und in feinsten Abstufungen einstellen. Die Bremsen werden vorzugsweise für kleinere Leistungen (bis etwa 5 kW) gebaut. Die in der Bremscheibe durch Wirbelströme erzeugte Wärme kann bei diesen Leistungen durch Wasserspülung abgeführt werden. Durch einen besonderen Versuch ist die Leistung zu bestimmen, die durch Aufsetzen der leerlaufenden Bremscheibe (Luftreibung) benötigt wird.

Handelt es sich um größere Leistungen, so wird die Wirbelstrombremse durch eine Bremsdynamo (Leistungswage) ersetzt, d. i. eine Dynamomaschine, deren Ständer mittels Kugellager drehbar um die Achse der Maschine gelagert ist (Abb. 107).

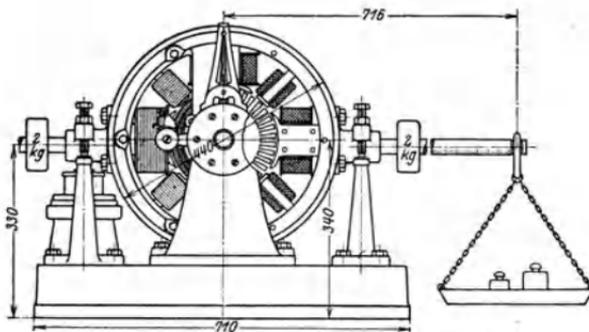


Abb. 107. Bremsdynamo von Dr. Max Levy.

Die Maschine wird durch einen Widerstand oder durch Stromlieferung in das Netz belastet; dadurch wird auf den Ständer ein Drehmoment ausgeübt. Ein am Ständer befestigter Hebelarm trägt Laufgewichte und eine Wagschale. Durch Einstellen der Gewichte wird das auf den Ständer übertragene Drehmoment gemessen (Langer u. Finzi, *Zschr. Ver. D. I.* 1914, S. 41; *ETZ* 1922, S. 1041). Über einen als Bremsdynamo ausgearbeiteten Turbogenerator s. König, *Helios* 1910, S. 431; über Meßgenauigkeit s. Schüler, *Autotechnik* 1922, Heft 22/23.

Die Bremsdynamo kann, als Motor arbeitend, auch dazu dienen, um die von einer Maschine aufgenommene mechanische Arbeit zu messen. Wenn eine Bremsdynamo nicht zur Verfügung steht, so kann man für weniger genaue Messungen auch einen gewöhnlichen Motor benutzen, dessen Wirkungsgrad durch Bremsung oder Messung der Einzelverluste bestimmt wird. Wesentlich umständlicher ist die Anwendung des Torsionsdynamometers, das deshalb nur für wissenschaftliche Untersuchungen in Frage kommt. Es besteht grundsätzlich aus einer Stahlstange, durch welche die Antriebsmaschine mit der zu untersuchenden Maschine gekuppelt wird. Der Winkel, um den der Stahlstab verdrillt wird, ist ein Maß für das übertragene Drehmoment; er wird am besten auf optischem Wege gemessen. Die Methode eignet sich für raschlaufende Maschinen mit möglichst geringem Ungleichförmigkeitsgrad.

Literatur: Gramberg, Technische Messungen. 1910. — Görgeß u. Weidig, ETZ. 1913, S. 701. 739. — Brodhun, Zschr. f. Instrk. 1904, S. 313. — Vieweg, Arch. f. El. 2, S. 48. 1913. Z. Instrk. 1914, S. 157; 1915, S. 141.

(266) Drehmoment. Man befestigt an der Ankerachse einen zur letzteren senkrecht stehenden Arm, an welchem eine Feder oder andere Kraft angreift, um die Drehung des Ankers zu verhindern, wenn dem Anker die zu seinem Betrieb bestimmten Ströme zugeführt werden, und zwar bestimmt man, um die Reibung zu berücksichtigen, die beiden Kräfte, bei denen der Anker gerade in der einen oder anderen Richtung anfangen will sich zu drehen, und nimmt das Mittel. Dieses mit dem Hebelarm multipliziert ergibt das Drehmoment, das das Feld auf die Ankerströme ausübt. (Vgl. auch Richter, E u. M 1922, S. 157.) Über die experimentelle Bestimmung des Trägheitsmomentes von Ankern ETZ 1917, S. 182 und ETZ 1922, S. 1307.

(267) Wirkungsgradbestimmungen an Maschinen und Transformatoren können grundsätzlich auf zwei verschiedenen Wegen gemacht werden. Entweder es werden die Maschinen und Transformatoren betriebsmäßig belastet und die zugeführten und abgegebenen Leistungen gemessen, oder man mißt nur die Verluste einzeln und berechnet daraus den Wirkungsgrad. Im zweiten Fall

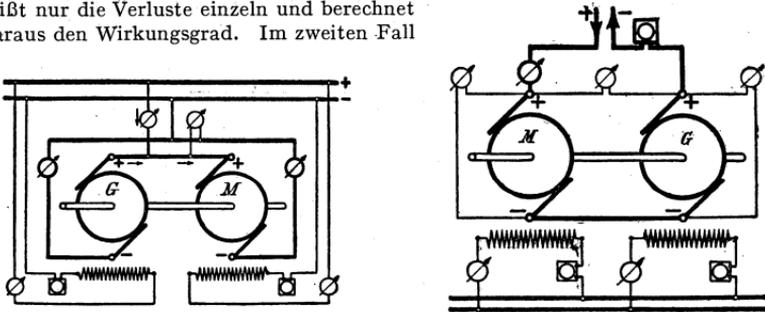


Abb. 108 und 109. Wirkungsgradmessung nach der indirekten elektrischen Methode.

werden in der Regel die sogenannten „zusätzlichen Verluste“ nicht berücksichtigt, so daß dabei ein günstigerer Wirkungsgrad herauskommt, als bei der direkten Methode.

Diese Ungenauigkeit berücksichtigen die REM neuerdings durch gewisse Zuschläge zu den gemessenen Einzelverlusten (REM § 63). Für Synchronmaschinen geben die REM (§ 62) Verfahren zur Messung der zusätzlichen Verluste an.

Ein anderes, sehr genaues Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung ist das Rückarbeitsverfahren (Kreisschaltung), das aber das Vorhandensein von zwei gleichen Maschinen zur Voraussetzung hat (REM § 58, Brion ETZ 1909, S. 965). Am bequemsten sind die Kapp'schen Schaltungen. Die beiden Maschinenanker werden miteinander gekuppelt, so daß sie mit derselben Drehzahl laufen müssen. Man reguliert die Erregungen derart, daß die eine Maschine als Motor, die andere als Generator arbeitet. In der Schaltung der Abb. 108 haben Generator und Motor dieselbe Spannung. Der Wirkungsgrad jeder Maschine ist $\sqrt{I_g/I_m}$. In Abb. 109 dagegen ist der Strom in beiden Maschinen der gleiche und der Wirkungsgrad wird $\eta = \sqrt{U_g/U_m}$ (U Klemmenspannung).

Theoretische Bedenken gegen die Kapp'schen Schaltungen werden vermieden durch die Schaltungen von Hutchinson und Blondel (s. Brion, a. a. O.). Über die Prüfung von Bahnmotoren nach dieser Methode Electrician Bd. 70, S. 727, 1913.

Das Rückarbeitsverfahren wird am häufigsten bei Gleichstrommaschinen verwendet, es ist aber auch für Wechselstrom-Synchronmaschinen anwendbar. Hierbei hängt die bei der Belastung auftretende Wirkkomponente davon ab, unter welchem Winkel die beiden Läufer miteinander gekuppelt werden.

(268) Einzelverluste. Nach REM § 58 werden unterschieden:

1. Die Leerverluste und zwar a) Verluste im Eisen und der Isolierung: Eisenverluste; diese Bezeichnung umfaßt also auch die, meist geringfügigen, dielektrischen Verluste, b) Verluste durch Lüftung, Lager- und Bürstenreibung (Reibungsverluste).

Diese Verluste ergeben sich aus der Leistungsaufnahme bei Leerlauf, wobei die durch den Leerlaufstrom verursachten Stromwärmeverluste in Abzug zu bringen sind. Zur Trennung der Eisen- und Reibungsverluste mißt man die Leeraufnahme bei verschiedenen Spannungen und gleichbleibender Drehzahl. Durch Extrapolation auf Nullspannung ergeben sich dann die Reibungsverluste (vgl. auch Richter, ETZ 1921, 1).

2. Die Erregerverluste ergeben sich durch die Messung von Erregerstrom und Spannung.

3. Die Lastverluste, nämlich Stromwärmeverluste in Anker- und Reihenschlußwicklungen, ergeben sich aus der Widerstandsmessung.

Übergangsverluste an Kommutator und Schleifringen. Es wird mangels genauere Messung ein Spannungsverlust für jede Bürste von 1 V für Kohle und Graphitbürsten, 0,3 V für metallhaltige Bürsten angenommen.

4. Die Zusatzverluste (s. oben).

Ein seltener angewendetes Verfahren zur Messung der Einzelverluste ist die Aufnahme der Auslaufkurve. (Deprez, C. R. Bd. 94, S. 861. — Routin, Electricien, Paris, Bd. 15, S. 42. — Dettmar, ETZ 1899, S. 203, 381. — Liebenow, ETZ 1899, S. 274. — Peukert, ETZ 1901, S. 393. — Ytterberg, ETZ 1912, S. 1158). — Imhof, Bull. Schweiz. E. V. 1918, S. 57. — Honsü, ETZ 1918, S. 435. — Knauer u. Schulze ETZ 1922, S. 1307). Der Anker einer im Laufe befindlichen Maschine enthält einen Arbeitsvorrat $A = \frac{1}{2} J \omega^2$, worin J das Trägheitsmoment, ω die Winkelgeschwindigkeit bedeutet. Hören äußere Zufuhr und Abgabe von Energie auf, so läuft der Anker weiter, und sein Verbrauch durch Reibung usw. ist

$$N = \frac{dA}{dt} = J \omega \frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 J n \frac{dn}{dt},$$

wobei ω nach und nach bis zum Stillstand abnimmt (n Drehzahl in der Minute). Man beobachtet ω zu verschiedenen Zeiten. Hierzu kann man das Tachometer nur verwenden, wenn dessen Arbeitsverbrauch den Versuch nicht beeinflusst. Dettmar empfiehlt, die Spannung im Anker unter Wirkung des remanenten Magnetismus zu benutzen und sie durch eine Messung am Anfang der Beobachtungsreihe auf das Tachometer zu beziehen. Auch kann man einen Umlaufzähler anlegen und jede Minute ablesen; man erhält dadurch angenähert die Geschwindigkeit für die Mitte der Minute.

Trägt man die Zeit als Abszisse, die Geschwindigkeit als Ordinate auf, so erhält man die Auslaufkurve. Die Tangente an die Kurve gibt $d\omega/dt$ für jeden Punkt. $\omega d\omega/dt$ ist die Subnormale (Vorsicht wegen Wahl der Einheiten von Abszissen und Ordinaten!). Durch Multiplikation mit J erhält man die Leistung N , die der Anker in jedem Augenblick zur Überwindung der Reibung usw. abgibt.

Läßt man die Maschine zunächst ohne Erregung mit abgehobenen Bürsten auslaufen, so erhält man das Drehmoment der Lager und Luftreibung in Abhängigkeit von der Drehzahl. Wiederholt man den Versuch, nachdem die Bürsten aufgelegt sind, so ergibt die Zunahme des Drehmomentes die Bürstenreibung. Wird bei einem dritten Versuch die Maschine erregt, so kommen noch die magnetischen Verluste hinzu. — Die Auslaufversuche müssen mit großer Sorgfalt angestellt werden, wenn man zuverlässige Resultate erhalten will.

Die in einer Maschine auftretenden Gesamtverluste lassen sich u. a. auch aus der Erwärmung des Kühlmittels (Luft oder Öl) berechnen. Dieses Verfahren ist für Turbogeneratoren vorgeschlagen worden (Barclay u. Smith, Electric

cian Bd. 82, S. 244). Besonders zweckmäßig ist es zur Messung der Verluste von großen Öl-Drosselspulen: Die bei Betrieb mit Nennleistung auftretende Ölerwärmung wird gemessen; dann wird die Spulenwicklung mit Gleichstrom gespeist und dessen Stärke so eingestellt, daß dieselbe Ölerwärmung eintritt. Die beim zweiten Versuch auftretenden J^2R Verluste sind dann gleich den Verlusten bei Nennbetrieb der Drosselspule. Auf andre Weise lassen sich diese Verluste wegen des äußerst niedrigen Leistungsfaktors (etwa 0,03) nicht genau messen.

(269) Charakteristik. Spannungsänderung der Generatoren und Änderung der Drehzahl der Motoren gehen aus den sogenannten Charakteristiken hervor (422). Die Leerlaufcharakteristik wird bei Nebenschluß- oder fremd erregten Maschinen aufgenommen; sie gibt die Klemmenspannung bei Leerlauf in Abhängigkeit vom Erregerstrom bei gleichbleibender Drehzahl und gestattet dadurch ein Urteil über die magnetische Sättigung der Maschine. Bei Wechselstrommaschinen wird außer der Leerlaufcharakteristik auch die Kurzschlußcharakteristik aufgenommen. Sie gibt die Stromstärke in der kurzgeschlossenen Ankerwicklung als Funktion des Erregerstroms an. Aus Leerlauf- und Kurzschlußkurven kann die Charakteristik bei einem beliebigen Leistungsfaktor bestimmt werden (477).

(270) Belastung von Wechselstrommaschinen. Wechselstrommaschinen werden am besten durch Synchronmotoren belastet, wobei durch geeignete Erregung und Belastung des Synchronmotors jeder gewünschte Leistungsfaktor erreichbar ist. Wenn zwei gleiche Maschinen zu prüfen sind, so benutzt man die eine als Synchronmotor zur Belastung der anderen.

(271) Leistungsfaktor. Dieser ist nach REM das Verhältnis der Wirkleistung zur Scheinleistung. Er ist demnach durch Leistungs-, Strom- und Spannungsmessung zu bestimmen.

Wenn zur Leistungsmessung die Aronsche Schaltung (Zweiwattmeter-Methode) (219 b) benutzt wird, so ergibt sich der Leistungsfaktor auch unmittelbar aus dem Verhältnis der beiden Wattmeterablesungen. Dieser Wert ist aber nur bei genau sinusförmigen Stromkurven und gleicher Belastung der 3 Phasen richtig. Andernfalls ergeben sich erhebliche Abweichungen.

(272) Kreisdiagramm des Induktionsmotors (516). Um dieses zeichnen zu können, wird zunächst der Magnetisierungsstrom (aus Spannung und Leerlaufverbrauch) in Abhängigkeit von der Spannung aufgenommen. Danach wird der Läufer festgebremst und kurz geschlossen und bis zu Spannungen, die etwa zwischen 5—10% der normalen liegen, Spannung, Strom und Verbrauch gemessen; daraus wird der ideale Kurzschlußstrom (für einen verlust- und widerstandslosen Motor) berechnet.

(273) Erwärmungsprobe. Maschinen für Dauerbetrieb werden so lange mit ihrer Nennleistung betrieben, bis ihre Temperatur den Endwert erreicht. Dies dauert bei kleineren und gut gelüfteten Maschinen etwa 2—3 Stunden, bei großen und besonders bei gekapselten Maschinen wesentlich länger. Gemäß REM § 32 soll jedoch die Prüfung nicht länger als 10 Stunden dauern. Um während der Prüfung festzustellen, ob die Endtemperatur erreicht ist, benutzt man am besten ein Thermometer in der ausströmenden Luft. Ein Verfahren zur Ermittlung der Enderwärmung bei abgekürzter Prüfung ist ebenfalls in der REM, § 32, angegeben. An derselben Stelle finden sich auch Angaben für die Prüfung von Maschinen für kurzzeitigen und aussetzenden Betrieb und die Durchführung der Erwärmungsmessungen (vgl. auch Ke i n a t h, E u. M 1922, S. 97, 113).

Bei der Massenprüfung kleinerer Maschinen begnügt man sich häufig damit, die Erwärmungsprobe bei einem Teil, z. B. jeder 10. Maschine, vorzunehmen. Bei den übrigen wird nur durch Messung der Widerstände, der Strom- und Leistungsaufnahme bei Leerlauf festgestellt, daß sie die gleichen Eigenschaften besitzen. Die einwandfreie Ausführung von Kurzschlußankern ist allerdings nur durch Belastung und Schlupfmessung festzustellen.

Transformatoren.

(274) Allgemeines. Für die Prüfung von Transformatoren gilt sinngemäß das bei Maschinen Gesagte. Alle Einzelheiten sind den „Regeln für die Bewertung und Prüfung von Transformatoren“ (RET) des Verbandes deutscher Elektrotechniker zu entnehmen (ETZ 1922, S. 666 u. 1443).

(275) Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad von Transformatoren ist im allgemeinen so hoch, daß er nur nach dem „Einzelverlustverfahren“ mit genügender Genauigkeit meßbar ist. Das Rückarbeitsverfahren (Kreisschaltung) ist ebenfalls anwendbar und wurde früher viel benutzt (vgl. Ayrton Sumner, Electrician Bd. 29, S. 615). Es setzt aber das Vorhandensein von zwei gleichen Transformatoren voraus und bietet gegenüber dem Einzelverlustverfahren keine Vorteile, da dieses bei Transformatoren alle im Betrieb auftretenden Verluste erfaßt. Man mißt die Leerlaufverluste (Eisenverlust) mittels Leistungsmesser bei Nennspannung und Nennfrequenz und die Wicklungsverluste (RET § 52). Hierunter versteht man die gesamten Stromwärmeverluste, die bei Nennstrom und Nennfrequenz in den Wicklungen und benachbarten Metallteilen auftreten, also neben dem „Ohmschen Verlust“ auch alle „zusätzlichen Verluste“. Gemessen wird der Wicklungsverlust durch die Leistungsaufnahme der Primärwicklung bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung mit Nennstrom und Nennfrequenz.

(276) Spannungsänderung. Die unmittelbare Messung des Unterschiedes der bei Leerlauf und Belastung auftretenden Sekundärspannungen ist meist zu ungenau. Man berechnet deshalb die Spannungsänderung aus der Kurzschlußspannung e_k und den Wicklungsverlust. $e_r \cdot e_k$ ist das prozentual ausgedrückte Verhältnis der bei Nennstrom und kurzgeschlossener Sekundärwicklung an den Primärklemmen auftretenden Spannung zur Primärnennspannung. e_r ist das prozentual ausgedrückte Verhältnis der unter denselben Verhältnissen auftretenden Leistung zur Nennleistung.

Die beim Phasenverschiebungswinkel φ auftretende Spannungsänderung ist dann (RET § 16)

$$e_{\varphi} = e_{\varphi'} + 100 - \sqrt{10000 - e_{\varphi}''^2},$$

hierin bedeutet

$$e_{\varphi'} = e_r \cos \varphi + e_s \sin \varphi$$

$$e_{\varphi}'' = e_r \sin \varphi - e_s \cos \varphi$$

Die Streuspannung ist

$$e_s = \sqrt{e_k^2 - e_r^2}$$

Vgl. auch das Diagramm von Kapp, ETZ 1895 S. 260.

(277) Erwärmung. Zur Durchführung der Erwärmungsprobe ist die Vollbelastung des Transformators notwendig. Diese erfolgt gewöhnlich in Kreisschaltung (siehe oben), wenn ein zweiter gleicher oder größerer Transformator vorhanden ist. Zur Einstellung der Belastung benutzt man am besten einen zwischen die beiden Transformatoren geschalteten Drehtransformator. Im übrigen wird auf RET § 33 und flg. verwiesen. Über Erwärmungsmessungen während des Betriebs s. Monsinger u. Childs, Gen. El. Rev. 1918, Heft 6. — Keith, E. u. M. 1922, S. 97, 113).

Messungen in elektrischen Anlagen.

(278) Isolationsmessung. Die Isolationsmessung hat den Zweck, zu ermitteln, ob eine Anlage derart ordnungsgemäß installiert ist, daß im Betriebe nennenswerte fehlerhafte Stromentweichungen ausgeschlossen sind. Dementsprechend tragen die Isolationsprüfungen meistens den Charakter von Strommessungen; trotzdem drückt man gewohnheitsmäßig der Kürze halber die Isolation in Ohm aus, indem man den Fehlerstrom i in die Betriebsspannung E dividiert und dadurch einen

Isolationswiderstand R erhält, dessen Höhe für die Güte der Installation maßgebend ist.

Bei der Prüfung der Anlagen wird festgestellt

1. die Isolation der Leitungen gegen Erde;
2. die Isolation der Leitungen gegeneinander.

Da die Isolationsprüfung die Ermittlung fehlerhafter Stromentweichungen im Betriebe bezweckt, sollen, wenn irgend möglich, die Isolationsmessungen mit der Betriebsspannung ausgeführt werden; ist die Prüfspannung wesentlich niedriger als letztere, so ergibt die Isolationsmessung erfahrungsgemäß keine genügende Sicherheit.

Die Isolationsprüfungen sollen bei Herstellung der Anlage, bei ihrer Abnahme und alsdann in geeigneten Zwischenräumen angestellt werden, deren Dauer sich nach den Betriebsverhältnissen der einzelnen Anlagen richtet. Bezüglich der Höhe des zu fordernden Isolationswiderstandes, der Häufigkeit der Messungen und der Art und Weise, wie sie vorgenommen werden sollen, sei auf die Errichtungs- und Betriebsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker verwiesen, sowie die zugehörigen Erläuterungen von Dr. C. L. Weber und der Vereinigung der Elektrizitätswerke. Für Niederspannungsanlagen ist als zulässige Stromentweichung für jede durch Herausnehmen von Sicherungen abtrennbare Teilstrecke einer Leitungsanlage 1 mA festgesetzt worden; bei einer Betriebsspannung von 110 V beträgt hiernach der mindestzulässige Isolationswiderstand 110 000 Ω , bei 220 V 220 000 Ω usw.

Ergibt sich bei der Isolationsprüfung ein Fehler, so ist dieser zunächst durch Zerlegung der Anlage in ihre Teilstrecken zu lokalisieren; sobald eine weitere Unterteilung der fehlerhaften Strecke nicht mehr möglich ist, kann der Ort des Fehlers nach den für Telegraphenleitungen üblichen Methoden bestimmt werden, sofern nicht eine Besichtigung der schadhafte Leitung die Fehlerstelle finden läßt (Apparate, Wanddurchgänge, feuchte Mauerstellen usw.).

Die Isolationsprüfungen können, je nachdem die Betriebsverhältnisse es gestatten, entweder an stromlosen oder an stromdurchflossenen Leitungen vorgenommen werden. Bezüglich der theoretischen Grundlagen dieser Messungen siehe R a p h a e l - A p t, „Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen“ (3. Auflage, Berlin 1923) und L i n k e r, „Elektrotechnische Meßkunde“ (3. Auflage, Berlin 1920). Die Meßverfahren für Isolationsmessungen und die hierfür gebräuchlichen Meßgeräte sind eingehend beschrieben im AEG-Hilfsbuch für elektrische Licht- und Kraftanlagen (Berlin 1921) und im Siemens-Handbuch (Berlin 1922).

(279) Isolationsmessung stromloser Leitungen. A. Mit besonderer Stromquelle. Das eine Ende der zu prüfenden Leitung wird mit dem einen Pole der Meßstromquelle verbunden, das andere Ende isoliert; der zweite Pol der Stromquelle wird an Erde gelegt oder mit der zugehörigen Nebenleitung verbunden, je nachdem die Isolation einer Leitung gegen Erde oder zweier Leitungen gegeneinander gemessen werden soll. Zeigt nun ein in den Stromkreis eingeschaltetes Meßinstrument den Strom i an, und ist die Spannung der Stromquelle = E , so ist der Isolationswiderstand der ganzen Anlage gegen Erde = E/i ; auch kann das Galvanometer, wenn es immer mit derselben konstanten Batterie verbunden ist, gleich nach Widerstand geeicht werden. In Einzelfällen, besonders bei hoher Isolation, können auch die für Telegraphenkabel üblichen Methoden Anwendung finden.

Der tragbare Isolationsprüfer besteht aus einem aperiodischen Drehspulengalvanometer, das mit einem Gleichstrominduktor zusammengebaut ist. Das Galvanometer reagiert nur auf Gleichstrom, die Apparate können aber auch zur Messung der Isolation von Wechselstromdurchflossenen Leitungen benutzt werden, wobei die Wechselstromspannung nicht wesentlich höher sein soll als die vom Induktor gelieferte elektromotorische Kraft.

Die den Ausschlägen entsprechenden Isolationswerte werden einer besonderen Tabelle entnommen. Der Meßbereich beträgt $10^8 \Omega$, die Induktoren werden normal bis 1000 V ausgeführt.

B. Mit der Betriebsspannung. Direkte Messungen von Isolationen gegen Erde mit der Betriebsspannung setzen voraus, daß der eine Pol der Betriebsmaschine geerdet ist oder ohne Nachteil für die Dauer der Messung geerdet werden kann, beispielsweise bei Dreileiteranlagen mit geerdetem Mittelleiter oder Zweileiteranlagen, bei denen beide Pole von Erde isoliert sind. Die zu prüfende Leitung wird mit dem einen Pol des Netzes unter Zwischenschaltung eines Meßinstrumentes, wozu ein Spannungsmesser besonders sich eignet, verbunden, der zweite Pol, wenn nicht betriebsmäßig geerdet, an Erde gelegt. Der Spannungsmesser zeige dabei E_1 Volt; sein Widerstand sei $= g$, die Betriebsspannung $= E$. Dann ist der Isolationswiderstand

$$R = \frac{g \cdot (E - E_1)}{E_1}.$$

Will man die Isolation zweier Leitungen gegeneinander prüfen, so verbinde man die eine Leitung direkt mit dem einen, die zweite unter Einschaltung des Spannungsmessers mit dem anderen Pole; erhält man hierbei unter der Betriebsspannung E den Ausschlag E_1 , so berechnet sich die gesuchte Isolation nach der gleichen Formel wie oben bei der Messung gegen Erde.

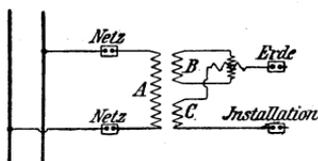


Abb. 110. Isolationsprüfer für Wechselstrom.

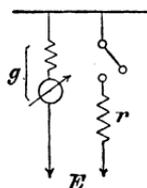


Abb. 111. Nebenschlußmethode.

Die unmittelbare Prüfung mit dem Spannungsmesser gegen Erde ist im allgemeinen nur bei Gleichstromanlagen zugänglich, sie versagt bei Wechselstromnetzen, weil hierbei eine Erdung des einen Poles meist nicht möglich ist. Durch Transformation kann man sich aber hierbei Einrichtungen schaffen, die die Erdung auf den Meßstromkreis beschränken. Das von der AEG nach diesem Prinzip gebaute Meßinstrument besteht aus einem Meßtransformator mit einer primären (A) und zwei sekundären Wicklungen (B, C); A (Abb. 110) wird an das Netz angeschlossen, die eine der sekundären (B) mit der festen Spule des Dynamometers verbunden, die andere (C) einerseits mit der zu untersuchenden Leitung (Klemme „Installation“), andererseits über die bewegliche Spule des Dynamometers mit Erde; diese letztere Wicklung hat die gleiche Windungszahl wie die primäre, die Windungszahl der sekundären Wicklung B wird so gewählt, daß der Strom in der festen Spule stark genug wird. Zur Messung der Betriebsspannung werden die Klemmen „Installation“ und „Erde“ durch einen Draht verbunden. Die Skala zeigt Volt und Ohm; bei der Messung mit einer Betriebsspannung, welche nicht der Ohmskala entspricht, wird der Isolationswiderstand nach der oben angegebenen Formel berechnet.

In ausgedehnten Leitungsnetzen, besonders bei Erdkabeln, werden die Ergebnisse der Wechselstrommessung durch die Kapazitätsströme beeinflusst. In Anlagen kleineren Umfanges können die hierdurch entstehenden Meßfehler vernachlässigt werden.

Die vielseitigste Anwendungsmöglichkeit gewähren die Universal-Kurbelinduktoren. Sie ermöglichen sowohl Spannungs-, wie auch Isolationsmessungen in Gleichstrom- und Wechselstromanlagen. Die Isolationsmessungen können entweder mittels der Betriebsspannung oder mittels der vom eingebauten Kurbelinduktor gelieferten Spannung ausgeführt werden; die Höhe der vom Induktor erzeugten Spannung kann mittels des eingebauten Voltmeters kontrolliert werden. Der Isolationswiderstand wird an der unmittelbar in Ohm geteilten Skala abgelesen.

(280) Isolationsmessung an stromführenden Leitungen. Solche Messungen, d. h. die Feststellung fehlerhafter Stromentweichungen während des Betriebes, sind mit großen Schwierigkeiten verbunden, sie versagen praktisch vollkommen in großen Anlagen, weil die Fehlerströme im Verhältnis zum Gesamtstrom der Anlage verschwindend klein sind. Sie machen sich auch vielfach durch Störungen (Telephonstörungen usw.) weit eher bemerkbar, als sie der Messung zugänglich sind.

Für Anlagen geringerer Größe sind unter Umständen Methoden verwendbar, die sich auf Strommessung stützen¹⁾. Eine solche ist die Nebenschlußmethode von Frölich. An irgendeinen Punkt des Leitungsnetzes legt man ein Voltmeter (Widerstand g einschl. Vorschaltung) und mißt die Spannung gegen Erde = E_1 . Darauf legt man neben das Voltmeter einen Nebenschluß r und mißt abermals die Spannung des Punktes gegen Erde = E_2 (Abb. 111). Dann ist der Isolationswiderstand R gegeben durch

$$\frac{1}{R} = -\frac{1}{g} + \frac{1}{r} \cdot \frac{E_2}{E_1 - E_2}.$$

Bequem ist es, r so lange zu verändern, bis $E_2 = \frac{1}{2}E_1$; dann hat man

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} - \frac{1}{g}.$$

Wegen der bereits erwähnten Schwierigkeit genauer Messung begnügt sich die Praxis meist mit einfachen Anzeigevorrichtungen, die wenigstens in kleinen Anlagen ein Urteil über den jeweiligen Isolationszustand (Erdschluß) gestatten.

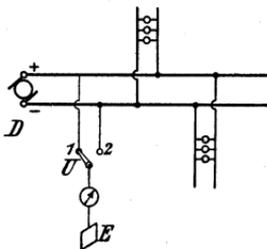


Abb. 112. Erdschlußanzeiger.

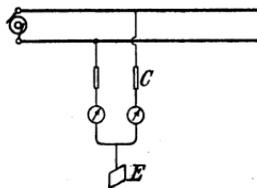


Abb. 113. Dauernde Isolationskontrolle.

Der Erdschlußanzeiger besteht aus einem stromanzeigenden Apparat, dessen eine Klemme mit Erde (Wasserleitung), die andere mit einem Pol der Maschine verbunden wird.

In Abb. 112 bedeutet D die Dynamomaschine; in die Erdleitung wird ein Voltmeter eingeschaltet; liegt in der positiven Leitung ein Isolationsfehler, so zeigt sich ein Ausschlag, wenn die Erdleitung mit Hilfe des Umschalters U mit dem negativen Pol der Maschine verbunden wird, dagegen nicht, wenn man die Erdleitung mit dem positiven Pol verbindet. Der Grad des Ausschlags deutet die Höhe

¹⁾ Näheres siehe: Raphael-Apt, Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen, Berlin 1923.

des Erdschlusses an. Eine dauernde Kontrolle des Isolationszustandes erhält man, wenn zwischen jede Leitung und Erde ein Anzeiger geschaltet wird (Abb. 113). Die Anzeige kann entweder akustisch mittels einer Glocke oder optisch mittels Glühlampe, Schauzeichen oder Voltmeter erfolgen. Die Voltmeter-Skala kann unmittelbar in Ohm geteilt sein.

Anleger von Dietze. Für Wechselstromanlagen dient dieser von Hartmann & Braun hergestellte Apparat zum schnellen Aufsuchen von Isolationsfehlern. Er besteht (Abb. 114) aus einem lamellierten Eisenkern, der, aufgeschnitten und mit Scharnieren versehen, nach Art einer Zange geöffnet werden kann, durch eine Feder aber von selbst sich wieder schließt. Die Kernhälften tragen Induktionsspulen, an die ein Telephon angeschlossen wird. Zum Aufsuchen eines Erdschlusses wird der fehlerhafte Pol vorsichtig, d. h. unter Einschaltung eines entsprechenden Widerstandes, geerdet, hierauf der Anleger der Reihe nach um die zugänglichen Teile der Leitungen gelegt, beispielsweise in der Nähe der Schalttafeln. Der Fehlerstrom macht sich dann im Telephon durch Brummen bemerkbar; schweigt das Telephon, so ist die Fehlerstelle überschritten und kann nunmehr in dem rückwärts liegenden Teile der Leitung nach und nach enger eingegrenzt werden.

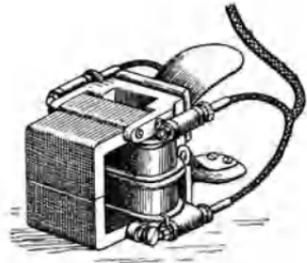


Abb. 114. Anleger von Dietze.

Anstelle des Fernhörers kann auch ein Amperemeter an den Anleger angeschlossen und damit der Strom in der Leitung gemessen werden, die vom Eisenkern des Anlegers umschlossen ist. Der Anleger dient dann als Stromwandler, ohne daß zu seiner Einschaltung eine Unterbrechung der zu untersuchenden Leitung erforderlich wird.

(281) Selbsttätige Meldung der Isolationsfehler in großen Zentralen. 1. System von Agthe und Kallmann (Raphael-Apt, Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen). Um einen in dem Leitungsnetze aufgetretenen Fehler sofort nach Entstehen in der Zentrale zu signalisieren und seinen Ort zu bestimmen, benutzt man die in Speise- und Verteilungsleitungen vorhandenen Prüfdrähte, welche bezirksweise untereinander verbunden werden, so daß jeder in einer Speiseleitung die Zentrale verlassende Prüfdraht nur in einem begrenzten Gebiete, nämlich dem Versorgungsgebiete der Speiseleitung, sich verzweigt. An einer besonderen Prüfdrachtschalttafel in der Zentrale laufen die Prüfdrähte zusammen und sind mit Meldevorrichtungen versehen; sobald eine solche anspricht, erkennt man, in welchem Bezirk die Störung liegt, und kann dort leicht durch Trennen der Prüfdrähte das fehlerhafte Kabel finden. Jeder Prüfdraht wird über eine Relaispule mit dem einen Pol des Leitungsnetzes verbunden, während das zugehörige Kabel am andern Pol liegt. Wenn ein Fehler im Kabel auftritt und die Isolation zwischen Kabel und Prüfdraht hierdurch zerstört wird, so wird durch den auftretenden Strom das in die Prüfdrahtleitung eingeschaltete Relais zum Ansprechen gebracht und so der Fehler gemeldet.

2. Das Differentialschutzsystem von Merz und Price (Kuhlmann, ETZ 1908, S. 330) bewirkt die selbsttätige Ausschaltung fehlerhafter Kabelstrecken in Hochspannungsanlagen. Am Anfang und Ende des zu überwachenden Kabels ist jeweils ein Stromwandler eingeschaltet. Die Sekundärwicklungen beider Stromwandler sind durch ein Hilfskabel gegeneinander geschaltet. Im Stromkreis des Hilfskabels fließt erst dann ein Strom, sobald das Hauptkabel fehlerhaft geworden ist; dieser Strom bewirkt mit Hilfe eines in das Hilfskabel eingeschalteten Differentialrelais die Abschaltung des Hauptkabels. Gleichzeitig kann der Fehler auch in der Zentrale selbsttätig gemeldet werden.

3. Das AEG-Kabelschutzsystem von Pfannkuch (AEG-Mitteilungen, 1920, Nr. 9) kontrolliert die in unmittelbarer Nachbarschaft der Leiteroberflächen liegenden Isolationsschichten dauernd auf ihre Unversehrtheit. Die einzelnen Drähte der Decklage des Kabels werden durch Umspinnen mit Papier gegeneinander und gegen den Kern des Leiters schwach isoliert. Zwischen benachbarten Drähten der Decklage wird betriebsmäßig eine geringfügige Spannungsdifferenz unterhalten. Sie wird mit Hilfe eines Serientransformators am Anfang der zu schützenden Leitung erzeugt und an deren Ende auf dieselbe Weise wieder ausgeglichen. Bei Veränderungen in der Isolierschicht des Kabels wird die schwache Isolierung zwischen den äußeren Leitern zerstört. Durch die zwischen ihnen herrschende Spannung kommt ein Strom zustande, der Relais zum Ansprechen bringt und den vorhandenen Fehler schon im Entstehen meldet. Durch die Unterteilung der Leiter in drei voneinander isolierte Teilquerschnitte wird das Bestimmen des Fehlerorts wesentlich erleichtert.

4. Bei dem von Höchstädter angegebenen Lyprow-Kabelschutz der SSW (ETZ 1921, S. 1154; 1922, S. 1029) wird der Strom in dem zu schützenden Kabel zwischen dem Hauptleiter und einem im Kern des Hauptleiters angeordneten und von ihm isolierten Nebenleiter verteilt. Die Aufrechterhaltung des Stromgleichgewichts zwischen Haupt- und Nebenleiter wird durch Differentialstromwandler am Anfang und Ende des zu schützenden Kabels überwacht; bei Störung des Gleichgewichts wird ein Relais betätigt und das Kabel abgeschaltet. Damit auch bei einer Zerstörung der Isolation zwischen Haupt- und Nebenleiter und damit verbundener Beschädigung des Kabels die Meldung und Auslösung erfolgt, wird mittels eines Vorspannungstransformators zwischen Haupt- und Nebenleiter eine Spannung erzeugt. Bei Kurzschluß zwischen beiden Leitern wird dadurch ebenfalls das Stromgleichgewicht aufgehoben und das Relais zum Ansprechen gebracht.

(282) Strom- und Spannungsmessung. a) Schalttafelinstrumente. Für Gleichstromanlagen werden fast ausschließlich Drehspuleninstrumente nach Deprez-d'Arsonval oder Weston (159, 164) benutzt, für Wechselstrom hauptsächlich elektrodynamische (167) oder Hitzdrahtinstrumente (172). Durch Verwendung von Nebenschlüssen bei Gleichstrom (197, 198) und von Stromwandlern (229) bei Wechselstrom ist für die Strom- und Leistungsmessung die Heranführung der Stromschiene an die Schalttafel nicht mehr nötig; es genügen hierfür dünne Meßleitungen.

Zur Messung der Spannung hochgespannter Wechselströme werden meist Meßwandler, gelegentlich auch elektrostatische Voltmeter für Spannungen bis zu 10 kV benutzt. Auch die Spannungsspulen der Leistungsmesser und Zähler werden an die Meßwandler angeschlossen (Abb. 97, 120). Für Meßinstrumente, die nur in einem engen Meßbereich gebraucht werden (z. B. Spannungsmesser zwischen 90 und 120 V oder 180 und 240 V) wird die Skala so eingerichtet, daß sie in diesem Bereich besonders weite Teilung besitzt oder es werden Instrumente mit unterdrücktem Nullpunkt und entsprechend erweiterter Teilung benutzt. Von Bedeutung für Wechselstromanlagen sind auch Meßinstrumente zur Messung des Blindstromes ($I \sin \varphi$), früher manchmal Phasometer genannt.

b) Schreibende Instrumente. Zur dauernden Überwachung der Betriebsspannung und der Belastungsverhältnisse werden selbstregistrierende Voltmeter, Amperemeter und Wattmeter benutzt (178). Der Zeiger des Instruments trägt hierbei eine kleine Füllfeder und zeichnet auf einem Papierstreifen, der von einem Uhrwerk vorwärts bewegt wird, den Verlauf der Spannung usw. auf.

c) Signallaappare. Zur selbsttätigen Regelung der Spannung werden Regulierwiderstände und Drehtransformatoren indirekt mit Hilfe von Zwischenrelais durch Kontaktvoltmeter gesteuert. Auch können diese zur Betätigung optischer oder akustischer Signale für die Anzeige zu niedriger und zu hoher Spannung benutzt werden. Die schwingenden Teile der Kontaktvoltmeter müssen erhebliche Trägheit und gute Dämpfung besitzen.

Die Schaltung eines solchen Kontaktvoltmeters der Firma Dr. Pau Meyer A.-G. ist aus dem Schema Abb. 115 ersichtlich. In einer an die Leitungsanlage angeschlossenen Magnetspule schwingt ein Anker, der an dem einen Ende eines Hebels befestigt ist. Das andere Ende ist als Kontaktarm ausgebildet und liegt zwischen zwei Kontakten, an die zwei verschiedenfarbige Glühlampen und im weiteren Verlaufe ein Wecker angeschlossen sind. Der Drehpunkt des Hebels ist mit dem Minuspole und die Endklemme des Weckers mit dem Pluspole des Netzes verbunden. Bei zu hoher oder zu tiefer Spannung legt sich der Kontaktarm an den rechten bzw. linken Kontakt und betätigt hierdurch die betr. Signallampe und den Wecker.

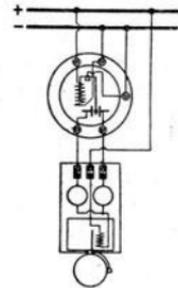


Abb. 115.
Kontaktvoltmeter.

d) **Strom- und Spannungsanzeige durch Signallampen.** Wo nur eine Anzeige von Spannungen oder Strömen benötigt wird, ist die Verwendung von Glühlampen hierfür am einfachsten. Zur Spannungsanzeige werden Glühlampen für normale Spannung und möglichst geringen Verbrauch benutzt. Mit Rücksicht auf ihren sehr geringen Verbrauch von 3 bis 4 W bei 220 V (bei Gleich- und Wechselstrom) und von 2 bis 2½ W bei 110 V (nur für Wechselstrom) sind die Glimmlampen für Signalzwecke besonders geeignet.

e) Zur Anzeige von Stromstärken dienen die **Stromzeiglampen** der Osram G. m. b. H. (El. Anz. 1921, S. 1060). Sie werden mit den Stromverbrauchern in Reihe geschaltet und verzehren bei normaler Spannung etwa 1 V, Stromzeiglampen werden für verschiedene Stromstärken von 0,2 bis 10 A hergestellt; jede Type kann für Stromstärken innerhalb des Bereiches 1 : 2 benutzt werden. In bereits installierten Anlagen können sie im Anschluß an Steckdosen mittels Fassungssteckern, in Verbindung mit Sicherungspatronen des zweiteiligen Sicherungssystems mittels besonderer Schraubkappen, benutzt werden.

Messungen an Erdleitungen.

(283) Die Messungen können entweder mit Hilfe gleichgerichteter Ströme oder mit Wechselströmen vorgenommen werden. Verwendet man Gleichstrom, so nimmt man zweckmäßig eine starke Batterie und führt jede Messung auch mit umgekehrter Stromrichtung aus; in diesem Falle wird aus den beiden Messungen das arithmetische Mittel genommen. Wegen der polarisierenden Wirkung des Gleichstroms ist die Messung mit Wechselstrom vorteilhafter; die in (193) angegebene Methode, das Telefon in Verbindung mit der Brücke, ist hier zweckmäßig.

(284) **Methoden von Schwendler und Ayrton.** Je 7 bis 10 m weit von der zu untersuchenden Erdplatte entfernt, werden zwei andere Platten in die Erde eingegraben. Die Übergangswiderstände der drei Platten seien P_1 , P_2 , P_3 . Von je zweien dieser Platten wird der Gesamtwiderstand R gemessen.

Aus

$$R_{12} = P_1 + P_2; \quad R_{13} = P_1 + P_3; \quad R_{23} = P_2 + P_3,$$

und

$$R_{12} + R_{13} + R_{23} = S,$$

ergibt sich

$$P_1 = \frac{S}{2} - R_{23}; \quad P_2 = \frac{S}{2} - R_{13}; \quad P_3 = \frac{S}{2} - R_{12}.$$

Diese Messungen lassen sich nach einer ähnlichen Anordnung sehr bequem mit besonderen tragbaren Meßeinrichtungen, Telefonbrücken genannt, von Hartmann und Braun, Mix und Genest u. a. ausführen. Die Einrichtungen enthalten eine vollständige Wheatstonesche Brücke, Induktionsapparat nebst Trockenelementen und Telefon.

Die kleine Telephonbrücke von Siemens & Halske (ETZ 1893, S. 478) benutzt keinen Wechselstrom, sondern unterbrochenen Gleichstrom, der mit Hilfe eines Kontaktträdhens erzeugt wird; das letztere wird bewegt, so lange die Kurbel gedreht wird, mit der man den Kontakt an dem ausgespannten Draht verschiebt; so lange die Kurbel ruht, hört man demnach kein Geräusch im Telephon.

(285) Methode von Nippoldt. Man legt in der Nähe, aber in mindestens 10m Entfernung von der zu prüfenden Erdleitung wagrecht in das Grundwasser eine Hilfsplatte und ermittelt die Summe R_1 der Widerstände beider Erdleitungen. Darauf ersetzt man die Hilfsplatte durch eine kleinere von beiläufig halb so großen Abmessungen und mißt abermals die Summe R_2 der beiden Widerstände. Hat der benutzte Leitungsdraht den Widerstand r (meist zu vernachlässigen), und ist das Verhältnis des Ausbreitungswiderstandes der kleineren zu dem der größeren Platte = v , welches ein- für allemal bestimmt werden muß, so ist der gesuchte Widerstand

$$P = \frac{R_1 v - R_2}{v - 1} - r.$$

(286) Methode von Wiechert (ETZ 1893, S. 726). Abb. 116. Die zu messende Erdleitung sei x ; eine zweite Erdleitung y sei entweder vorhanden oder werde für die Messung hergestellt. An einer anderen Stelle wird in eine gut angefeuchtete Stelle des Erdreichs ein starker Eisendraht eingetrieben, an dem man oben eine Leitung befestigt. S ist eine Wechselstromquelle, AB der ausgespannte Draht oder dergl. einer Wheatstoneschen Brückenordnung. Der Umschalter u wird einmal links, einmal rechts gestellt und die beiden Stellungen des Kontaktes abgelesen.

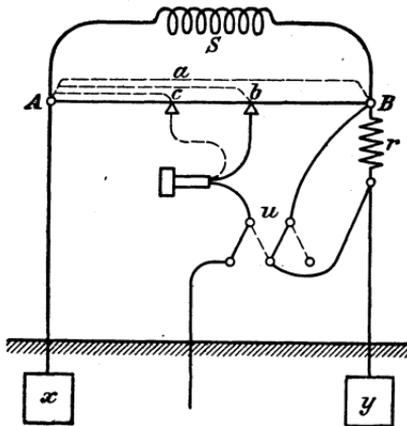


Abb. 116. Erdleitungswiderstand nach Wiechert.

Bei der von Wiechert angegebenen Anordnung fehlen dem Umschalter u die beiden Kontakte rechts. Es ergibt sich

$$x = r \cdot \frac{b}{a-c}, \quad y = r \cdot \frac{c-b}{a-c}.$$

Wenn man an der Teilung von AB das Verhältnis der verglichenen Widerstände ablesen kann, und wenn die Ablesungen A_l und A_r für Umschalter u links und rechts sind, so ist:

$$x = r \cdot A_l \frac{A_r + 1}{A_l + 1}, \quad y = r \cdot \frac{A_r - A_l}{A_l - 1}$$

Bei der Anordnung der Abb. 116 ist

$$x = r \cdot \frac{c}{a-c} \cdot \frac{b}{a}, \quad y = r \cdot \frac{c}{a-c} \cdot \frac{a-b}{a} \quad \text{und}$$

$$x = r \cdot A_r \cdot \frac{A_l}{A_l + 1}, \quad y = r \cdot \frac{A_r}{A_l + 1}$$

r macht man in der Regel = 10 Ω .

Die Methode ist sehr empfehlenswert.

Tragbare Apparate in Form der Telephonmeßbrücke werden von Hartmann & Braun gebaut.

Verbrauchsmessung.

(287) Elektrizitätszähler messen die in einem Stromkreis oder Stromsystem verbrauchte elektrische Arbeit; ihre Angaben werden benutzt, um die Vergütung für die von einer Zentrale an einen Abnehmer abgegebene elektrische Arbeit zu berechnen. Je nach der Einheit, in der die Zähler ihre Angaben machen, unterscheidet man (Kilo-)Wattstundenzähler, Amperestundenzähler und Zeitzähler.

Ist N die konstante Leistung, die in einem Stromsystem verbraucht wird, t die Zeit, während der sie verbraucht wird, so mißt der Wattstundenzähler die Größe Nt , und zwar in Wattstunden bzw. Kilowattstunden. Diese Zähler besitzen Spannungspfade und Hauptstrompfade, die je nach Art des Stromsystems wie die entsprechenden Leistungsmesser geschaltet werden (219).

Ist die Betriebsspannung konstant, so ist die Leistung bei Gleichstrom proportional der Stromstärke; für diesen Fall genügt also ein Amperestundenzähler, der somit nur einen Hauptstrompfad, keinen Spannungspfad besitzt. Seine Angaben multipliziert mit der Betriebsspannung ergeben die gesuchten Wattstunden. Es ist gesetzlich zulässig, daß die Ablesungen eines Amperestundenzählers auch direkt in Wattstunden erfolgen, sofern auf dem Zähler sich der Vermerk findet, bei welcher Betriebsspannung er gebraucht werden darf.

Ist an einen Stromkreis von konstanter Spannung eine konstante Belastung angeschlossen, so ist auch die beim Einschalten abgegebene Leistung konstant; es genügt daher, lediglich die Zeit der Einschaltdauer mittels einer geeigneten Uhr zu messen. Dies geschieht durch die Zeitzähler.

Um eine Übervorteilung der Zentrale auszuschließen, werden vielfach Strombegrenzer in Verbindung mit Zeitzählern angewandt. Wird eine größere Stromstärke eingeschaltet, als ausbedungen, so tritt ein in kurzen Intervallen arbeitender periodischer Ausschalter in Tätigkeit (ETZ 1910, S. 51).

Anforderungen an einen Elektrizitätszähler: Seine Angaben müssen in den gesetzlichen Einheiten erfolgen, dürfen gewisse Verkehrsfehlergrenzen nicht überschreiten (295) und sollen möglichst unempfindlich sein gegen Änderungen der Temperatur und Feuchtigkeit, gegen Kurzschlüsse, Staub, Stöße und Erschütterungen; er soll einen möglichst lautlosen Gang haben, verschleißbar, plombierbar und leicht transportabel sein, dabei verhältnismäßig kleine Abmessungen und geringen Eigenverbrauch haben.

(288) Elektrolytische Zähler benutzen zur Verbrauchsmessung die aus einem Elektrolyten durch den Strom niedergeschlagene Metallmenge; sie sind also Ampere-stundenzähler und nur für Gleichstrom brauchbar.

Beim Stiazähler der Firma Schott u. Gen. in Jena (ETZ 1909, S. 784 u. 976; 1910, S. 624, 980; 1914, S. 739) wird die Anode durch eine ringförmige Quecksilberberrinne gebildet, welche einen als Kathode dienenden Kegel aus Iridium umschließt. Als Elektrolyt dient eine Lösung von Jodquecksilber und Jodkalium in Wasser. Das von der Kathode abtropfende Quecksilber wird in einer geteilten Röhre aufgefangen. Das den Zähler enthaltende Glasgefäß ist vollständig zugeschmolzen. Ist das geteilte Rohr nahezu vollgelaufen, so muß das Quecksilber durch Kippen in den Speiser und die Quecksilberberrinne zurückgebracht werden. Für größere Stromstärken wird der Zähler in den Nebenschluß zu einem geeigneten Widerstand gelegt. Dabei wird vor das Zersetzungsrohr ein Widerstand geschaltet, der teils aus Manganin, teils aus Reinnickeldraht besteht; letzterer um den negativen Temperaturkoeffizienten des Elektrolyten zu kompensieren.

Zur Eichung dient die Formel:

$$m \left(1 + \frac{r}{R} \right) = 3,726 Q.$$

Darin bedeutet

m Gewicht des Quecksilbers von dem bis zum obersten Skalenstrich gefüllten Meßrohr in g,

Q Zahl der Amperestunden, welche dem obersten Skalenteil entspricht,

R Nebenwiderstand,

r Widerstand des Elektrolyten und Vorwiderstand.

Über einen Wasserstoffzähler der Solarzählerwerke ETZ 1914, S. 739.

(289) Pendelzähler (Aron). Die Wirksamkeit der Pendelzähler besteht darin, daß die Schwingungsdauer eines Pendels durch die elektromagnetischen oder elektrodynamischen Kräfte des Arbeitsstromes verändert wird.

Zwei einander gleiche und genau gleichgehende Uhren arbeiten mittels eines Planetenrades auf ein Zeigerwerk, das die Gangdifferenz der beiden Uhren anzeigt. Das eine Pendel trägt eine dünnröhrtige Spule mit horizontal liegender Windungsfläche, die unter Zwischenschaltung eines geeigneten Vorwiderstandes an die Betriebsspannung angeschlossen wird (Spannungspfad). Unterhalb der Spannungsspule liegt mit paralleler Windungsebene die Hauptstromspule, und zwar mit solchem Wicklungssinn, daß s 'e bei Stromdurchgang den Gang des einen Pendels beschleunigt, den des anderen verzögert. Die Gangdifferenz ist angenähert proportional dem Verbrauch. Wird die Spannungsspule durch einen Dauermagnet ersetzt, so erhält man einen Amperestundenzähler.

Die Pendel pflegen so kurz zu sein, daß sie nach dem Aufziehen der Uhrwerke von selbst in Schwingungen kommen; das Aufziehen wird selbsttätig auf elektromagnetischem Wege besorgt. Eine Umschaltvorrichtung verhindert den Leerlauf. Da der Zähler auf dem dynamometrischen Prinzip beruht, so ist er für Gleichstrom und Wechselstrom brauchbar, und zwar ist er für Ein- und Mehrleitersysteme, Ein- und Mehrphasenstrom ausgebildet. Bei Wechselstrom werden für höhere Spannungen und große Stromstärken Spannungs- und Stromwandler angewandt (229).

(290) Motorzähler. 1. Elektrodynamische und elektromagnetische Motorzähler. Die Wattstundenzähler dieser Klasse (Abb. 117) bestehen aus einer oder mehreren einander parallel gestellten Hauptstromspulen, die das Feld für den Anker bilden; der Anker bildet zusammen mit einem geeigneten Vorwiderstand den Spannungspfad. Das den Anker antreibende Drehmoment ist daher proportional $E I$. Auf der Ankerachse sitzt eine Aluminium- oder Kupferscheibe, die sich zwischen den Polen eines Dauermagnetes dreht (in der Abb. nicht gezeichnet); das dadurch hervorgerufene bremsende Drehmoment ist der Drehgeschwindigkeit proportional. Werden im stationären Zustand antreibendes und bremsendes Drehmoment einander gleich, so ist die Drehgeschwindigkeit des Ankers proportional der Leistung, d. h. ein mit der Ankerachse verbundenes Zählwerk gibt bei geeigneter Übersetzung der Räder die elektrische Arbeit an.

Um die Reibung in Lager, Bürsten und Zählwerk zu kompensieren, ist in den Spannungspfad eine feststehende Spule eingeschaltet, welche so angeordnet ist, daß sie die Wirksamkeit der Hauptstromspulen unterstützt; es wird also auch bei stromloser Hauptstromspule ein Drehmoment auf den Anker ausgeübt, das die Reibung kompensieren soll. Um Leerlauf des Zählers zu verhüten, wird eine Hemmvorrichtung angebracht. Diese besteht z. B. in einem an der Drehachse befestigten Eisenstift, der von dem Bremsmagnete beim Vorübergehen festgehalten wird.

Ein die Betriebsicherheit des Zählers gefährdender Teil ist der Kollektor des Ankers; damit die Bürstenreibung möglichst gering und gleichförmig wird, macht man den Kollektordurchmesser möglichst klein und sorgt dafür, daß die Bürsten leicht mit gleichmäßiger Federung aufliegen. Kollektorlamellen und Bürsten werden am besten aus Silber oder Gold hergestellt. Neuerdings werden von einigen Firmen Bürsten und Kollektor durch besondere Öffnungen der Zählerkappe leicht zu-

gänglich gemacht; oder sie können auch ausgewechselt werden, ohne daß die Justierung des Zählers verändert wird (Siemens-Schuckertwerke).

Die Zähler werden durch fremde Magnetfelder, z. B. durch diejenigen benachbarter Starkstromleitungen in ihren Angaben beeinflusst. Deswegen ist, namentlich bei Zählern für große Stromstärken, die Lage der Hauptstromzuleitungen vorzuschreiben und die Nähe starker fremder Ströme nach Möglichkeit zu vermeiden. Dieser Einfluß kann auch durch astatiche Anker kompensiert werden.

Magnetmotorzähler. Das Feld dieser Zähler wird von einem kräftigen Dauermagnete gebildet. Der Anker liegt im Nebenschluß zu einem im Arbeitsstromkreis eingeschalteten Widerstand; die Spannung an den Ankerklemmen ist also proportional der Hauptstromstärke, beträgt aber nur Bruchteile eines Volt. Die Zähler haben keinen Spannungskreis, sind also Amperestundenzähler. Da die Spannung am Kollektor sehr gering ist, bringen Übergangswiderstände an den Bürsten leicht Störungen hervor. Um diesen Mißstand zu beseitigen, verwendet die AEG sogenannte Wackelbürsten, die sich je nach der Stromstärke an verschiedene Stellen des Kollektors anlegen (ETZ 1908, S. 608; 1914, S. 997).

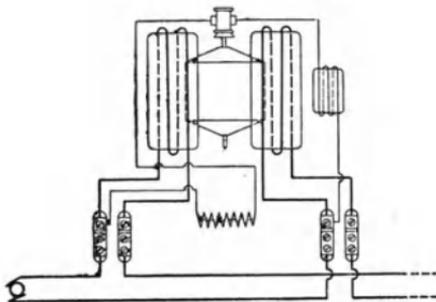


Abb. 117. Motorwattstundenzähler mit Kollektor.

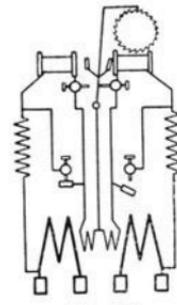


Abb. 118.
Wendemotorzähler.

Quecksilbermotorzähler. In einer mit Quecksilber gefüllten flachen Dose schwimmt eine Kupferscheibe, die bis auf eine Stelle im Mittelpunkt und den Scheibenrand emalliert ist. Die Scheibe befindet sich zwischen den Polen von Dauermagneten, die die Dose umfassen. Der Arbeitsstrom wird der Mitte der Scheibe zugeführt, fließt zwischen den Magnetpolen durch und verläßt sie am Rande. Die Kraft des Magnetfeldes auf den Strom versetzt die Scheibe in Umdrehungen, die auf ein Zählwerk in der üblichen Weise übertragen werden. Da andererseits die Magnete auch bremsend auf die Scheibe wirken, so erhält man einen gebremsten Amperestundenzähler, der keinen Kollektor besitzt. Die Reibung des Quecksilbers wird durch Zusatzspulen, die auf den Dauermagneten angebracht sind, kompensiert. Diese Zähler besitzen eine große Anlaufempfindlichkeit. Für größere Stromstärken werden sie mit Nebenschlüssen gebaut. Zähler ohne Nebenschluß haben einen großen Temperaturkoeffizienten (0,4 % für 1°C); mit Nebenschluß ist die Abhängigkeit von der Temperatur kleiner. (Deutsche Ferranti-Gesellschaft; Solar-Zählerwerke Hamburg. Isariawerke, ETZ 1911, S. 684; 1913, S. 1234; 1914, S. 64).

Wendemotorzähler (Abb. 118) sind gebaut worden, um den Kollektor der Motorzähler unnötig zu machen. Bei dem von der AEG ausgeführten Modell besteht die Spannungsspule aus zwei nebeneinander liegenden, einander gleichen Wicklungen und ist drehbar zwischen zwei Hauptstromspulen angeordnet. Die Drehung wird durch zwei Anschläge begrenzt, bei deren Berührung ein Relais eingeschaltet wird; dieses Relais bewirkt, daß immer nur eine Hälfte der beiden Spannungswicklungen vom Strom durchfließen wird, wobei die Stromrichtungen,

die in den beiden Hälften fließen können, einander entgegengesetzt gerichtet sind. Die Folge davon ist, daß im Moment des Anschlages die Krafrichtung umgekehrt wird, so daß eine pendelnde Bewegung zustande kommt. Bremsung und Reibungskompensation erfolgt ebenso wie bei Motorzählern. Die Abb. 118 zeigt die Schaltung des größeren Zählertyps der AEG (ETZ 1913, S. 852).

(291) 2. Induktionszähler. Induktionszähler sind Motorzähler für Wechselstrom; der Anker besteht aus einem Metallzylinder oder einer Metallscheibe, in der Wirbelströme induziert werden; die Zähler brauchen somit keine Stromzuführungen zum beweglichen System, wodurch ihre Zuverlässigkeit gegenüber den Gleichstromzählern mit Kollektoren bedeutend erhöht wird. Die Wirksamkeit der Induktionszähler beruht auf folgendem Satz: Ein Metallzylinder werde in zwei magnetische Wechselfelder gebracht, die radial und aufeinander senkrecht gestellt sind. Sind dann \mathfrak{B}_1 und \mathfrak{B}_2 die Effektivwerte der Felder, und ist δ ihre Phasenverschiebung, so wird auf den Metallzylinder ein Drehmoment proportional $\mathfrak{B}_1 \mathfrak{B}_2 \sin \delta$ ausgeübt.

Bei den Induktionszählern wird nun das eine Feld in der Regel durch eine in die Hauptstromleitung eingeschaltete Spule erzeugt; es ist also seiner Größe nach proportional dem Hauptstrom und besitzt dieselbe Phase wie dieser. Um

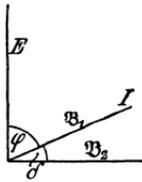


Abb. 119.
Diagramm für
Drehfeldmeßgeräte.

einem Wattstundenzähler zu erhalten, muß man das zweite Feld proportional der Höhe der Spannung machen und in der Phase um 90° gegen die Spannung verschieben. Bedeutet φ die Phasenverschiebung zwischen E und I , so wird das Drehmoment, wie das Diagramm (Abb. 119) zeigt, proportional $\mathfrak{B}_1 \mathfrak{B}_2 \sin \delta$, d. h. proportional $E I \cos \varphi$. Über 90° -Schaltungen s. Brückmann, Elektrotechn. u. Maschinenbau 1911, S. 981. Waltz, ETZ 1905, S. 230, 254, 273. Schmiedel, Arch. f. El. Bd. 2. S. 275. Siegbahn, ETZ 1914, S. 206. Rogowski Arch. f. El. 1 S. 205. Wirtz, Theorie der Ferrarisinstrumente Springer 1914. Außerdem die Bücher von Schmiedel, Möllinger und Krukowski.

Von den mannigfachen Methoden, die zur Erzeugung der Verschiebung von 90° angegeben worden sind, ist in der Praxis nur die Methode von Belfield mit ihren Abarten übrig geblieben. Wird eine Wechselspannung, unter Vorschaltung einer Drosselspule, an eine Spule angeschlossen, deren Eisenkern das Spannungsfeld erzeugen soll, so wird infolge der Energieverluste in den Spulen das Spannungsfeld nur etwa bis zu 70° gegen die Spannung verschoben.

Bringt man nun auf das Eisen dicht an dem Zähleranker eine Kurzschlußwindung auf, so entstehen in dieser Ströme, die ein Streufeld erzeugen. Durch geeignete Abmessungen der Kurzschlußwindungen und deren Lage auf dem Eisenkern kann man es dahin bringen, daß die Resultierende aus ursprünglich vorhandenem Feld und Feld der Kurzschlußwindung um 90° gegen die Betriebsspannung verschoben ist. Macht man die Ankerscheibe dick genug, so kann sie die Kurzschlußwindung ersetzen. Man wählt in diesem Falle die Abmessungen häufig so, daß der Phasenwinkel zwischen Spannung und Spannungsfeld größer als 90° wird und fügt in den Spannungskreis einen Widerstand ein, um diesen Winkel auf einen Rechten zu bringen.

Zu vorteilhaften Schaltungen gelangt man, indem man zum wirksamen Magnetflusse einen magnetischen Nebenschluß legt und einen der Zweige durch eine Kurzschlußwindung beeinflusst (Schmiedel a. a. O.).

Für hohe Spannungen und große Stromstärken werden die Induktionszähler gewöhnlich in Verbindung mit Meßwandlern (229) gebraucht; die sekundäre Spannung der Spannungswandler beträgt in der Regel 100—120 V, die sekundäre Nennstromstärke der Stromwandler 5 A. Sind die Meßwandler groß genug, so pflegt man an dieselben gleichzeitig Spannungs-, Strom- und Leistungsmesser anzuschließen.

(292) Drehstromzähler. Zur Messung von Drehstromarbeit wird in der Regel die Aron'sche Schaltung (219 b) angewandt. Schaltung unter Verwendung von Strom- und Spannungswandlern (229) nach Abb. 120. Man läßt zwei einander gleiche in der erwähnten Weise geschaltete Stromsysteme auf dieselbe Motorscheibe wirken. Dabei muß nach Möglichkeit vermieden werden, daß die Stromspule des einen Systems und das Spannungsfeld des anderen zusammen ein Drehmoment zustande bringen, oder umgekehrt. Noch schwieriger ist diese Bedingung bei Zählern für Drehstrom mit Nulleiter zu erfüllen, die mit drei Stromsystemen gebaut werden. Man pflegt in diesem Fall zwei Scheiben anzuwenden, von denen die eine von zwei Stromsystemen, die andere vom dritten Stromsystem und dem Bremsmagnet beeinflusst wird: s. (219, c).

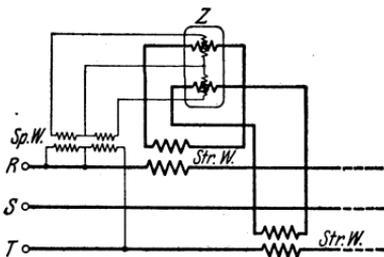


Abb. 120. Drehstromzähler.

Darf bei Drehstrom eine gleichmäßige Belastung in allen drei Zweigen vorausgesetzt werden, so können vereinfachte Schaltungen angewandt werden. Zu empfehlen sind diese Apparate aber nicht, weil die theoretischen Voraussetzungen, unter denen sie gebaut werden, in der Praxis fast nie zutreffen (vgl. ETZ 1913, S. 53).

(293) Blindverbrauchszähler. Besteht zwischen Strom und Spannung eine große Phasenverschiebung, so wird die abgegebene Leistung klein, während die Maschinen und Kabel von derselben Größe sein müssen, wie beim $\cos \varphi = 1$. Auch die Verluste sind in beiden Fällen dieselben. Es ist also recht und billig, daß man dem Abnehmer einen Teil des Blindverbrauchs in Rechnung setzt. D. h. er hat

$$EI \cos \varphi + a EI \sin \varphi$$

zu bezahlen, wo a eine je nach Tarif festzulegende Zahl ist. Man kann Zähler bauen, die diese Größe direkt registrieren, zieht es aber heutzutage vor, besondere Blindverbrauchszähler anzuwenden, die

$$EI \sin \varphi \cdot t$$

anzeigen. Da diese für voreilenden und nacheilenden Strom entgegengesetzte Drehrichtung haben, so stattet man sie mit zwei Zählwerken aus, die für je eine Drehrichtung eine Rücklaufhemmung besitzen.

Solche Aggregate aus Wirk- und Blindverbrauchszählern sind von besonderer Wichtigkeit für zwei Werke, die parallel auf dasselbe Netz arbeiten.

Literatur: Benis hke ETZ 1899 S. 454. S. S. W. Elektrotechn. Anz. 1913, S. 1999. — Bußmann, Ver. d. Elekt. 1921, S. nde heft 5. Arch. — Buchholz, ETZ 1919, S. 101, 11. — Kopp, ETZ 1920, S. 772. — Brei tfe d. Arch. f. El., B. 12, S. 227.

(294) Zähler für besondere Tarife. a) H ö c h s t v e r b r a u c h m e s s e r. Für eine Zentrale ist ein möglichst gleichmäßiger Verbrauch vorteilhafter als ein starker Verbrauch während einer kurzen Zeit. Dementsprechend werden die einen Abnehmer gegenüber den anderen ungünstiger tarifiert. Zu dem Zwecke wird neben den Zähler ein Apparat gehängt, der den in einer gewissen Zeit erreichten maximalen Strom anzeigt. Der Höchstverbrauchmesser von Wright ist ein Maximalthermometer, das durch einen in den Hauptstrom geschalteten Widerstand geheizt wird.

Empfehlenswerter ist folgende Einrichtung. Es wird 15 Minuten lang ein besonderes Zählwerk mit der Zählerachse gekuppelt; das Zählwerk schiebt einen Zeiger um einen dem Verbrauch in dieser Zeit proportionalen Betrag vorwärts. Das Zählwerk schnappt am Ende der 15 Minuten in seine Anfangslage zurück, während der Zeiger in seiner Endlage stehen bleibt. Steigt nun in den nächsten 15 Minuten der Gesamtverbrauch, so wird am Ende dieser Periode der Zeiger noch

um ein entsprechendes Stück vorwärts geschoben. Der Zeiger gibt also den höchsten Verbrauch an, der in irgendeinem Zeitraum von 15 Minuten vom Abnehmer entnommen worden ist.

b) **Doppeltarifzähler.** Eine andere Methode besteht darin, daß der Zähler zwei Zählwerke bekommt, die abwechselnd eingeschaltet werden, so daß z. B. des Nachts das eine, am Tage das andere Zählwerk den Verbrauch anzeigt. Die Ablesungen an den beiden Zifferblättern werden dann ungleich tarifiert. Eine Uhr besorgt das Umschalten der Zählwerke selbsttätig zu bestimmten einstellbaren Stunden, oder es wird von der Zentrale aus durch ein besonderes Leitungsnetz bewerkstelligt.

c) **Spitzenzähler.** Der Zähler enthält ein Planetenrad; das eine Sonnenrad ist mit dem Zähleranker gekuppelt, das andere mit einem gleichmäßig laufenden Uhrwerk. Das Planetenrad, das sich mit der Differenz der Geschwindigkeiten der Sonnenräder dreht, wird durch eine Sperrklinke verhindert, rückwärts zu laufen. Ein mit ihm verbundenes Zählwerk, das Spitzenzählwerk, schreitet also nur dann vorwärts, wenn die Leistung über einen gewissen Wert hinaus steigt, und zählt dann die bei dieser Leistung verbrauchte Arbeit. Außer dem Spitzenzählwerk besitzt der Zähler natürlich noch ein gewöhnliches, den Gesamtverbrauch anzeigendes. Der vom Spitzenzählwerk angezeigte Verbrauch muß vom Abnehmer besonders vergütet werden (ETZ 1914, S. 330).

d) **Elektrizitäts-Selbstverkäufer.** Nach Einwurf eines Geldstückes steht dem Abnehmer die Betriebsspannung zur Verfügung; nach Entnahme einer gewissen durch den Zähler gemessenen Arbeit wird der Strom selbsttätig wieder abgeschnitten. Es können mehrere Geldstücke im voraus eingeworfen werden (ETZ 1911, S. 895).

(295) Prüfung von Elektrizitätszählern. Um einen Zähler im Laboratorium auf seine Richtigkeit zu prüfen, ist es nicht notwendig, die von ihm registrierte Arbeit wirklich zu verbrauchen. Vielmehr wird man durch Trennung der Stromkreise im Zähler den Apparat künstlich belasten. Man verfährt dabei in derselben Weise wie bei der Prüfung von Leistungsmessern (233, 234). Sollen die Fehler festgestellt werden, die ein Zähler an einem bestimmten Verwendungsort macht, so muß man die Prüfung an Ort und Stelle vornehmen, um alle etwaigen störenden Einflüsse, die dort auftreten, berücksichtigen und den Apparat unter den Betriebs- und Belastungsverhältnissen prüfen zu können, unter denen er wirklich gebraucht wird. Um die zur Prüfung notwendigen Apparate einbauen zu können, ist es bequem, wenn der Zähler mit sog. Prüfklemmen versehen ist.

Die Abweichung eines Zählers von der Richtigkeit wird entweder angegeben durch den prozentischen Fehler F , gemessen in Prozenten der Sollangabe, oder durch die **Zählerkonstante** C . Unter letzterer versteht man diejenige Zahl, mit der die Angaben des Zählers multipliziert werden müssen, um den tatsächlichen Verbrauch zu ergeben. F und C hängen durch die Gleichung

$$F = 100 \cdot \frac{1 - C}{C}$$

zusammen, wenn der Sollwert der Konstante 1 ist. Z. B. $C = 1,08$, $F = -7,4\%$ (Zähler läuft 7,4% zu langsam). F und C können sich mit der Belastung des Zählers ziemlich beträchtlich ändern.

Zur Bestimmung von F ist außer der Leistung N (in Watt) die Zeit zu messen, während deren das Zählwerk um einen bestimmten Betrag vorwärts rückt. Die Zeitmessung erfolgt durch geeignete Uhren oder Chronographen (ETZ 1900, S. 1035; 1901, S. 94). Bei Motorzählern ist es vorteilhaft, die Zeit t (in s) zu messen, während deren die Motorscheibe n Umdrehungen macht. Trägt der Zähler die Angabe, daß 1 kWh n Umdr. entspricht, so berechnet sich C aus:

$$C = \frac{N t u}{3600 \cdot 1000 \cdot n}$$

Über das Verhalten bei schwankender Belastung. Elektrotechn. u. Maschinenb. 1909, S. 801 und 1911, S. 555.

Über die Methoden zur Messung von Luft-, Lager- und Zählwerksreibung s. Schmie del, Verh. des Ver. z. Bef. d. Gewerbfl. 1910, S. 571, 655 u. 1911, S. 111.

Über Zählerprüfeinrichtungen s. Kraus, Elektrotechn. u. Maschinenb. 1908, S. 271.

(296) Gesetzliche Bestimmungen über Elektrizitätszähler. Für die Messung elektrischer Arbeit durch Zähler zum Zweck der Vergütung ist das Gesetz betr. die elektrischen Maßeinheiten vom 1.6.1898 maßgebend; namentlich sind die §§ 6, 9, 12 von Wichtigkeit. Zu diesem Gesetz hat der Bundesrat Ausführungsbestimmungen erlassen, durch welche die im Verkehr zulässigen Fehler für Elektrizitätszähler festgesetzt worden sind (Verkehrsfehlergrenzen).

Diese Bestimmungen lassen sich folgendermaßen in Formeln ausdrücken. Für eine Belastung, die gleich $1/n$ der Nennlast ist, ist die zulässige Verkehrsfehlergrenze bei Gleichstromzählern gleich $\pm (6 + 0,6 \cdot n)$ Prozent, bei Wechselstromzählern $\pm (6 + 0,6n + 2 \operatorname{tg} \varphi)$ Prozent, wo φ die Phasenverschiebung bedeutet.

Amtliche Prüfung und Beglaubigung. Zähler können einer amtlichen Prüfung und Beglaubigung unterworfen werden. Hierzu sind berechtigt die Physikalisch-Technische Reichsanstalt und die elektrischen Prüfümter: 1. in Ilmenau, 2. in Hamburg, 3. in München, 4. in Nürnberg, 5. in Chemnitz, 6. in Frankfurt a. M., 7. in Bremen.

Durch die Beglaubigung eines Zählers soll ausgedrückt werden, daß ein Zähler die sogenannten „Beglaubigungsfehlergrenzen“ einhält, und daß vermöge seiner Konstruktion und der im praktischen Betriebe gesammelten Erfahrungen zu erwarten steht, daß der Apparat auch für längere Zeit bei sachgemäßer Behandlung diese engeren Fehlergrenzen nicht überschreitet. Ein Zähler kann nur beglaubigt werden, wenn sein System nach eingehender Systemprüfung durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt zu einem beglaubigungsfähigen erklärt worden ist (vgl. Prüfordnung für elektrische Meßgeräte).

Beglaubigungsfehlergrenzen:

P_N Nennlast des Zählers,

P jeweilige Last,

I_N Nennstromstärke,

I jeweilige Stromstärke,

φ Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom (wird stets positiv gezeichnet).

Zulässiger Fehler für $1/20 P_N < P < P_N$ bei

$$\text{Gleichstromzählern } \left(3 + 0,3 \frac{P_N}{P} \right) \%,$$

$$\text{Wechselstromzählern } \left\{ 3 + 0,2 \frac{P_N}{P} + \left(1 + 0,2 \frac{I_N}{I} \right) \operatorname{tg} \varphi \right\} \%;$$

für Lasten $P_N \left(1 + \frac{x}{100} \right)$ vermehrt sich der zulässige Fehler um $\frac{x}{10} \%$ ($x \leq 25$).

$$\text{Zulässiger Leerlauf } < \frac{1}{500} P_N.$$

In Verbindung mit Meßwandlern wird das Aggregat beglaubigt, wenn der Meßwandler für sich beglaubigt ist und der Zähler als „Meßwandlerzähler“ die Fehlergrenze

$$\left[2 + 0,2 \frac{P_N}{P} + \frac{1}{2} \left(1 + 0,2 \frac{I_N}{I} \right) \operatorname{tg} \varphi \right] \%$$

inhält.

Über zur Beglaubigung zugelassene Systeme vgl. die Bekanntmachungen in der ETZ 1921, S. 134; über die Beglaubigung von Meßwandlern s. ETZ 1915, S. 358 und 1922, S. 944.

Literatur: Königsworther, Elektrizitätszähler, Leipzig 1914. — Ziegenberg, Elektrizitätszähler (Handbuch der Elektrotechnik Bd. 6, 2. Hirzel, Leipzig 1908). — Norden, Elektrolytische Zähler. Wilh. Knapp, Halle 1908. — E. Morck, Theorie der Wechselstromzähler nach Ferrarischem Prinzip und deren Prüfung an ausgeführten Apparaten. Ferd. Enke, Stuttgart 1905. — Bohnenstengel, Elektrizitätszähler-Konstruktionen, Karlsruhe 1909. — Schmiedel, Motorelektrizitätszähler, Stuttgart 1916. — Möllinger, Motorzähler und Meßwandler, Berlin 1917. — Lubach ETZ 1914, S. 753. — Krukowski, Vorgänge in der Scheibe eines Induktionszählers, Berlin 1920.

Messungen an Sammlern (Akkumulatoren).

Allgemeines. Bei den Messungen ist darauf zu achten, daß der innere Widerstand sehr klein ist, und daß man deshalb einen starken Strom erhält, wenn man den Sammler durch einen geringen Widerstand schließt.

(297) Elektromotorische Kraft und Klemmenspannung unterscheiden sich um das Produkt des inneren Widerstandes R mit den Stromstärken I . Während der Entladung ist $E = U + RI$, während der Ladung $= U - RI$. Mißt man bei stromloser Batterie, so erhält man die EMK; liefert die Batterie Strom oder wird sie geladen, so erhält man die Klemmenspannung, aus der man die EMK berechnen kann.

A. Messung bei stromloser Batterie. a) mit dem Elektrometer. Schaltung s. (174). Es wird zuerst die Ablenkung gemessen, die ein Normalelement von bekannter EMK (180 u. f.) hervorbringt, und dann diejenige, welche das zu untersuchende Element erzeugt. Die EMKe verhalten sich wie die Ablenkungen.

b) mit dem Kondensator. Man lädt einen Glimmerkondensator mit dem zu untersuchenden Element und entlädt den Kondensator durch ein Galvanometer (199); ebenso verfährt man mit dem Normalelement. Die EMKe verhalten sich wie die Ablenkungen.

c) Kompensationsmethoden, vgl. (200) bis (202).

B. Messung bei stromliefernder oder -aufnehmender Batterie. Man verwendet direkt zeigende Apparate nach (198 b).

(298) Widerstand. Der Einfluß des inneren Widerstandes auf die Spannung wird im allgemeinen von dem der Polarisation übertroffen. Aus letzterem Grunde versagen auch die meisten der für Primärelemente angegebenen Meßmethoden. Man berechnet ihn genau genug aus der zwischen den Platten befindlichen Säure (Widerstand von 1 cm³ Akkumulatorensäure etwa 1,4 Ω), wobei man zur Berücksichtigung der übrigen Widerstände für das geladene Element etwa 50%, für das entladene 100 bis 150% aufschlägt.

Zur genauen Messung dient für den stromlosen Akkumulator die Methode von Kohlrausch (193). Erforderlich sind: ein kleines Induktorium, ein Telephon und eine induktionsfreie Wheatstonesche Brücke mit gerade ausgespanntem Draht. Zur Vermeidung von Entladeströmen schaltet man zwei Akkumulatoren gegeneinander und mißt den Gesamtwiderstand, oder man fügt in die einzelnen Stromkreise Kondensatoren ein, die den Wechselstrom durchlassen, den Gleichstrom sperren.

Methoden zur Messung des inneren Widerstandes während der Ladung und Entladung haben Boccali, Uppenborn, Frölich (ETZ 1891) sowie Nernst und Haagn angegeben, von denen besonders die letztere in der Ausführung von Dolezalek und Gahl einwandfreie Resultate liefert. (Zeitschr. f. Elektrochemie 1900.) Durch Einschalten von Kondensatoren in die Wheatstonesche Brücke vermeidet man, daß das zu messende Element Strom liefert (Abb. 121). $R_1 R_2$ ist ein ausgespannter Widerstandsdraht. Es ist darauf zu achten, daß R_1

gegen R_2 klein sei; andernfalls ist R_2 durch Zuschalten eines bekannten Widerstandes zu vergrößern.

Es ist $R = \frac{C_2}{C_1} \cdot R_2 - R_1$. Zur Eichung der Aufstellung schaltet man an Stelle von R bekannte induktionsfreie Widerstände. Diese Methode ist zur Messung des Widerstandes von Sammlerelementen geeignet. Auch durch Gegeneinanderschaltung zweier gleicher Elemente verhindert man das Zustandekommen eines merklichen Stromes. Die Vergleichswiderstände der Brücke sind hier durch Kondensatoren ersetzt. In Abb. 121 ist der Akkumulator allein gezeichnet; legt man die Ladespannung unter Vorschaltung eines großen Widerstandes oder den Entladekreis an die Zelle, so wird hierdurch der gemessene Widerstand nur unmerklich geändert.

(299) Arbeitsmessung. Die von einer Sammlerbatterie während der Ladung aufgenommene sowie die bei der Entladung abgegebene Arbeit wird bestimmt durch fortwährende Messungen von Klemmenspannung und Stromstärke.

Man geht hierbei von der vollständig geladenen Batterie aus, entlädt bis zu der vom Fabrikanten vorgeschriebenen Klemmenspannung (etwa 1,8 V) und lädt bis zur vollen Gasentwicklung (Klemmenspannung etwa 2,6—2,8 V).

Es bedarf einiger Übung, um bei der nachfolgenden Ladung genau wieder den Punkt zu treffen, von dem man ausgegangen ist. Man lade nicht zu lange, da die bereits bei 2,4 V allmählich einsetzende Gasentwicklung Energieverlust bedeutet; man lade aber auch nicht zu wenig, da im Betriebe die Batterie bei zu schwacher Ladung notwendig sulfatieren muß. Will man zuverlässige Werte erhalten, so muß der ursprünglichen Ladung mindestens eine vollständige Entladung mit derselben Stromstärke möglichst unmittelbar vorausgegangen sein.

Aus den Messungen bei der Entladung ergibt sich die Kapazität der Batterie. Man unterscheidet die Kapazität in Amperestunden (C_a) von der Kapazität in Wattstunden (C_w).

Wird bei der Entladung die Stromstärke I konstant gehalten, so ist die Kapazität in Amperestunden:

$$C_a = I T,$$

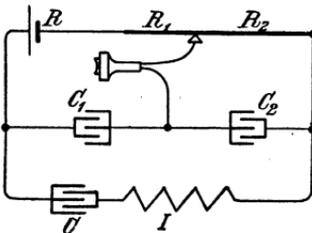


Abb. 121. Innerer Widerstand eines Elementes, stromfreie Messung.

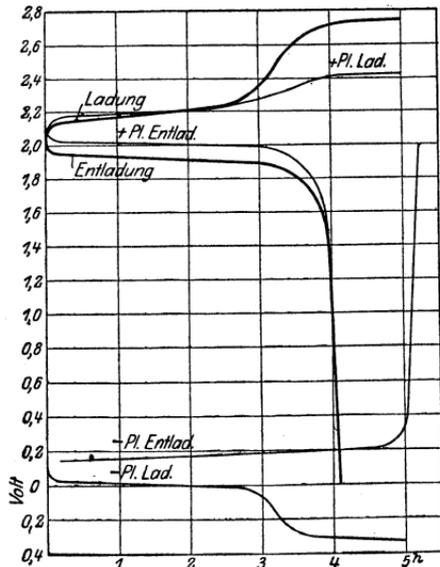


Abb. 122. Spannungskurve einer Akkumulatorenzelle bei Ladung und Entladung mit gleichbleibender Stromstärke.

worin T die Entladedauer in Stunden angibt. Je kleiner die Entladestromstärke gewählt wird, um so dauer wird nicht nur die Entladedauer T , sondern auch die Kapazität C_a . Für die Berechnung der Kapazitäten bei verschiedenen Entlade

strömen sind mehrfach Formeln aufgestellt worden, so von *Liebenow* und *Peukert*, doch ergeben sie große Abweichungen. Nach *Liebenow* findet zwischen T und C_a folgende einfache Beziehung statt:

$$C_a = k \left(1 + \frac{b}{\sqrt{T}} \right).$$

Von den Konstanten k und b hängt letztere nur von der Plattenkonstruktion ab, k ist der Anzahl der Plattenpaare des Elementes direkt proportional.

Ist die Stromstärke nicht konstant, so liest man am besten in regelmäßigen Zeitintervallen ΔT ab und hat dann:

$$C_a = \Sigma I \Delta T.$$

Mißt man in gleicher Weise während der Ladung die Stromstärken I' in den Zeitintervallen $\Delta T'$, so nennt man den Quotienten $\Sigma I \Delta T / \Sigma I' \Delta T'$ das Güteverhältnis des Akkumulators.

In gleicher Weise verfährt man zur Bestimmung der Kapazität in Wattstunden, wobei nur das Produkt $I \Delta T$ überall noch mit der Klemmenspannung U zu multiplizieren ist.

Es ist $C_w = \Sigma UI \Delta T$.

Der Quotient $\Sigma UI \Delta T / \Sigma U' I' \Delta T' = \eta$ heißt der Wirkungsgrad.

Güteverhältnis und Wirkungsgrad sind nicht ganz unabhängig von den Stromstärken.

Zur besseren Übersicht trägt man die Ablesungen in ein Koordinatennetz ein, wobei die Abszissen die Zeit, die Ordinaten bei gleichbleibender Stromstärke die Spannungen und bei variabler die Leistung darstellen. Die zu einer Entladung gehörige Ladung zeichnet man auf dasselbe Blatt. In Abb. 123 stellen die stark ausgezogenen Linien eine solche Entladung und Ladung mit konstanter Stromstärke einer Zelle der Accumulatorenfabrik A.-G. dar. Ladung und Entladung von Edisonzellen s. Abb. 343 bis 348, S. 429 u. 430.

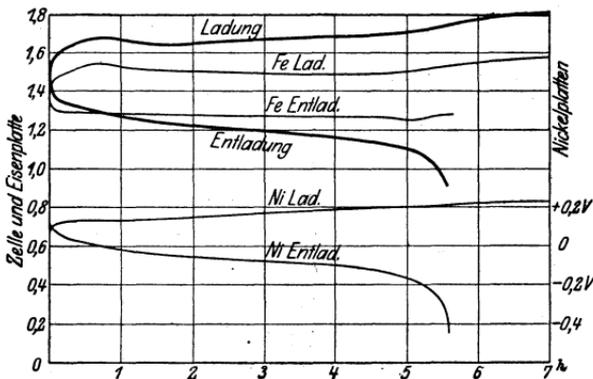


Abb. 123. Spannungsverlauf bei Ladung und Entladung einer Edisonzelle.

Mit Registrierinstrumenten erhält man ohne weiteres die fertigen Diagramme. An kleinen Akkumulatoren ermittelt man gelegentlich die entnommene Strommenge mit dem Voltmeter. Es entspricht dann 1 Amperestunde 1,18 g Kupfer oder 626 cm³ Knallgas bei 0° C und 760 mm Druck.

Zur Bestimmung der Elektrizitätsmengen oder der ganzen Arbeit kann man die für elektrische Anlagen gebräuchlichen Elektrizitäts- und Arbeitsmesser benutzen.

Die Ermittlung des spezifischen Gewichtes der Säure gibt einen Aufschluß über die noch erforderliche Ladezeit bzw. über den noch vorhandenen Vorrat an Elektrizität (vgl. im Abschnitt Akkumulatoren), doch hat man darauf zu achten, daß der Säurestand nachhinkt und das spez. Gew. von der Temperatur abhängig ist.

(300) Spannungsverteilung. Für die genauere Untersuchung einer Zelle bedient man sich der *Fuchs*schen Methode, indem man eine Hilfselektrode aus Kadmium oder amalgamiertem Zink in den Elektrolyten einführt und bei jeder Ablesung nicht nur die Klemmenspannung des Elementes, sondern auch die Spannungen sowohl zwischen Anoden und Hilfselektrode, als auch zwischen Kathoden und Hilfselektrode mißt. Diese drei Ablesungen trägt man wie oben als Ordinaten in ein Koordinatennetz ein und erhält so einen Überblick über die Kapazität sowohl der Anoden wie der Kathoden (siehe Abb. 123 die schwach ausgezogenen Linien). Die Kapazität des Elementes ist erschöpft, sobald eine der beiden Elektrodenarten erschöpft ist. Über Vorsicht bei dieser Messung siehe *Liebenow*, Zeitschrift für Elektrochemie Bd. 8, 1902, S. 616.

Holland (*Electrician* 1910, 21. Oktober, S. 48) benutzt teilweise entladene Kupferoxyd- oder Nickeloxydelektroden für Messungen an Edisonzellen. Abb. 123 gibt den Verlauf der Eisen- und Nickelelektrode bei Ladung und Entladung wieder.

Dritter Teil.

Starkstromtechnik.

Erster Abschnitt.

Elektromagnete.

(301) Allgemeines. Das Grundelement aller elektrischer Maschinen und Apparate ist der Elektromagnet. Seine Teile sind der Eisenkern und die Wicklung. Man unterscheidet geschlossene, halb geschlossene und offene, je nachdem der magnetische Kreis ganz im Eisen verläuft, eine oder mehrere geringe Unterbrechungen durch unmagnetisches Material, z. B. durch Luft, besitzt oder weit voneinander abstehende Endflächen des Eisens zeigt. Beim offenen Elektromagnet, Abb. 124, unterscheidet man die mit der Wicklung W versehenen Schenkel S und das sie verbindende Joch J . Die Pole (Endflächen der Schenkel) werden durch den Anker A magnetisch geschlossen. Die Elektromagnete können zwei-, vier-, sechspolig usw. ausgebildet werden, vgl. Abb. 156—158. Eine andere Form des Elektromagnets erhält man, wenn man zu beiden Seiten eines bewickelten Schenkels zwei unbewickelte mit je halb so großem Querschnitt anordnet und alle drei durch ein Joch verbindet. Gibt man dem inneren Schenkel S zylindrische Gestalt und ersetzt man die äußeren Schenkel durch einen Hohlzylinder M , so erhält man den Topfmagnet, Abb. 125, bei dem oft der Anker mit einem konischen Kern in

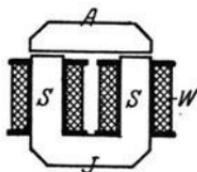


Abb. 124.

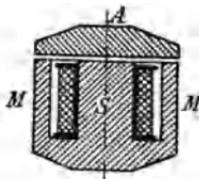


Abb. 125. Topfmagnet.

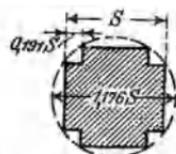


Abb. 126. Kreuzquerschnitt, günstigste Abmessungen.

eine konische Ausbohrung des Schenkels S hineinragt. Bei Erregung durch Gleichstrom kann der Eisenkern aus massivem Eisen hergestellt werden. Für die Schenkel ist Gußeisen unvorteilhaft, weil es größere Querschnitte für einen gegebenen Induktionsfluß und daher mehr Kupfer für die Wicklung verlangt. Wechselstrommagnete werden im Allgemeinen aus dünnen, 0,3 bis 1,0 mm starken einseitig mit Seidenpapier beklebten Eisenblechen, in Sonderfällen aus lackierten Drähten hergestellt, um die Entstehung von Wirbelströmen möglichst zu verhüten.

(302) Querschnitt des Eisenkerns. Die Größe des Querschnittes richtet sich nach dem Induktionsfluß, der hindurchgehen soll. Die beste Querschnittsform

der Schenkel ist der Kreis, weil er am wenigsten Kupferaufwand verlangt. Ihm nähern sich quadratische Querschnitte mit Abstufungen an den Ecken, die bei der Herstellung aus Blechen viel angewendet werden. Die einfachste Abstufung besitzt der Kreuzquerschnitt, dessen günstigste Abmessungen Abb. 126 wiedergibt. Längliche Querschnitte erfordern mehr Kupfer für die Erregerwicklung, gestatten aber an Jochlänge, mithin bei gleichem Querschnitt an Eisen zu sparen, und bei gleicher Schenkellänge den ganzen Eisenkern zu verkürzen, ein Umstand, der beim Transport großer Transformatoren von Bedeutung sein kann.

(303) Die Wicklung besteht aus Kupfer, auch wohl aus Aluminium in Form von Draht, Band oder Seil. Seil oder Litze kann leicht vierkantig ausgewalzt werden, nützt aber trotzdem den Wickelraum weniger aus als Draht. Flachkupfer wird häufig hochkantig gewickelt. Die *Spulenkasten* bestehen aus Preßspan mit oder ohne Glimmereinlage, aus Ambroin, gepreßter Papiermasse, Eisengummi, Vulkanasbest und bei sehr hohen Spannungen aus Mikanit, Porzellan oder festgewickeltem Papier. Häufig wird der Spulenkasten weggelassen und die Spule dafür teilweise oder ganz mit Leinenband umschnürt. In andern Fällen werden die Spulen auch auf Zylinder ohne Flansche gewickelt und die Drähte durch eingewickelte Verschnürungen und konisches Absetzen der oberen Lagen gesichert. Bei Drahtwicklungen wird zweckmäßig das innere Ende der Spule dadurch nach außen geführt, daß zunächst zwischen dem einen Seitenflansch des Spulenkastens und einer besonderen isolierenden Scheibe eine Lage Draht in einer zur Achse senkrechten Ebene uhrfederartig aufgewickelt wird.

(304) Zur isolierenden Umhüllung der Drähte wird Baumwolle, Seide, Papier — zusammenfassend Faserstoffe genannt — und Lack verwendet. Seide verlangt wenig Wickelraum, ist aber gegen höhere Temperaturen und Feuchtigkeit sehr empfindlich und wird daher im Starkstrombau wenig verwendet. Papier ist bei sorgfältiger Behandlung als hochwertige Umhüllung anerkannt. Die Drähte werden ein- bis dreimal mit Baumwolle oder Papier umspinnen und entweder trocken aufgewickelt oder vorher mit einem erstarrenden Isoliermittel getränkt oder vollständig in eine isolierende Füllmasse eingebettet. Baumwolle und Papier vertragen dauernd eine Temperatur bis zu etwa 85° C, bei getränkter oder in Füllmasse gebetteter Faserstoffumhüllung ist eine Temperatur bis zu 95° C zugelassen: Bei höheren Temperaturen nimmt man Lacküberzug oder Asbestumspinnung. Lacküberzug vergrößert den Drahtdurchmesser nur verschwindend wenig, doppelte Baumwollumspinnung vergrößert ihn bei Drähten bis zu 1 mm Durchmesser um 0,15 bis 0,2 mm, bei stärkeren Drähten um 0,25 bis 0,5 mm, doppelte Seidenumspinnung um 0,15 mm.

Bei Verwendung unter Öl werden die Umhüllungen am besten nicht getränkt, weil es wirklich ölbeständige Tränkmittel nicht gibt. Luftgekühlte Spulen werden vielfach im Vakuumtrockenofen mit geeigneter Isoliermasse getränkt, d. h. es wird ihnen zuerst im Vakuum der Wassergehalt entzogen, sodann wird die Tränkmasse unter passender Erwärmung durch den äußeren Luftdruck in die Gefäße (Kastenwagen) gedrückt, in denen sich die Spulen, Anker, Transformatoren usw. befinden.

(305) Erwärmung. Vgl. hierzu die Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren des Verbandes deutscher Elektrotechniker, im folgenden öfters kurz Maschinenregeln oder Transformatorenregeln genannt.

Für den Widerstand R gilt die Formel, wenn ϑ die Temperatur in °C ist,

$$R_{warm} = R_{kalt} (1 + \alpha (\vartheta_{warm} - \vartheta_{kalt}))$$

Der Temperaturkoeffizient α ist bei reinen Metallen ungefähr gleich 0,004, d. h. der Widerstand wächst um 1%, wenn die Temperatur um 2,5% zunimmt. Genauer kann man für Kupfer nach den Maschinenregeln

$$\alpha = \frac{1}{235 + \vartheta_{kalt}} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

setzen. Hieraus ergibt sich die Temperaturzunahme

$$\vartheta_{warm} - \vartheta_{kalt} = \frac{R_{warm} - R_{kalt}}{R_{kalt}} (235 + \vartheta_{kalt}) + (\vartheta_{K\u00fchlmittel} - \vartheta_{kalt}) \text{ } ^\circ\text{C}$$

wobei für $\vartheta_{K\u00fchlmittel}$ die mittlere Temperatur des K\u00fchlmittels im letzten Viertel des Versuches einzusetzen ist.

Die Temperatur ist am h\u00f6chsten bei den in der Mitte der Spulen liegenden Dr\u00e4hten und nimmt sowohl nach oben und unten als auch nach au\u00dfen und nach dem Kern zu ab. Zu gro\u00dfe Wicklungstiefe ist daher zu vermeiden. Wenn ϑ_a die mit Thermometer gemessene Au\u00dfentemperatur der Spule, ϑ_m die durch Widerstandsmessung bestimmte mittlere Temperatur bedeutet, so ist nach Vidmar (El. u. Maschb. 1918, S. 49, 64) die Innentemperatur ϑ_i

$$\vartheta_i = \vartheta_m + (\vartheta_m - \vartheta_a) = 2 \vartheta_m - \vartheta_a$$

nach Jakob (Arch. f. El. Bd. 8 S. 117)

$$\vartheta_i = 1,9 \vartheta_m - 0,9 \vartheta_a$$

Vgl. auch Rogowski u. Vieweg (Arch. f. El. Bd. 8, S. 329). Unterteilung der Erregerspulen hat f\u00fcr die Abk\u00fchlung nur Zweck, falls durch \u00e4u\u00dfere Mittel Luftzug hervorgebracht wird. Die W\u00e4rmeleitung ist bedeutend gr\u00f6\u00dfer in der Ebene der Bleche, als senkrecht dazu. Eine starke Magnetisierung beeintr\u00e4chtigt die W\u00e4rmeleitung. Als abk\u00fchrende Oberfl\u00e4che wird vielfach die \u00e4u\u00dfere Mantelfl\u00e4che voll und die am Kern liegende Mantelfl\u00e4che halb eingesetzt; alsdann kann man f\u00fcr die Temperaturzunahme setzen

$$\Delta \vartheta = \vartheta_{max} - \vartheta_{kalt} = 500 \frac{\text{Verlust in Watt}}{\text{Oberfl\u00e4che in cm}^2}$$

ϑ_{max} bedeutet die Temperatur in $^\circ\text{C}$, \u00fcber die hinaus bei normaler Dauerbelastung und konstanter Temperatur der Umgebung eine Steigerung praktisch nicht mehr wahrgenommen werden kann.

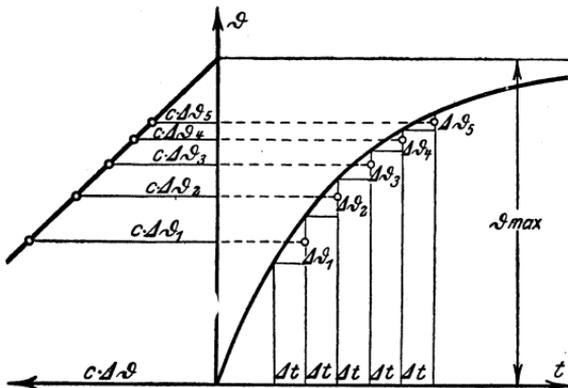


Abb. 127. Graphische Berechnung der Endtemperatur.

Bei konstanter Stromw\u00e4rmeleistung I^2R und konstanter Temperatur ϑ_0 des umgebenden Mittels (Luft, \u00d6l) steigt die Temperatur ϑ der Spule nach einem Exponentialgesetz mit der Zeit t , nach Unterbrechung des Stromes f\u00e4llt sie nach einem solchen (Oelschl\u00e4ger). Es gilt f\u00fcr die

Erw\u00e4rmung: $\vartheta = \vartheta_{max} - (\vartheta_{max} - \vartheta_0) e^{-\lambda_1 t}$ oder $(\vartheta - \vartheta_0) = (\vartheta_{max} - \vartheta_0) (1 - e^{-\lambda_1 t})$

Abk\u00fchlung: $\vartheta = \vartheta_0 + (\vartheta_{max} - \vartheta_0) e^{-\lambda_2 t}$ oder $(\vartheta - \vartheta_0) = (\vartheta_{max} - \vartheta_0) e^{-\lambda_2 t}$

$\tau = 1/\lambda$ ist die Zeitkonstante der Erwärmung. Das vom VDE (§ 32 d. Regeln f. d. Bew. u. Pr. von elektr. Masch.) empfohlene Verfahren von Klobz zur Bestimmung von ϑ_{max} gründet sich auf die Gleichung $d\vartheta/dt = \lambda(\vartheta_{max} - \vartheta)$ oder angenähert $\Delta\vartheta = \lambda\Delta t \cdot (\vartheta_{max} - \vartheta)$, die aus der Erwärmungsgleichung und ihrer Differentialgleichung durch Elimination von $e^{-\lambda t}$ folgt. Die Temperaturen ϑ werden in gleichen Zeitabständen Δt gemessen und die Werte ihres Zuwachses $\Delta\vartheta$ in der Zeit Δt in c -fach vergrößertem Maßstabe als Ordinaten über $\vartheta + 1/2\Delta\vartheta$ als Abszissen aufgetragen, Abb. 127. Der Schnittpunkt der durch die Endpunkte der Ordinaten gelegten Geraden mit der ϑ -Achse schneidet auf dieser die Höchsttemperatur ϑ_{max} ab.

Die Zeit zur Erreichung der Endtemperatur ϑ_{max} nimmt mit den linearen Abmessungen zu und mit der Wirksamkeit der Kühlmethode ab. Für die Erwärmung ist die Art des Betriebes maßgebend. Man unterscheidet im wesentlichen (§ 28 bis 30 der Maschinenregeln):

a) Dauerbetrieb, bei dem die Nennleistung beliebig lange Zeit,

b) kurzzeitigen Betrieb, bei dem die Nennleistung nur während einer vereinbarten Zeit innegehalten werden kann,

c) aussetzenden Betrieb, bei dem Zeiten des Stromdurchganges beliebig lange und regelmäßig mit Zeiten der Stromlosigkeit abwechseln können, ohne daß die Temperaturzunahme die zulässige Grenze überschreitet.

Die Summe beider Zeiten ist die Spieldauer, die höchstens 10 min betragen soll. Das Verhältnis der Einschaltdauer zur Spieldauer ist die relative Einschaltdauer. Als normale Werte für sie gelten 15, 25 und 40%.

Die höchste Temperatur im Falle c) ermittelt man, indem man die Erwärmungs- und die Abkühlungskurve zeichnet und die den jeweiligen Betriebszuständen entsprechenden Abschnitte nach Abb. 128 zusammensetzt.



Abb. 128. Erwärmungs- und Abkühlungskurven.

Literatur: Oelschläger, E., ETZ 1900, S. 1058. — Ott, Forschungshefte d. V. D. I., Heft 35/36; ETZ 1908, S. 194. — Schmalz, ETZ 1908, S. 188. — Goldschmidt, ETZ 1908, S. 886. — Amsler, ETZ 1910, S. 831. — Ossanna, ETZ 1910, S. 542; El. u. Maschb. 1909, S. 489. — Arnold, ETZ 1909, S. 172. — Müller, El. u. Maschb. 1915, S. 21. — Brückmann, Erwärmung d. Mot. bei aussetzendem Betrieb. Diss. Hannover 1908. — Binder, Wärmeübergang auf ruhige und bewegte Luft, sowie Lüftung und Kühlung der Masch. Diss. München 1911. Halle, W. Knapp. — Bachmann, Die therm. Grundlagen d. Ölkühlung elektr. App. insbes. von Transform. Diss. Dresden 1914. — Adler u. Schiebeler, ETZ. 1920, S. 485. — Blanc, ETZ. 1920, S. 812, ETZ. 1922, S. 178.

(306) Formeln für die Wicklung der Spulen. Es seien die Längen in cm, die Querschnitte in cm^2 , das Volumen in cm^3 , der spezifische Widerstand in $\Omega \text{ cm}$ ausgedrückt. H (Abb. 129) sei die Höhe, T die Tiefe der Wicklung, δ der Drahtdurchmesser des blanken, δ' der des umspannten Drahtes, q und q' die entsprechenden Drahtquerschnitte, l_m die mittlere Länge einer Windung, so ist die Windungszahl

$$w = \frac{HT}{\delta'^2} \quad (1)$$

die Drahtlänge

$$l = wl_m = \frac{HTl_m}{\delta'^2} = \frac{V}{\delta'^2} \text{ cm} \quad (2)$$



Abb. 129. Spule.

da HTl_m gleich dem Volumen V des Wicklungsraumes ist.

Ferner der Widerstand R , wenn ρ der spezifische Widerstand in Ω cm

$$R = \frac{\rho l}{q} = \frac{4 \rho V}{\pi d^2 d'^2} \text{ Ohm} \quad (3)$$

Unterscheiden sich d und d' wenig voneinander, so kann man $d = d' = d_0$ setzen, woraus

$$d_0 = \sqrt[4]{\frac{4 \rho V}{\pi R}} \text{ cm} \quad (4)$$

in erster Annäherung zu berechnen ist, wenn V und R gegeben sind. Die Klemmenspannung U ist bei der Stromwärmeleistung N_w Watt, weil $U^2/R = N_w$, also $U = \sqrt{RN_w}$,

$$U = \frac{2}{d d'} \sqrt{\frac{\rho V}{\pi} N_w} \text{ Volt} \quad (5)$$

woraus

$$d_0 = \sqrt{\frac{2}{U} \sqrt{\frac{\rho V}{\pi} N_w}} \text{ cm} \quad (6)$$

Die Durchflutung $\mathcal{A} = wI$ ergibt sich aus $I = U/R$ mit (1), (5) und (3)

$$\mathcal{A} = wI = \frac{1}{2} \frac{d}{d'} HT \sqrt{\frac{\pi N_w}{\rho V}} = \frac{1}{2} \frac{d}{d'} F \sqrt{\frac{\pi N_w}{\rho V}} \text{ AW} \quad (7)$$

wenn F der Wicklungsquerschnitt in cm^2 ist. Die Durchflutung ist daher wenig abhängig von der Drahtstärke, ist direkt proportional der Wurzel aus dem Leistungsverbrauch und umgekehrt proportional der Wurzel aus dem spezifischen Widerstande. Mit Rücksicht auf die Erwärmung kann nur ein bestimmtes N_w zugelassen werden, das durch Versuch zu bestimmen oder aus der Oberfläche unter Berücksichtigung der durch die Umgebung der Spule bedingten Abkühlungsverhältnisse zu berechnen ist. Für Meßinstrumente sind mindestens $20 \text{ cm}^2/\text{W}$, für andere Zwecke bei Dauereinschaltung $20 \text{ cm}^2/\text{W}$, bei aussetzendem Betrieb etwa 10 bis $5 \text{ cm}^2/\text{W}$ zu rechnen, falls nicht künstliche Kühlung vorhanden ist.

(307) Der magnetische Kreis. Vgl. (36), (37), (41).

Näherungsweise kann man nach H o p k i n s o n

$$0,4 \pi w I = \mathfrak{H}_0 l_0 + \mathfrak{H}_1 l_1 + \mathfrak{H}_2 l_2 + \dots$$

setzen, worin $\mathfrak{H}_0, \mathfrak{H}_1, \mathfrak{H}_2 \dots$ die als konstant angenommenen mittleren Feldstärken in den einzelnen Teilen, $l_1, l_2 \dots$ die mittleren Längen dieser Teile in cm bedeuten. Mit Hilfe der Beziehung $\mathfrak{H} = \mathfrak{B}/\mu$ erhält man

$$w I = \frac{\mathfrak{H}_0}{0,4 \pi} \cdot l_0 + \sum_{n=1}^{n=N} \frac{\mathfrak{B}_n}{0,4 \pi \cdot \mu_n} \cdot l_n$$

$\mathfrak{H}_0/0,4\pi$ ist die auf 1 cm Länge zur Herstellung des Induktionsflusses in der Luft erforderliche Durchflutung (800 AW/cm für je 1000 Gauß), $\mathfrak{B}/0,4\pi\mu$ die zur Herstellung des Induktionsflusses im Eisen auf 1 cm Länge erforderliche Durchflutung in AW. Letztere ist aus Magnetisierungskurven zu entnehmen, die in der Regel die Werte $\mathfrak{B}/0,4\pi\mu$ als Abszissen, \mathfrak{B} als Ordinaten besitzen. Solche Kurven müssen für das jeweilig zu verarbeitende Material aufgenommen werden. Mittlere Werte ergeben sich aus Abb. 19, S. 38; genauere Werte für zahlreiche Eisensorten s. (39). Für größere Querschnitte gilt der Satz näherungsweise unter der Annahme einer mittleren Induktion für den ganzen Querschnitt und unter Zugrundelegung einer mittleren Länge des magnetischen Kreises.

Beispiel: Elektromagnet.

Teil des Elektromagnets	Material	Magnet. Induktion \mathfrak{B} in Gauß	Spez. Durchflutung in AW/cm	Länge in cm	Durchflutung in AW
2 Schenkel	Stahlguß	14000	10	40	400
2 Lufträume	Luft	9000	7200	1,6	11500
Joch	Gußeisen	7000	30	50	1500
Anker	Bleche	8000	3	30	90
					13490

(308) **Unterteilung des Eisens.** Der Eisenkörper der Wechselstrommagnete ist zu unterteilen, um die Entstehung von Wirbelströmen infolge der Ummagnetisierung möglichst zu beschränken. Man stellt den Körper für 50 Per/s aus Blechen von 0,5 mm bis 0,3 mm, für Hochfrequenz aus sehr dünnen Blechen bis 0,07 mm Stärke her, die auf Spezialmaschinen einseitig mit festem Seidenpapier von 0,03 mm Stärke beklebt werden. Die Endbleche werden häufig stärker, bis zu 2 mm stark gewälzt; zum Zusammenhalten dienen durch Papier- oder Mikanitröhren isolierte Niete oder Schraubenbolzen. Die Papierisolation ist allein nicht zuverlässig genug, daher werden häufig in Abständen von 1—2 cm Einlagen von Zeichenpapier in die Kerne gebracht. Sofern die Kerne bearbeitet werden, muß ein Verschmieren der Flächen vermieden werden.

Die Ebene der Bleche muß senkrecht zur Richtung der induzierten EMK gelegt werden. Beim Übertritt der Induktionslinien von einem Blech in ein benachbartes werden Wirbelströme erzeugt. Man vermeidet sie möglichst durch Anordnung sehr großer Übergangsquerschnitte, z. B. durch breite Überlappung. Metallene Spulenkasten und Flansche sind so aufzuschneiden, daß in ihnen nicht Ströme um den Magnetkern herum laufen können. Bei alledem bleibt doch ein Rest von Wirbelströmen, der entmagnetisierend wirkt und die Wirkung der Erregung abschwächt. Bei der Ummagnetisierung wird das Eisen in Vibration versetzt und brummendes Geräusch verursacht. Das Geräusch ist bei mäßiger Induktion verschwindend, besonders wenn der magnetische Kreis ganz eisengeschlossen ist, oder wenn seine Teile fest miteinander verschraubt sind.

(309) **Spulenfluß.** Die Strombahn einer in sich geschlossenen Windung kann man zur Begrenzung einer im übrigen beliebig gestalteten Fläche wählen, die die Windungsfläche heißt. Sie schneidet den gesamten Induktionsfluß, der die Windung durchdringt. Ebenso kann man sich die Windungen einer Spule als Begrenzung einer Fläche denken; diese ist die Windungsfläche der ganzen Wicklung. Der gesamte durch sie hindurchgehende Induktionsfluß ist der Spulenfluß Ψ (Modell einer solchen Wicklung von E m d e, vgl. Elektrotechnik und Maschinenbau 1912, S. 976). Man ersetzt diese Windungsfläche in der Regel durch so viele Flächen, wie Windungen vorhanden sind, indem man jede Windung als in sich geschlossen ansieht. Werden die einzelnen Windungen von den „Windungsflüssen“ $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots$ durchsetzt, so ist die EMK

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} 10^{-8} = - \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots) 10^{-8} \text{ Volt}$$

Geht durch alle w Windungen derselbe Induktionsfluß, so ist

$$\Psi = w \Phi \text{ und } e = - w \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

Wird Ψ durch den eigenen Strom der Spule erzeugt, so ist

$$\Psi = \Sigma \Phi = w \Phi = L I \cdot 10^{+8}$$

wenn L die Selbstinduktivität in Henry, I die Stromstärke in Ampere bedeutet. L ist bei gegebenem Wicklungsraum proportional mit w^2 . Bei größerer Sättigung ist

$$L \frac{dI}{dt} = w \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8}, \text{ woraus } L = w \frac{d\Phi}{dI} 10^{-8}$$

folgt. L hängt dann von der Sättigung ab.

Bei Wechselstrom ist die effektive Stromstärke

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}}$$

worin U die effektive Spannung. Häufig kann mit großer Annäherung R vernachlässigt und

$$I = \frac{U}{2\pi fL}$$

gesetzt werden. Elektromagnete für Wechselstrom verlangen daher bei gleicher Durchflutung und gleicher Spannung weniger Windungen und stärkeren Strom als solche für Gleichstrom.

(310) Streuung. Weil es magnetische Isolatoren nicht gibt, muß mit der Abweichung eines Teiles des Induktionsflusses von dem gewünschten Wege gerechnet werden. Dieser Teil des Induktionsflusses heißt Streuung. Man unterscheidet also Gesamtfluß, nützlichen oder Hauptfluß und Streufluß. Zur Vermeidung der Streuung wird die Wicklung am besten dort angebracht, wo der Induktionsfluß ausgenutzt werden soll, im allgemeinen also so nahe wie möglich am Luftraum.

Der Streufluß kann nach Hopkinson berechnet werden, wenn man den Verlauf der Streulinien näherungsweise durch Überlegung oder Versuch bestimmt. Für einen magnetischen Kreis $AYBZA$ (Abb. 130 bis 132) sind folgende Gesetze nützlich: Der Kreis bestehe in seinen einzelnen Teilen aus beliebigem verschiedenartigem Material und sei mit Windungen umgeben, von denen jede von einem Strom beliebiger Stärke und Richtung durchflossen ist. Jedoch sei MN eine Symmetrieebene. Zwischen A und B und zwischen C und D befinde sich ein Streufluß.

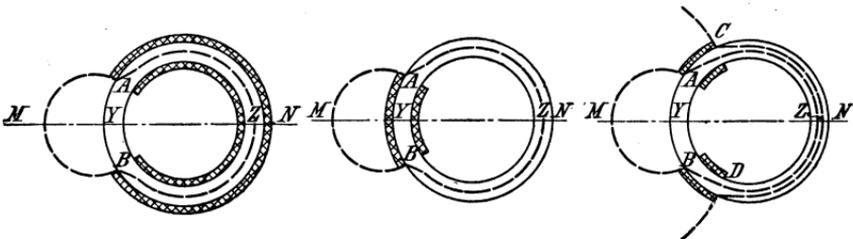


Abb. 130 bis 132. Streulinien eines magnetischen Kreises.

1. Die magnetische Potentialdifferenz Π_{AB} zwischen A und B ist gleich dem Überschuß der mit $0,4\pi$ multiplizierten Durchflutung $\mathcal{L}_{BA} = (wI)_{BA}$ auf dem Teile BZA über die zur Magnetisierung dieses Teiles erforderliche MMK H_{BA} , Abb. 130, $\Pi_{AB} = 0,4\pi \mathcal{L}_{BA} - H_{BA}$.

2. Die magnetische Potentialdifferenz zwischen A und B ist gleich dem Überschuß der zur Magnetisierung des Teiles AYB erforderlichen MMK H_{AB} über die mit $0,4\pi$ multiplizierte Durchflutung auf diesem Teile, Abb. 131. $\Pi_{AB} = H_{AB} - 0,4\pi \mathcal{L}_{AB}$.

3. Die magnetische Potentialdifferenz zwischen C und D ist gleich der Potentialdifferenz zwischen A und B vermehrt um den Überschub der zur Magnetisierung der Teile CA und BD erforderlichen MMKe H_{CA} und H_{BD} über die mit $0,4\pi$ multiplizierten Durchflutungen auf diesen Teilen, Abb. 132. $\Pi_{CD} = \Pi_{AB} + (H_{CA} + H_{BD}) - 0,4\pi(\mathcal{L}_{CA} + \mathcal{L}_{BD})$.

Die Durchflutungen sind positiv zu rechnen, wenn sie einen Induktionsfluß in der Richtung $A Y B Z A$ erzeugen. Der Induktionsfluß in einer Röhre des Streuflusses ist gleich der magnetischen Potentialdifferenz zwischen zweien ihrer Punkte, dividiert durch ihren magnetischen Widerstand zwischen den beiden Punkten.

Man teile wie in Abb. 133 und 134 den ganzen Streufluß in einzelne Röhren und berechne den Streufluß jeder Röhre nach den angegebenen Gesetzen. Die Summe ergibt dann den ganzen Streufluß.

(311) Zugkraft der Magnete. Zwei einander gegenüberstehende Pole üben (32), (125) die Zugkraft

$$P = \frac{\mathfrak{B}^2 F}{8\pi \cdot 981 \cdot 10^3} \text{ kg*}$$

aufeinander aus, wenn F die Polfläche in cm^2 ist.

Bei $\mathfrak{B} = 5000$ Gauß ist der Zug gleich $1,014 \text{ kg*}/\text{cm}^2$, d. i. rund $1 \text{ kg*}/\text{cm}^2$. Der Abstand der Polflächen voneinander ist zunächst gleichgültig, doch ist zu beachten, daß die Induktionslinien sich ausbreiten, wenn man die Polflächen voneinander entfernt; F wird größer, \mathfrak{B} kleiner, die Zugkraft kleiner. Bemerkenswert ist, daß Pole, besonders solche mit Polschuhen, eine starke Anziehung nach dem Joch zu erhalten. Beträgt z. B. die Fläche am Joch $20 \times 20 \text{ cm}^2$, am Polschuh $31 \times 20 \text{ cm}^2$, so ist die Zugkraft am Joch für $\mathfrak{B} = 14\,000$ Gauß gleich 3180 kg* , an der Polfläche bei 10% Streuung und $\mathfrak{B} = 9000$ Gauß gleich 2400 kg* , der Pol wird daher mit 1140 kg* gegen das Joch gedrückt.

(312) Hubmagnete¹⁾. Elektromagnete mit entweder geradlinig fortschreitender oder drehender Bewegung des Ankers (Abb. 135 u. 136) finden vielfach Anwendung zur Lüftung der Bremsen an Windwerken, zur Bewegung von Fernschaltern und selbsttätigen Schaltern, sowie zum Ein- und Ausschalten von Widerstandsstufen (als sog. Stromschützen). Konstante Kraft längs des ganzen Hubes ist nicht erforderlich, doch muß der Übertragungsmechanismus der Arbeitsweise des Magnets angepaßt sein. Die Größe des Hubmagnets wird zweckmäßig nach der Arbeit bemessen, die er leisten kann. Bei Gleichstrom wird der Topfmagnet (Abb. 125) viel angewendet. Die Stromwärme darf meistens groß sein (intermittierender Betrieb). Bei Drehstrom nimmt man drei nebeneinanderstehende, durch ein Joch miteinander verbundene Schenkel (Abb. 137). Da die Zugkraft jedes Schenkels proportional dem Quadrat des Magnetismus ist, so ist die gesamte Zugkraft annähernd während des ganzen Verlaufs einer Periode konstant, weil in jedem Augenblick $i_1^2 + i_2^2 + i_3^2$ konstant ist. Bei einphasigem Wechselstrom benutzt man, um dasselbe zu erreichen, eine sogenannte Kunstphase, d. h. man nimmt ebenfalls

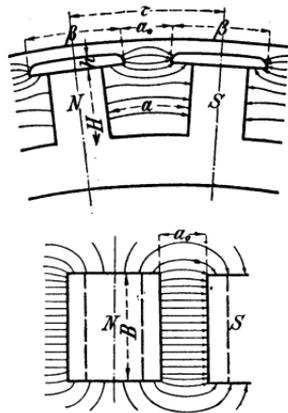


Abb. 133 und 134. Streuung an den Feldmagneten.

¹⁾ Kolben, ETZ 1901, S. 148. — Vogel, ETZ 1901, S. 175. — Beneke, ETZ 1901, S. 542. — Dietze, ETZ 1092, S. 131. — Emde, ETZ 1908, S. 717. Zur Berechnung der Elektromagnete. El. u. M. 1906, S. 945. — Euler, Untersuchung eines Zugmagneten für Gleichstrom. Diss. Berlin 1911. Julius Springer. — Steil, Untersuchungen über Solenoide und über ihre praktische Verwendbarkeit für Straßenbahnbremsen. Diss. Berlin 1911.

einen mehrspuligen Magnet und speist die einzelnen Spulen mit phasenverschobenen Wechselströmen. Auch wird das Prinzip des Induktionsmotors benutzt. Alle Wechselstrommagnete brauchen für gleiche Arbeit und gleiche

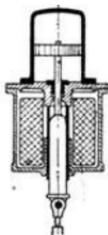


Abb. 135. Hubmagnet mit geradliniger Bewegung.

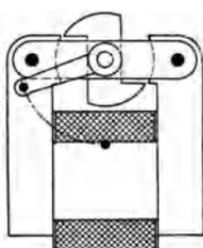


Abb. 136. Hubmagnet mit Drehbewegung.

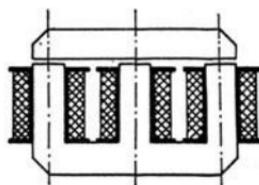


Abb. 137. Drehstrommagnet.

Spannung einen bedeutend stärkeren Strom als die Gleichstrommagnete, weil die Wicklung der Selbstinduktion wegen mit viel weniger Windungen ausgeführt werden muß.

(313) **Lasthebemagnete**¹⁾ dienen zum Fördern von Schienen, Röhren, Blechen, Masseln, Schrott und Spänen sowie zum Heben von Fallkugeln. Für regelmäßige gewalzte Stücke werden Magnete benutzt, die aus einem oder mehreren parallel nebeneinander angeordneten zylindrischen mit einer Spule umgebenen Eisenkernen und plattenförmigen unten ebenen Polschuhen bestehen, für unregelmäßige Stücke, Schrott und Späne flache meist kreisrund gebaute Topfmagnete. Die Erregerspule liegt dann in einer nach unten offenen ringförmigen großen Nut, die durch ein unmagnetisches Blech abgeschlossen wird. Der Eisenkörper besteht aus Stahlguß, die Wicklung aus Kupfer oder Aluminium mit Baumwoll- oder Asbestumspinnung oder Lacküberzug, bei Aluminium auch mit einfacher Oxydschicht. Aluminium wird häufig angewendet, weil das Eigengewicht des Magnets dann geringer ausfällt. Nach Piffner erhält man die günstigsten Verhältnisse, wenn die Kosten des Eisenkörpers und der Wicklung gleich groß sind. Die Deutsche Maschinenbau-A.-G. versieht die Magnete mit einer leicht auswechselbaren Patrone, die den Stromkreis bei Überschreitung der zulässigen Höchsttemperatur unterbricht. Zum Einschalten wird zweckmäßig ein Anlasser benutzt. Zur Förderung von Schrott werden die Magnete auch mit abnehmbaren Greifern ausgestattet. Über Größe, Gewicht, Tragfähigkeit und Leistungsverbrauch kreisrunder Lasthebemagnete gibt folgende Tabelle Aufschluß.

Durchmesser mm . . .	650	750	975	1295	1510
Gewicht kg	350	470	900	2000	2300
Verbrauch kW	1	1,5	3,3	6,5	7,5
beim Heben von	Tragfähigkeit in kg				
Gußspänen	100	200	250	500	700
Schmiedespänen . . .	75	100	200	350	450
Masseln	200	280	400	700	1000
Stahlbrocken	350	500	800	1200	1500
Kernschrott	150	200	400	650	750
Schmelzeisen	80	120	200	350	450
Massiven Blöcken . .	2000	4000	6000	20000	20000

¹⁾ M i c h e n f e l d e r, Magnetkrane, Z. D. I. 1910, S. 2042; 1911, S. 800. P i f f n e r, Berechnung von Lasthebemagneten ETZ 1912, S. 29.

(314) Drosselspulen. Wechselstrommagnete werden benutzt, um überschüssige Spannung ohne großen Leistungsverlust abzudrosseln, z. B. in Bogenlampenkreisen, ferner zur Erdung des Nullpunktes von Wechselstromanlagen und Unterdrückung des Erdschlußstromes (Peterson, ETZ 1919, S. 5), zur Verbesserung des Parallelbetriebes (485), in der Meßtechnik und im Laboratorium. Die effektive EMK ist, sinusartiger Verlauf vorausgesetzt:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f w F \mathfrak{B} \cdot 10^{-8} = 4,44 \cdot f w F \mathfrak{B} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

wenn f die Frequenz in Per/s, w die Windungszahl, F der Eisenquerschnitt in cm^2 ist. Die Klemmenspannung weicht von diesem Wert nur sehr wenig ab.

Vektordiagramm der Drosselspule.¹⁾ Es werde angenommen, daß alle Größen sinusförmig sind, d. h. nach einem Sinusgesetz verlaufen. Der Vektor für den Induktionsfluß Φ werde beliebig festgelegt (Abb. 139).

Rechtwinklig zu ihm liegt um 90° nacheilend verschoben der Vektor der durch Φ induzierten EMK E (denn wenn $\Phi = \Phi_0 \sin \omega t$ ist, so ist $e = -\omega \Phi_0 \cos \omega t \cdot 10^{-8}$; e ändert sich also wie ein negativer Cosinus, wenn sich Φ wie ein positiver Sinus ändert). Wenn der Eisenschluß vollkommen ist, so hat der Stromvektor etwa die Lage OA (50° Voreilung vor Φ), denn OA muß mit E einen stumpfen Winkel einschließen, weil im Eisen

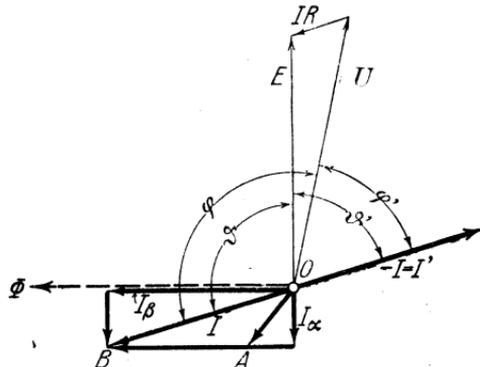


Abb. 139. Vektordiagramm der Drosselspule.

Verluste auftreten. Ist ein Luftspalt vorhanden, so tritt zu OA noch die für die Durchmagnetisierung der Luft erforderliche Stromkomponente AB parallel mit Φ ,

¹⁾ Das Ohmsche Gesetz, auf einen Teil eines Stromkreises bezogen, wird ganz allgemein häufig in der Form $E + U = RI$, für den Stromverbraucher in der Form $E = U + RI$, für den Stromerzeuger gewöhnlich in der Form $U = E + RI$ geschrieben. Hierin bedeutet E die EMK in dem betrachteten Teile, U die Klemmenspannung zwischen einem Ende, R seinen Widerstand, I die Stromstärke. Da aber in vielen Maschinen die Generatorwirkung stetig in die Motorwirkung übergeht, ist es zweckmäßig, das Gesetz bei theoretischen Untersuchungen immer in derselben Form zu schreiben. Im folgenden ist bei allen Diagrammen die Form $E = U + RI$ gewählt. Diese Gleichung ist so zu verstehen: Man ergänze den betrachteten Teil AB , Abb. 138a, zu einem geschlossenen Kreise und setze einen beliebigen Umlaufsinn als positiv fest. In diesem Sinne sind alle Richtungsgrößen als positiv zu betrachten. Man hat also $E = RI + U_{BA}$. Bei Reihenschaltung einer Drosselspule CD mit einem Kondensator EF , Abb. 138b, gilt $E = R_{ges} I \hat{+} U_{EF} \hat{+} U_{BA}$, wofür man auch $U_{AB} = R_{ges} I \hat{-} E \hat{+} U_{EF}$ schreiben kann. Für die Drosselspule allein gilt $E = R_s I \hat{+} U_{DC}$ oder $U_{CD} = R_s I \hat{-} E$. Beim Generator ist $E > U$, E und I sind gleichgerichtet, beim Stromverbraucher ist $U > E$, I ist negativ und gegen E gerichtet. Mithin erscheinen beim Generator die innere Leistung EI und die äußere Leistung UI als positive, beim Stromverbraucher als negative Größen. Im Vektordiagramm fallen E und U zusammen, wenn RI verschwindet; E und U schließen mit I spitze Winkel ein, wenn elektrische Leistung erzeugt wird, und stumpfe Winkel, wenn elektrische Leistung verbraucht wird.

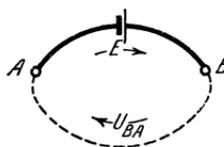


Abb. 138 a.

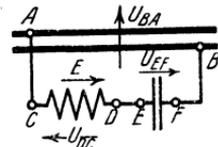


Abb. 138 b.

Zur Erläuterung des Ohmschen Gesetzes.

weil in der Luft keine Verluste auftreten; der Vektor des Gesamtstromes ist daher OB . Der Spannungsverlust IR hat dieselbe Phase wie I , die Spannung ergibt sich daher aus $U = E \hat{=} IR$, indem man $-IR$ an den Vektor E anträgt. Die Phasenverschiebung zwischen E und I ist ϑ , die zwischen U und I ist φ . Beide Winkel sind stumpf. $EI \cos \vartheta$ stellt die Verluste im Eisen, $UI \cos \varphi$ die Gesamtverluste dar, dabei ist $UI \cos \varphi = EI \cos \vartheta + I^2 R$. Bei konstantem φ wachsen die Verluste im Eisen wegen der Wirbelströme in der Nähe des Luftspaltes ein wenig, wenn der Luftspalt größer gewählt wird. Sieht man hiervon ab, so bewegt sich der Endpunkt B des I -Vektors auf einer Parallelen zu Φ . Will man stumpfe Winkel vermeiden, so klappe man I um 180° herum. Man erhält dann die spitzen Phasenverschiebungswinkel ϑ' und φ' . Der Spannungsverlust IR ist in der Regel sehr klein im Vergleich mit E und U . Die Phasenverschiebung φ' beträgt bei gut eisengeschlossenem Kreise 40° bis 45° , bei großem Luftspalt bis über 80° .

(315) Verzerrung der Stromkurve. Wenn die Spannung nach einem Sinusgesetz verläuft, so verläuft die EMK annähernd nach einem Sinusgesetz, weil der Spannungsverlust nur einen geringen Bruchteil der Spannung beträgt, folglich verläuft dann auch der Induktionsfluß annähernd nach einem Sinusgesetz. Die Stromkurve, die man leicht aus der Hystereseschleife ableiten kann, ist dann aber bei eisengeschlossenem Kreise stark verzerrt. Man ersetzt sie durch eine „äquivalente Sinuskurve“, d. h. eine Kurve, von demselben Effektivwert und solcher Phasenverschiebung gegen die EMK, daß ihr dieselbe Leistung entspricht. Ist aber ein Luftspalt vorhanden, so folgt die für ihn erforderliche Komponente der Stromstärke (AB in Abb. 139) dem Sinusgesetz, wenn Φ sinusartig verläuft. Mithin nähert sich der Verlauf des Gesamtstromes um so mehr einem Sinusgesetz, je größer der Luftspalt gewählt wird. (Ebenso wie ein Luftspalt wirkt bei den Transformatoren eine induktionsfreie Belastung.)

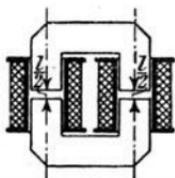


Abb. 140. Drosselspule mit verstellbarem Luftschlitz.

(316) Berechnung der Drosselspulen. Gegeben sind Drosselspannung und Stromstärke. Wird bei gegebener Netzspannung die Abdrosselung einer bestimmten Spannung verlangt, so ist zur Ermittlung der Drosselspannung die Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Drosselspannung und zwischen Netzspannung und Drosselspannung zu beachten. Die Stromstärke wird durch Wahl der passenden Länge l des Luftwegs eingestellt, Abb. 140.

Wenn l_E die Summe der Längen des im Eisenkern und l_L die Summe der Längen der in den Luftspalten verlaufenden Teile des magnetischen Pfades ist, so gelten die Gleichungen,

$$0,4 \pi \sqrt{2} w I \approx \frac{\mathfrak{B}_E}{\mu_E} l_E + \mathfrak{B}_L l_L \quad \text{und} \quad \sqrt{2} E = 2 \pi f w F \mathfrak{B} 10^{-8}$$

Durch Multiplikation der Gleichungen miteinander ergibt sich nach einigen Umstellungen, wenn $\mathfrak{B}_E = \mathfrak{B}_L = \mathfrak{B}$ gesetzt wird,

$$F \left(\frac{l_E}{\mu_E} + l_L \right) = \frac{0,4 \cdot 10^8 \cdot I E}{f \mathfrak{B}^2} \quad \text{oder} \quad \frac{V_E}{\mu} + V_L = \frac{0,4 \cdot 10^8 I E}{f \mathfrak{B}^2}$$

Vernachlässigt man den magnetischen Widerstand im Eisen, so erkennt man, daß für die scheinbare Leistung EI das Volumen V_L der Luftspalte in erster Linie bestimmend ist. Damit sich der Induktionsfluß nicht zu sehr ausbreitet, macht man l_L klein im Verhältnis zu den Querschnittsseiten und legt die Luftspalte möglichst in die senkrecht zur Schenkelachse stehende Symmetrieebene, wie Abb. 140 zeigt, oder man sieht mehrere Luftspalte innerhalb jeder Spule vor. Die Luftspalte werden durch Preßspan, Eisenfilz oder dergleichen ausgefüllt, die Eisenteile fest verspannt, um Brummen zu verhüten. Drosselspulen mit offenem

magnetischen Kreis sind wegen Streuung in den äußeren Raum, wegen Auftretens von Wirbelströmen in den Enden und wegen der Schwierigkeit der Justierung nicht zu empfehlen. Die Windungszahl ergibt sich aus obigen Gleichungen nach Wahl der Induktion, der Drahtquerschnitt aus der zulässigen Stromwärme und dem vorgeschriebenen Leistungsverlust.

Liegen Querschnitt und Windungszahl fest, so ergibt sich von selbst die Bemessung des erforderlichen Wickelraumes der Spulen, die Länge des Eisenkerns, die Form und Länge der Jochstücke. Die Berechnung der Verluste im Eisen gibt ein Urteil darüber, ob die gewählten Größenverhältnisse beibehalten werden können, oder ob Abänderungen erwünscht sind. Zur genauen Einstellung der bei gegebener Klemmenspannung gewünschten Stromstärke oder der bei gegebener Stromstärke gewünschten Klemmenspannung wird die Länge der Luftstrecken verändert.

(317) Überspannungen. Bei Reihenschaltung einer Drosselspule mit einem Kondensator können an beiden Apparaten beträchtliche Überspannungen auftreten. Bemerkenswert ist, daß bei derselben Spannung, besonders bei eisengeschlossenem Kern, zwei verschiedene Gleichgewichtszustände möglich sind, der eine bei geringer Spannung am Kondensator und erhöhter an der Drosselspule, der andere bei hohen Überspannungen an beiden (M a r t i e n s s e n , ETZ 1910, S. 204; Phys. Zeitschr. 1910, S. 448. — P e t e r s e n , ETZ 1915, S. 353; 1916, S. 148, 252. — B i e r m a n n s , Archiv f. El. 1915, S. 345. — G ö r g e s , ETZ 1918, S. 101).

Zweiter Abschnitt.

Transformatoren.

(318) **Benennungen.** Transformatoren schlechthin sind Apparate zur Umwandlung elektrischer Wechselstromleistung in elektrische Wechselstromleistung ohne bewegte Teile, insbesondere zur Herabsetzung oder Erhöhung der Spannung, während die Frequenz unverändert bleibt. Sie bestehen aus zwei oder mehr durch einen oder mehrere magnetische Kreise miteinander verketteten Wicklungen. Die die elektrische Leistung vom Netz empfangende Wicklung heißt die primäre, die übrigen Wicklungen heißen die sekundären. Das Verhältnis der Windungszahlen zweier durch einen magnetischen Kreis miteinander verketteter Spulen nennt man ihr Übersetzungsverhältnis. Ein Transformator hat den Verbrauch an Leistung N_1 bei der Spannung U_1 und gibt die Leistung N_2 bei der Spannung U_2 ab; die „Abgabe“ N_2 ist gleich der „Aufnahme“ N_1 vermindert um die Leistungsverluste im Transformator. Im belasteten Transformator sind die Stromstärken in der Primär- und Sekundärwicklung den Spannungen annähernd umgekehrt proportional, die Leistungsfaktoren sind in beiden Wicklungen angenähert gleich groß, die Frequenz ist bei den Transformatoren im engeren Sinne in allen Wicklungen gleich groß.



Abb. 141. Zweischenkler Kerntransformator.

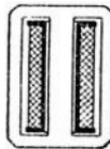


Abb. 142. Einschenkler Transformator.



Abb. 143. Drehstromtransformator, Säulen in einer Ebene.

Man unterscheidet Transformatoren für Einphasen-, Zweiphasen-, Drehstrom usw., und solche für Übergang von Zweiphasenstrom in Drehstrom oder von Drehstrom in Zweiphasenstrom. Transformatoren für Einphasenstrom haben entweder nur einen einfach geschlossenen magnetischen Kreis (Abb. 141) oder seltener einen mehrfach, meist zweifach geschlossenen (Abb. 142).

Drehstrom wird entweder durch drei Einphasentransformatoren transformiert oder durch Drehstromtransformatoren mit drei Schenkeln, die jetzt fast stets in einer Ebene parallel nebeneinander gestellt und oben und unten durch Joche miteinander verbunden werden, Abb. 143. Die Unsymmetrie in den Induktionsflüssen ist ziemlich belanglos.

(319) **Der Eisenkern** der Transformatoren ist gewöhnlich völlig geschlossen, um den Leerlaufstrom, d. h. den Magnetisierungsstrom möglichst herabzumindern.

Unterbrechungen des Eisenpfades durch kurze Luftstrecken kommen vereinzelt für besondere Zwecke vor, besonders zur Kompensierung der Kapazität von ausgedehnten Kabelnetzen. Der Eisenkern wird aus hochlegiertem Eisenblech von 0,30 bis 0,35 mm Stärke, das vor dem Stanzen einseitig mit Seidenpapier beklebt ist, hergestellt. Zum Zusammenhalten der Bleche dienen sorgfältig mit Isolation umhüllte Eisenbolzen, deren Nietköpfe ebenfalls von den Eisenblechen isoliert sein müssen, bei kleinen Transformatoren auch hölzerne Bolzen mit eisernen Schrauben an beiden Enden.

Bei der Herstellung des eisengeschlossenen magnetischen Kreises ist darauf Rücksicht zu nehmen, daß die für sich hergestellten Wicklungsspulen nachträglich über die Eisenkerne geschoben werden können. Entweder werden die einzelnen Teile des Blechkörpers an den erforderlichen Unterbrechungsstellen mit stumpfem Stoß zusammengesetzt; bei dieser Anordnung sind die einzelnen Teile zur Verhütung von Brummen sehr fest aufeinander zu pressen (308). Oder man verbindet die einzelnen Teile durch Überblattung, indem man die Kerne abwechselnd aus längeren und kürzeren Blechen zusammensetzt und die so gebildeten Zinken ineinandergreifen läßt. Überblattung bietet mehrere Vorteile; man bekommt eine sehr einfache Zusammensetzung des Eisenkörpers, und kann den erforderlichen Magnetisierungsstrom auf die Hälfte bis auf den dritten Teil des bei stumpfem Stoß erforderlichen Betrages herabsetzen. Bei kleinen und mittelgroßen Leistungen können die Stoßflächen durch Hobeln und Schleifen bearbeitet werden, um den magnetischen Schluß möglichst innig zu machen. Es werden dadurch aber die Bleche elektrisch miteinander verbunden, so daß Wirbelströme auftreten. Bei großen Leistungen ist dadurch die Gefahr starker Erhitzung gegeben und dies Verfahren deshalb unzulässig. Man sucht die Stoßflächen dann durch sorgfältige Schichtung der Bleche möglichst eben zu machen. Kreuzen sich die Bleche zweier Pakete bei stumpfem Stoß, so muß die Wirbelstrombildung durch Zwischenlegen von Papier an der Stoßstelle eingeschränkt werden, was freilich nur auf Kosten einer Erhöhung des Magnetisierungsstromes möglich ist.

Bei großen Transformatoren werden die Kerne mit Schlitzen zur Kühlung versehen. Konstruktiv am einfachsten ist ihre Anordnung parallel zur Ebene der Bleche, wirksamer, wenn man sie senkrecht dazu anordnet (vgl. ETZ 1922, S. 793).

(320) Bewicklung der Transformatoren. Für die Bewicklung wird Leitungskupfer nach den Normalien des VDE oder neuerdings auch Aluminium genommen. Da der spezifische Widerstand des Aluminiums sich zu dem des Kupfers fast genau wie $\sqrt{3}:1$ verhält, (dies ist nur eine Gedächtnisregel), so ist die Durchflutung bei Aluminiumwicklung nach (306) Gl. (7) das $\sqrt{1/\sqrt{3}}$ -fache = dem 0,76-fachen der Durchflutung bei Kupferwicklung, wenn die Stromwärmeleistung dieselbe ist. Man muß daher die Wicklung oder besser den Eisenkörper und die Wicklung größer wählen, und zwar in den linearen Abmessungen um etwa 6 Hundertstel.

Man ordnet die Wicklungen stets so an, daß jeder Schenkel sowohl einen Teil der Primärwicklung wie einen Teil der Sekundärwicklung erhält. Die Spulen werden entweder konzentrisch übereinander geschoben — in diesem Falle ist es der Isolation wegen meist zweckmäßiger, die Niederspannung nach innen, die Hochspannung nach außen zu legen — oder man ordnet die Spulen nebeneinander an, wobei Primär- und Sekundärspulen miteinander abwechseln. Häufige Unterteilung ist dabei zur Verringerung der Streuung notwendig. Für die Herstellung der Wicklung gilt im allgemeinen dasselbe wie für die Herstellung der Wicklung gewöhnlicher Elektromagnete (vgl. 303).

Die Wicklung kann bei kleinen Transformatoren — bis höchstens 5 kW — direkt auf den mit Öltuch, Preßspan oder dergleichen isolierten Kern aufgebracht werden. Kupferaufwand und Streuung fallen dann besonders gering aus. In der Regel und bei größeren Transformatoren immer stellt man besondere Spulen her,

bei kleineren Leistungen mit gemeinsamen Kasten für beide Wicklungen, bei größeren Leistungen und höheren Spannungen mit getrennten Kasten für die Wicklungen. Die Spulenkasten können weggelassen werden, wenn man dünndrähtige Spulen durch Umschnürungen in sich festigt und mit Hüllen von ausreichender Isolierfestigkeit umgibt. Wicklungen aus Flachkupfer besitzen in der Regel Halt genug und bedürfen lediglich isolierender Zwischenstücke, die einfach eingelegt werden. Die Leiterquerschnitte werden so gewählt, daß die Kupferabmessung in radialer Richtung vom Eisenkern aus möglichst gering bleibt (Kupferband), weil sich andernfalls oft die Stromwärme infolge ungleichförmiger Verteilung der Stromstärke über den Kupferquerschnitt — Stromverdrängung (408, C 10) — (auch Wirbelströmen im Kupfer zugeschrieben) bedeutend erhöht, vgl. ETZ 1903, S. 674. Spulen mit vielen Windungen sind mit Rücksicht auf die Spannung zwischen benachbarten Drähten zu unterteilen.

Besonderer Wert ist auf Kurzschlußsicherheit der Wicklungen zu legen. Bei Kurzschlüssen wirken starke Kräfte, die die Windungen zu erweitern suchen — es sind sogar Zerreißen beobachtet worden —, Spulen derselben Wicklung auf verschiedenen Schenkeln einander zu nähern, Scheibenspulen, die verschiedenen Wicklungen angehören, von einander zu entfernen suchen. Man muß daher durch eingeschobene isolierende Leisten dafür sorgen, daß sich die Spulen nicht gegen den Eisenkern und gegeneinander verschieben können, bei Scheibenspulen auch dafür, daß sie sich nicht voneinander abheben können. Die „Zentralverspannung“ gestattet die Spulen von außen gegeneinander zu verspannen, wenn sie sich gelockert haben. Den Druck auf die Drahtwindungen selbst umgeht man dabei durch isolierende Einlagen zwischen den Windungen der Scheibenspulen, die den Druck aufnehmen.

(321) Isolation. Bei der Herstellung der Transformatorspulen ist ebenso wie bei der Wicklung von Wechselstrommagneten (304) auf sorgfältige Isolation der einzelnen Windungen zu sehen. Da eindringende Überspannungswellen besonders leicht die Isolation zwischen den ersten, den Klemmen zunächst gelegenen Windungen durchschlagen, so empfiehlt es sich, diese besonders stark zu isolieren. Öl und andere zum Ausgießen benutzte isolierende Massen erfüllen ihren Zweck nur dann, wenn aus dem Innern alle Luftblasen entfernt sind. Geringer Gehalt an Wasser setzt die Isolierfähigkeit des Öles bedeutend herab. Man ordnet daher unter dem Öl besonders nahe dem Boden des Ölkastens Funkenstrecken an, die unter Hochspannung stehen, und deren Durchschlagen ein Warnungssignal auslöst. Unter allen Umständen müssen Glimmentladungen im Öl vermieden werden. Das elektrische Feld darf daher an keiner Stelle einen Höchstwert, der bei etwa 20 kV/cm liegt, überschreiten. Man sucht dies dadurch zu erreichen, daß man die Hochspannungswicklung in der Art symmetrisch anordnet, daß das Potential von beiden Seiten nach der Mitte der Schenkel hin ansteigt, oder man versieht die Enden der Spulen mit metallischen Wülsten, die mit jeder letzten Windung leitend verbunden sind.

Zur Verminderung der Spannung zwischen der Hochspannungswicklung und der Niederspannungswicklung sowie dem Eisenkörper zerlegt *D e s s a u e r* (ETZ 1918, S. 373) den Transformator in einen Mittel- und zwei Außentransformatoren, deren Hochspannungswicklungen sämtlich in Reihe geschaltet sind, während die Niederspannungswicklungen der Außentransformatoren von besonderen Hilfstansformatoren („Beanspruchungstransformatoren“) gespeist werden und mit den Endpunkten der Hochspannungswicklung des Mitteltransformators verbunden sind.

(322) Äußerer Aufbau. Vgl. die Beispiele ausgeführter Transformatoren, Abb. 331 bis 336 S. 414 ff. Die Transformatoren erhalten eine Bewehrung aus Schmiedeeisen oder Gußeisen, durch die die Teile des Eisenkerns zusammengehalten und die Spulen gestützt werden; ferner häufig einen Mantel oder ein völlig geschlossenes Gehäuse. Kleinere und mittelgroße Transformatoren werden bei mäßig hohen Spannungen meistens durch natürlichen Luftzug gekühlt.

Da alle Teile ruhen, ist der Luftzug nicht sehr stark; man muß daher große Abkühlungsflächen schaffen und dafür sorgen, daß die kalte Luft ungehindert zuströmen, die erwärmte ungehindert abfließen kann. Gelochte Bleche drosseln die Luft auch bei reichlicher Lochung stark, es müssen daher Grundplatte und Deckel des Transformators so gestaltet werden, daß die Luft möglichst frei hindurchstreichen kann. Nur bei kleinen Leistungen (bis etwa 5 kW) dürfen die Wicklungen fest aufeinander und auf dem Eisenkern liegen; bei größeren Leistungen müssen auch die Oberfläche des Eisenkerns und die inneren Oberflächen der Spulen von der kühlenden Luft bestrichen werden.

Transformatoren mit künstlicher Luftkühlung werden mit abgeschlossenen Gehäusen versehen, durch die mit einem Gebläse reine trockene, am besten durch ein Filter angesaugte Luft, getrieben wird.

(323) Öltransformatoren. Die Transformatoren werden vielfach der besseren Isolation und der Abkühlung wegen in Öl gesetzt. Bei Spannungen über 30 000 V werden fast ausschließlich Öltransformatoren angewendet. Wegen der größeren Wärmekapazität des Öles vertragen sie vorübergehend höhere Überlastungen als luftgekühlte Transformatoren; bei Dauerbetrieb sind sie den Transformatoren mit natürlicher Luftkühlung deshalb überlegen, weil Öl die vom Transformator erzeugte Wärme viel leichter aufnimmt, als Luft. Kleinere Transformatoren erhalten einfache Gußkasten. Besser ist die Kühlung, wenn die Gußkasten mit äußeren und inneren Rippen zum Wärmeaustausch versehen werden. Für größere Leistungen verwendet man autogen geschweißte Kasten aus Wellblech, um große Oberflächen zu schaffen. Bei großen Transformatoren muß das Öl künstlich gekühlt werden. Entweder wird in dem aus Kesselblechen hergestellten Kessel über dem Transformator eine vom Kühlwasser durchflossene Kühlschlange angeordnet — diese Anordnung ist wegen der Bildung von Kesselstein in den Rohren nicht zu empfehlen — oder der Ölkessel wird mit einem Kühlmantel umgeben, oder das Öl wird durch eine Umlaufpumpe aus dem Ölkessel durch Kühlschlangen, die in einem besonderen Wasserbehälter untergebracht sind, und zurück in den Ölkessel gedrückt. Vgl. hierzu Abb. 331, 332 und 335.

Zur Füllung verwendet man ein leichtflüssiges, unvermisches, absolut säure- und wasserfreies Öl. Meistens wird russisches Mineralöl verwendet, dessen Gefrierpunkt unter -5°C und dessen Entflammungspunkt über 160°C liegt. W. Brauen empfiehlt Harzöl, das durch Destillation von Kolophonium gewonnen wird und gereinigt hellgelb ist. Damit das Öl nicht Wasser aus der Luft aufnimmt, wird die Oberfläche des Ölspiegels möglichst klein gemacht oder auch im obersten Teile des Kastens eine Schale mit Chlorkalzium angebracht, oder der Ölkessel vollkommen gefüllt und durch ein Steigrohr mit einem Ausdehnungsgefäß (Ölkonserver) verbunden, das entweder auf dem Ölkessel oder getrennt an der Wand angebracht wird. Der Kesseldeckel muß dann gegen den Druck des warmen Öls gut abgedichtet sein. Durchschnittlich muß das Öl alle ein bis zwei Jahre untersucht werden, weil sich besonders bei hoher Temperatur und Zutritt von Luft und Feuchtigkeit Schlamm absetzt und Säuren bilden. Feuchtigkeit setzt die Durchschlagfestigkeit stark herab. Die größte von Friese an der Zylinderfunkenstrecke beobachtete Durchschlagfestigkeit betrug 230 kV/cm. Diese fiel aber nach vier Durchschlägen infolge von Rußbildung auf beinahe die Hälfte davon. Bei mittlerer relativer Feuchtigkeit stellt sich offenstehendes Öl allmählich auf 50 kV/cm ein. Als Durchschlagfestigkeit D in Abhängigkeit vom Wassergehalt W in Tausendsteln des Ölgewichtes fanden Friese und Oelschläger

$$D = \frac{1,1}{W} + 20 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

Die Feuchtigkeit wird dem Öl entweder durch Filtrieren in einem Fließpapierdruckfilter oder durch Ausdampfen bei 100 bis 120°C oder besser bei geringerer Temperatur und vermindertem Druck entzogen. Insbesondere wird das Öl vor

der Inbetriebnahme des Transformators tagelang getrocknet, indem es dauernd zwischen dem Kocher und dem Ölkessel in Umlauf gehalten wird. Man erreicht dadurch zugleich die Austrocknung der Wicklung. Man erkennt die Feuchtigkeit an dem Knattern des Öles, wenn ein glühender Eisendraht heineingetaucht wird. Das Öl soll auch frei von anderen Beimengungen namentlich Säuren, Alkali, Schwefel und mechanischen Bestandteilen wie Fasern sein. Schwefel wird an der Schwärzung eines Kupferdrahtes im erwärmten Öl erkannt. Bei der Verdampfungsprobe soll das Öl nach achtstündiger Erwärmung auf 100° C höchstens 0,2% an Gewicht verlieren¹⁾.

(324) Den Hochspannungsklemmen ist besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden. Besonders leicht geben die Gleitfunken zu Störungen Anlaß, die ihren Weg längs der Oberfläche einer isolierenden Schicht nehmen, unterhalb deren die spannungführende Leitung liegt. Von den Siemens-Schuckertwerken wird die Kondensatorklemme von Nagel (El. Bahn. u. Betr. 1906, S. 275ff.) angewendet, deren Isolierrohr abwechselnd aus Hartpapier und aus Metallrohren von nach außen abnehmender Länge besteht, so daß das elektrische Feld längs der äußeren Oberfläche von der Klemme bis zu dem geerdeten Eisenkörper, in dem die Klemme sitzt, und daher auch das elektrische Feld zwischen Durchführungsbolzen und Eisenkörper in radialer Richtung durch das Rohr möglichst konstant bleibt. In der von der AEG benutzten Ausführungsklemme (ETZ 1910, S. 118) von Kuhlmann ist das Porzellan nur der Träger der Klemme, die Luft der Hauptisolator. Die Klemme ist zu diesem Zwecke in der Mitte, wo sie in dem geerdeten Eisenkörper sitzt, weit ausgebaucht.

(325) Sicherheitsvorkehrungen. Zur Überwachung der Öltemperatur werden Quarzglaswiderstandsthermometer eingebaut. Nach den Errichtungsvorschriften des VDE § 25 muß bei Transformatoren in besonderer Weise verhindert werden, daß ein Übertritt von Hochspannung in Stromkreise für Niederspannung sowie das Entstehen hoher Spannungen in den letzteren vorkommt. Man kann hierzu besondere Spannungssicherungen benutzen, die bei Überschreitung der normalen Spannung durchschlagen werden (Durchschlagssicherung) und der hohen Spannung einen Weg zur Erde gewähren. Sie zeigen aber einige Nachteile, derentwegen sie neuerdings seltener angewandt werden.

Nach § 25 d müssen Transformatoren außerhalb elektrischer Betriebsräume entweder allseitig in geerdete Metallgehäuse eingeschlossen oder in besonderen Schutzverschlägen untergebracht werden. Nach e sollen an jedem Transformator, mit Ausnahme von Meßtransformatoren, Vorrichtungen angebracht sein, die gestatten, das Gestell gefahrlos zu erden.

(326) Übersetzungsverhältnis. In einer Wicklung von w Windungen, die denselben Induktionsfluß $\Phi = \Phi_0 \sin \omega t$ umschließen, wird nach (309) die EMK

$$e = -\omega w \Phi_0 \cos \omega t \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

induziert. Hierin ist $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz in Per/2 π s, f die Frequenz in Per/s. Die effektiven Mittelwerte der induzierten EMK sind daher

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f w_1 \Phi_{10} \cdot 10^{-8} = 4,44 \cdot f w_1 \Phi_{10} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f w_2 \Phi_{20} \cdot 10^{-8} = 4,44 \cdot f w_2 \Phi_{20} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

In gut eisengeschlossenen Transformatoren ist bei Leerlauf $\Phi_1 = \Phi_2$, daher $E_1/E_2 = w_1/w_2$. Aus dem Diagramm, Abb. 147, S. 237 folgt, daß das Übersetzungsverhältnis

¹⁾ Petersen, Hochspannungstechnik, Stuttgart 1911; Klingenberg, Bau großer Elektrizitätswerke Berlin, Springer 1913; Brauen, ETZ 1914, S. 145; Ölschläger ETZ 1922, S. 54; Friese, Wissenschaftl. Ver. aus d. Siemens-Konzern, 1. Bd. 2. Heft, S. 41; ETZ 1921, S. 1145, vorläufige Bedingungen d. Vereinigg. d. El. W. für Transformatoren- u. Schalteröle; Stern ETZ 1922, S. 140 Bemerkungen dazu.

w_1/w_2 dann auch gleich dem Verhältnis der Klemmenspannungen bei Leerlauf und angenähert gleich dem umgekehrten Verhältnis der Stromstärken bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung ist. Man unterscheidet Transformatoren mit festem und solche mit veränderlichem Übersetzungsverhältnis.

Transformatoren mit veränderlichem Übersetzungsverhältnis. Man kann das Übersetzungsverhältnis ändern:

a) durch Zu- und Abschalten von Windungen mittels eines nach Art der Zellschalter für Akkumulatoren gebauten Windungsschalters. Der Widerstand oder die Drosselspule zwischen den beiden Bürsten ist dabei so zu bemessen, daß der Kurzschlußstrom in der ab- oder zuzuschaltenden Windungsgruppe den normalen Wert der Stromstärke nicht überschreiten kann. Bei Verminderung der primären Windungszahl wächst die Induktion im Eisen, man darf die Windungszahl also nicht zu weit verringern. Eine Veränderung der sekundären Windungszahl ist in weitesten Grenzen zulässig. Man beachte aber, daß die übrig bleibenden Windungen möglichst symmetrisch über den ganzen magnetischen Kreis verteilt sein müssen, damit örtliche Störungen vermieden werden;

b) durch Entfernung der Sekundärspulen von den Primärspulen. Die Sekundärspulen liegen über den Primärspulen und können in die Höhe gehoben werden. Dazu müssen die Eisenschenkel länger als üblich gemacht werden. Durch die Entfernung der Spulen voneinander wird die Streuung vergrößert und infolge davon die EMK der Sekundärspule verringert. Die Streuung und daher die Verringerung der EMK wächst mit der Stromstärke. Vgl. ETZ 1906, S. 1200.

c) durch Verdrehung oder Verschiebung der Spulen gegeneinander. Solche Apparate gestatten eine stetige Veränderung der Sekundärspannung, haben aber des Luftspaltes wegen einen starken Magnetisierungsstrom. Besondere Bedeutung haben die Drehtransformatoren für Mehrphasenstrom erlangt.

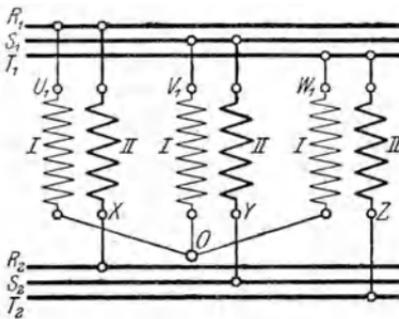


Abb. 144. Schaltung des Drehtransformators.

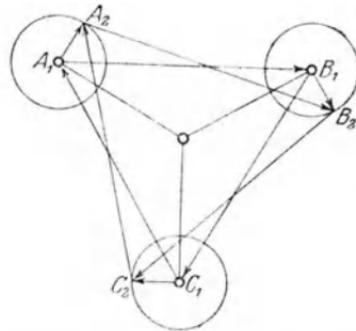


Abb. 145. Diagramm des Drehtransformators.

(327) Drehtransformator. Vgl. Abb. 337, S. 417. Er ist wie ein Induktionsmotor für Mehrphasenstrom gebaut, der mit einer selbstsperrenden Drehvorrichtung (Schnecke und Rad) versehen ist oder aus zwei Teilen besteht, deren Drehmomente gegeneinander gerichtet sind (K ü b l e r). Der drehbare Teil trägt gewöhnlich die Primärwicklung und erhält seinen Strom durch biegsame Zuleitungen, der Ständer trägt die Sekundärwicklung. Die Schaltung als Zusatztransformator stellt Abb. 144 dar. U_1, V_1, W_1 können auch mit R_2, S_2, T_2 verbunden werden. Um den Transformator abzuschalten, schaltet man zunächst Widerstände vor oder hinter die Primärwicklungen und schließt letztere dann kurz. Man kann dann auch die Sekundärwicklungen kurz schließen und darauf die Wicklungen vom Netz abtrennen. (Vgl. DRP 247 048, S i e m e n s - S c h u k -

kertwerke, und DRP 289 164, Brown, Boveri u. Cie., ETZ 1909, S. 1217.) Das Diagramm zeigt Abb. 145. Es seien $A_1 B_1$, $B_1 C_1$ und $C_1 A_1$ die drei Primärspannungen. Die Sekundärspannungen $A_1 A_2$, $B_1 B_2$, $C_1 C_2$ des Drehtransformators sind gleich groß und konstant, weil sie durch ein konstantes Drehfeld erzeugt werden, ihre Phasen werden jedoch durch die Stellung des drehbaren Teiles bestimmt. Die resultierenden Spannungen, die an den Sammelschienen R_2 , S_2 , T_2 auftreten, sind daher $A_2 B_2$, $B_2 C_2$, $C_2 A_2$. Durch Verdrehung des Drehtransformators um 180° elektrische Grade kann man daher die sekundäre Netzspannung um $2\sqrt{3} \times$ Spannung eines Zweiges der Sekundärwicklung des Transformators verändern.

(328) Der verschiebbare Transformator von Koch und Sterzel besteht aus zwei Teilen A und B, die gegeneinander verschiebbar sind, Abb. 146. Teil A

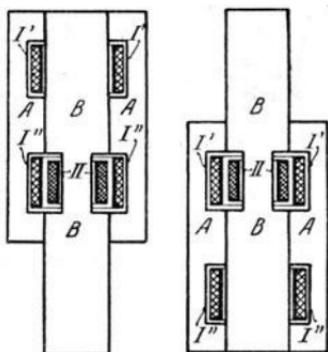


Abb. 146. Verschiebbarer Transformator.

enthält in zwei Aussparungen zwei parallelgeschaltete Primärwicklungen I' und II', die Induktionsflüsse in entgegengesetzten Richtungen erzeugen. In der ersten Stellung wirkt Wicklung I' wie eine Drosselspule, während Wicklung II' mit der auf dem Teile B befindlichen Wicklung II einen Transformator bildet. In der zweiten Stellung wirkt I'' wie eine Drosselspule, während I' und II einen Transformator miteinander bilden. Die Phasen der Ströme in II unterscheiden sich in diesen beiden Stellungen um 180° . Die in II erzeugte Zusatzspannung geht daher bei der Verschiebung von negativen zu positiven Werten über. Diese Transformatoren werden auch dreiphasig ausgeführt. Sie haben im Gegensatz zu den Drehtransformatoren einen sehr geringen Blindstrom und keine Beeinflussung der Phase der resultierenden Spannung. Vgl. Abb. 332, S. 414.

(329) Streuung. Die Induktionsflüsse Φ_1 und Φ_2 , denen nach (326) die EMKe E_1 und E_2 proportional sind, sind nicht gleich groß, sondern weichen um so mehr voneinander ab, je stärker die Ströme in den Wicklungen sind. Ihr Unterschied ist die Streuung. Bei Wechselstrom ist die Streuung, sofern man die Induktionsflüsse durch Vektoren darstellt, gleich der vektoriellen Differenz von Φ_1 und Φ_2 .

Streuungskoeffizienten (vgl. Emde, Die Arbeitsweise der Wechselstrommaschinen, J. Springer, Berlin, S. 19ff.). Hopkinson definierte die Streuung einer Dynamomaschine, indem er den größten Induktionsfluß durch die Feldmagnete Φ_1 mit dem größten Induktionsfluß durch den Anker Φ_2 verglich, und führte den Streuungskoeffizienten

$$\nu = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$$

ein. ν ist daher größer als 1. Der Wert $1/\nu$ ist eine dem Wirkungsgrad analoge Zahl.

Erweiterung von Blondel. Setzt man die Induktionsflüsse in zwei Spulen I und II gleich Φ_1' und Φ_2' , wenn nur Spule I von einem Strome durchflossen ist, und gleich Φ_1'' und Φ_2'' , wenn nur Spule II von einem Strome durchflossen ist, so folgt aus

$$e_1' = -\frac{d}{dt} (w_1 \Phi_1') \cdot 10^{-8} = -\frac{d(L_1 i_1)}{dt} \quad e_2' = -\frac{d}{dt} (w_2 \Phi_2') \cdot 10^{-8} = -\frac{d(M i_1)}{dt}$$

$$w_1 \Phi_1' \cdot 10^{-8} = L_1 i_1 \quad \text{und} \quad w_2 \Phi_2' \cdot 10^{-8} = M i_1$$

$$\text{und ebenso} \quad w_2 \Phi_2'' \cdot 10^{-8} = L_2 i_2 \quad \text{und} \quad w_1 \Phi_1'' \cdot 10^{-8} = M i_2$$

$$\text{Dann ist nach Blondel} \quad \nu_1 = \frac{\Phi_1'}{\Phi_2'} = \frac{w_2 L_1}{w_1 M} \quad \nu_2 = \frac{\Phi_2''}{\Phi_1''} = \frac{w_1 L_2}{w_2 M}$$

Heyland setzt die Verluste in den Zähler, den Induktionsfluß selbst in den Nenner, er bekommt daher die relativen Streuungsverluste. Es ist dann

$$\tau_1 = \frac{\Phi_1' - \Phi_2'}{\Phi_2'} = \nu_1 - 1 \quad \tau_2 = \frac{\Phi_2'' - \Phi_1''}{\Phi_1''} = \nu_2 - 1$$

τ_1 und τ_2 sind im allgemeinen kleine Zahlen.

Behn-Eschenburg geht von dem allgemeinen Satze aus, daß stets

$$M^2 < L_1 L_2 \text{ ist. Er setzt daher } M^2 = (1 - \varepsilon) L_1 L_2$$

$$\text{woraus} \quad \varepsilon = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = 1 - \frac{1}{\nu_1 \nu_2} \quad \varepsilon = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2}{(1 + \tau_1)(1 + \tau_2)} \approx \frac{\tau_1 + \tau_2}{1 + \tau_1 + \tau_2}$$

folgt.

Ist die Bedingung, daß derselbe Induktionsfluß durch alle Windungen einer Spule hindurchgeht, nicht erfüllt, so hat man für $w\Phi$ den Spulenfluß

$$\Psi = \sum_{n=1}^n \Phi_n \text{ zu setzen. Man kann hieraus } \Phi_{\text{mittel}} = \Psi/w \text{ bilden und mit } \Phi_{\text{mittel}}$$

wie vorher rechnen.

(330) Spulenfaktoren. Diesen Festsetzungen liegt stillschweigend die Voraussetzung zugrunde, daß die beiden Wicklungen ungefähr gleiche Größe und ähnliche Formen besitzen. Diese Voraussetzung ist bei den normalen Transformatoren und den Induktionsmotoren annähernd erfüllt. Bei den Wechselstromkommutatormotoren haben jedoch die Wicklungen auf dem Ständer und dem Läufer meistens stark voneinander abweichende Formen. Die Kommutatorwicklung ist immer gleichmäßig über den Umfang verteilt, die Wicklung auf dem Ständer aber häufig in wenigen Nuten untergebracht. Derselbe eine geometrische Fläche durchdringende Induktionsfluß erzeugt dann in zwei Wicklungen, deren größte Windung jene Fläche umschließt, auch bei gleichen Windungszahlen verschiedene große EMKe. Geht man von zwei flachen Spulen gleicher Gestalt und Größe mit gleich viel Windungen aus, und setzt man die Streuung gleich Null, so erzeugt ein Strom, der in der einen der beiden Spulen fließt, gleich große EMKe in beiden Spulen. Sondert man nun die Hälfte der Windungen der primären Wicklung zu einer besonderen Spule ab und läßt diese beständig kleiner werden, so wird ihr Einfluß auf den Induktionsfluß und die EMKe immer geringer und verschwindet im Grenzfalle ganz. Die EMK der primären Spule ist daher kleiner als die der sekundären und beträgt im Grenzfalle nur noch die Hälfte der letzteren, weil dann nur ein Transformator überbleibt, dessen Windungszahlen sich wie 1 : 2 verhalten. Schreibt man aber den Unterschied in den EMKen zweier Spulen von gleicher Windungszahl der Streuung zu, so muß man in dem geschilderten Falle von negativer Streuung sprechen. Dies tun Rogowski und Simons (ETZ 1908, S. 535). Statt mit Φ_{mittel} rechnen sie mit dem Induktionsfluß Φ_{max} der Windung, die von allen den größten Induktionsfluß umschlingt, indem sie

$$\Phi_{\text{mittel}} = F \cdot \Phi_{\text{max}}$$

setzen. Die Spulenfaktoren F haben für jede Art der Spulen und des Induktionsflusses einen besonderen Wert. Es sei Φ_{12}' der nur von i_1 herrührende Induktionsfluß, der auch mit allen oder einem Teil der Windungen der Sekundärspule verkettet ist, Φ_{1s}' der nur von i_1 herrührende Induktionsfluß, der nur mit

allen oder einem Teil der Windungen der Primärwicklung verkettet ist. Φ_{21}'' und Φ_{2s}'' seien die entsprechenden nur von i_2 herrührenden Flüsse. Sie setzen nun

$$e_1' = -w_1 \cdot \frac{d}{dt} (F_1 \Phi_{12}' + F_{1s} \Phi_{1s}') \cdot 10^{-8} = -\frac{d}{dt} (L_1 i_1)$$

$$e_2' = -w_2 \cdot \frac{d}{dt} (F_{12} \Phi_{12}') \cdot 10^{-8} = -\frac{d}{dt} (M i_1)$$

woraus
$$\nu_1 = \frac{w_2 L_1}{w_1 M} = \frac{F_1 \Phi_{12}' + F_{1s} \Phi_{1s}'}{F_{12} \Phi_{12}'}$$

und ebenso
$$\nu_2 = \frac{w_1 L_2}{w_2 M} = \frac{F_2 \Phi_{21}'' + F_{2s} \Phi_{2s}''}{F_{21} \Phi_{21}''}$$

Weiter
$$L_1 = \frac{w_1}{w_2} M + S_1 \qquad L_2 = \frac{w_2}{w_1} M + S_2$$

Daraus endlich

$$L_1 = w_1 \frac{F_1 \Phi_{12}' + F_{1s} \Phi_{1s}'}{i_1} \cdot 10^{-8} \qquad L_2 = w_2 \frac{F_2 \Phi_{21}'' + F_{2s} \Phi_{2s}''}{i_2} \cdot 10^{-8}$$

$$M = w_2 \frac{F_{12} \Phi_{12}'}{i_1} \cdot 10^{-8} \qquad M = w_1 \frac{F_{21} \Phi_{21}''}{i_2} \cdot 10^{-8}$$

$$S_1 = w_1 \frac{(F_1 - F_{12}) \Phi_{12}' + F_{1s} \Phi_{1s}'}{i_1} \cdot 10^{-8} \qquad S_2 = w_2 \frac{(F_2 - F_{21}) \Phi_{21}'' + F_{2s} \Phi_{2s}''}{i_2} \cdot 10^{-8}$$

i_1 und i_2 sind in Ampere einzusetzen, L_1 , L_2 , M , S_1 und S_2 erhält man dann in Henry.

Eine der beiden Streuungsgrößen S_1 und S_2 kann negativ, das zugehörige ν also kleiner als eins sein.

(331) Berechnung der Streuung. Bei ineinanderliegenden Spulen bildet der zwischen der inneren und der äußeren Spule hindurchgehende Induktionsfluß die Streuung. Die innere Spule erzeugt in diesem Raum überhaupt kein Feld oder nur ein so schwaches, daß man es für praktische Zwecke vernachlässigen kann. Die MMK für den Streufluß ist daher bei ineinanderliegenden Spulen $0,4 \pi w_a I_a$ wenn I_a die Stromstärke in der äußeren Spule ist. Als Querschnitt kann man den Ring ansehen, der den Raum zwischen den Wicklungen und nach jeder Seite noch ein Drittel der Wicklungstiefe umfaßt, als Länge, die für die Berechnung des magnetischen Kreises in Betracht kommt, die Spulenhöhe, vermehrt um einen Zuschlag, dessen Größe sich nach der Konstruktion richtet und etwa 50% (bei langen Spulen) bis 100% (bei kurzen Spulen) beträgt. Es schließt sich nämlich ein großer Teil der Streulinien durch die Eisenjoche, und der Rest findet in dem umgebenden Raume durch Ausbreitung einen so großen Querschnitt, daß der magnetische Widerstand dort verschwindend klein wird.

Bei nebeneinanderliegenden Spulen geht der Streufluß zwischen den primären und sekundären Spulen hindurch. Man kann als MMK $\frac{1}{2} \cdot 0,4 \pi \cdot (w_1 I_1 + w_2 I_2)$ annehmen, als Widerstand des Streuflusses den Pfad um eine Primärspule herum. Hierbei ist wieder zu beachten, daß sich innerhalb der Spule Eisen befindet, außen ebenfalls oder der Querschnitt sehr groß ist; es kommen also wesentlich die Teile des Pfades zwischen den Spulen in Betracht, wobei wieder ein Teil der Spulendicke (je etwa $\frac{1}{6}$) hinzuzuschlagen ist. Die Pfadlänge ist daher die doppelte radiale Abmessung vom Eisen bis zum Außenrand der Spulen, vermehrt um einen Zuschlag, der sich nach der Konstruktion richtet. Bei den Endspulen ist der magnetische Widerstand etwa halb so groß.

(332) Transformatoridiagramm bei konzentrischen Spulen und eisengeschlossenem magnetischen Kreis (Abb. 147). Der die Sekundärwicklung durchsetzende Induktionsfluß Φ_2 erzeugt die EMK E_2 in der Sekundärwicklung, gegen die die Stromstärke I_2 die Phasenverschiebung φ_2 besitzt. Zieht man den Ohmschen Spannungsverlust $I_2 R_2$ von E_2 ab, so erhält man die sekundäre Klemmenspannung U_2 . Zwischen I_2 und U_2 besteht die Phasenverschiebung φ_2 . Diese hängt nur von den Konstanten des äußeren sekundären Stromkreises ab. Zur Erzeugung von Φ_2 ist die magnetomotorische Kraft H_2 erforderlich. Da nun $0,4\pi(\Delta_1 \mp \Delta_2) = H_2$ sein muß, wenn Δ die Durchflutung ist, so findet man leicht $0,4\pi \Delta_1$ und durch Division mit $0,4\pi w$ die primäre Stromstärke I_1 . Addiert man zu Φ_2 die Streuung Φ_s , die gleichphasig mit I_1 angenommen werden kann, so erhält man Φ_1 und senkrecht dazu die in der Primärwicklung erzeugte EMK E_1 . Die primäre Klemmenspannung U_1 ist gleich $E_1 \hat{=} I_1 R_1$. Die Vektoren U_1 und I_1 schließen einen stumpfen Winkel, die Vektoren U_2 und I_2 einen spitzen Winkel miteinander ein. Die Primärwicklung verbraucht, die Sekundärwicklung erzeugt elektrische Leistung.

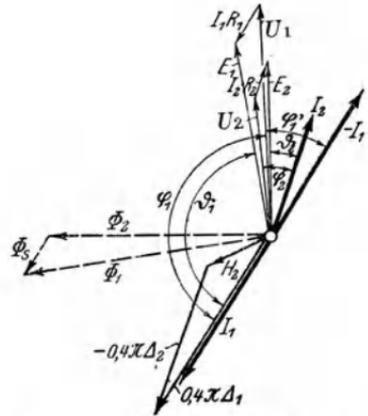


Abb. 147. Vektordiagramm des normalen Transformators.

Spannungsverlust im Transformator. Rechnet man alle Größen der Primärwicklung auf die Windungszahl der Sekundärwicklung um, so hat man I_1 mit w_1/w_2 , E_1 , U_1 und die Spannungsverluste im Primärkreis mit w_2/w_1 zu multiplizieren. Die umgerechneten Größen sollen durch einen Strich gekennzeichnet werden. Man kann sich nun denken, daß E_1' die Summe von zwei EMKEN ist, nämlich von E_2 und E_s' , wobei E_s' durch Φ_s erzeugt wird. Man hat dann

$$U_1' = U_2 \hat{+} I_2 R_2 \hat{+} E_s' \hat{=} I_1' R_1' \quad \text{oder} \quad U_1' \hat{=} U_2 = I_2 R_2 \hat{=} I_1' R_1' \hat{+} E_s'$$

Der Spannungsabfall setzt sich also aus den Spannungsverlusten durch Ohmschen Widerstand und aus dem induktiven Spannungsverlust E_s' zusammen. Da I_1 und I_2 bei größerer Belastung nahezu 180° Phasenverschiebung gegeneinander haben, so können $I_1' R_1'$ und $I_2 R_2$ algebraisch addiert und ihre Summe gleich E_w' parallel zu I_2 gezeichnet werden, während E_s' senkrecht auf I_2 zu zeichnen ist, Abb. 148. Der induktive Spannungsverlust ist um so geringer, je geringer der Querschnitt des Streuflusses ist. Hochspannungstransformatoren haben daher wegen des größeren Abstandes der Spulen der Primär- und der Sekundärwicklung voneinander und infolge der erforderlichen dickeren Isolierschichten einen höheren induktiven Spannungsverlust als Transformatoren für geringere Spannungen.

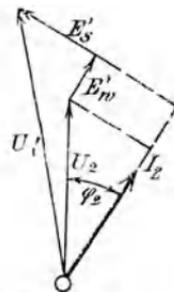


Abb. 148. Vektordiagramm der Spannungsverluste im normalen Transformator.

Kurze gedrungene Schenkel ergeben geringere Streuung, erfordern aber schwerere Joche, als lange dünne Schenkel.

(333) Einfluß der Phasenverschiebung auf den Spannungsabfall. Abb. 148 zeigt, daß der induktive Spannungsverlust einen großen Spannungsabfall bei stark

induktiver Belastung (z. B. durch Induktionsmotoren), einen geringeren Spannungsabfall bei induktionsfreier Belastung verursacht. Bei voreilem Strom kann durch den induktiven Spannungsabfall die Spannung sogar erhöht werden. Für die Spannung, die Stromstärke und den Leistungsfaktor des Primärkreises findet man aus Abb. 148 die Formeln:

$$U_1' = \sqrt{(U_2 \cos \varphi_2 + E_{1c}')^2 + (U_2 \sin \varphi_2 + E_s')^2}, \quad \cos \varphi_1 = \frac{U_2 \cos \varphi_2 + E_{1c}'}{U_1'}$$

Für praktische Rechnungen ist es am einfachsten, alle Größen in Prozenten von U_2 auszudrücken. Man erhält dann in $U_1' - U_2$ den prozentualen Spannungsverlust. Es sei z. B. $U_2 = 100$, $E_{1c} = 2$, $E_s = 4$, $\cos \varphi_2 = 0,80$, $\sin \varphi_2 = 0,60$. Dann erhält man

$$U_1' = \sqrt{(80 + 2)^2 + (60 + 4)^2} = \sqrt{82^2 + 64^2} = 104,02\%$$

Der Spannungsverlust ist also auf die Sekundärspannung bezogen 4,02%.

(334) Das allgemeine Transformordiagramm für Transformatoren mit nebeneinander liegenden Spulen und Luftspalt (vgl. Abb. 149 und 150). Die Magnetisierung der rechten Ringhälfte erfordert die MMK H_2 . Die Potentialdifferenz zwischen A und B ist daher (310,2) $\Pi_{AB} = H_2 \widehat{0,4\pi \Delta_2}$. Sie erzeugt den sekundären Streufluß Φ_{s2} . Man kann Φ_{s2} proportional und phasengleich mit Π_{AB} annehmen. Im Luftspalt befindet sich daher

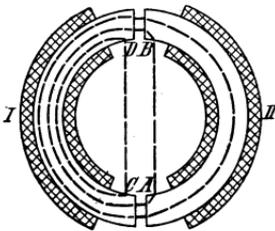


Abb. 149. Streuung im allgemeinen Transformator.

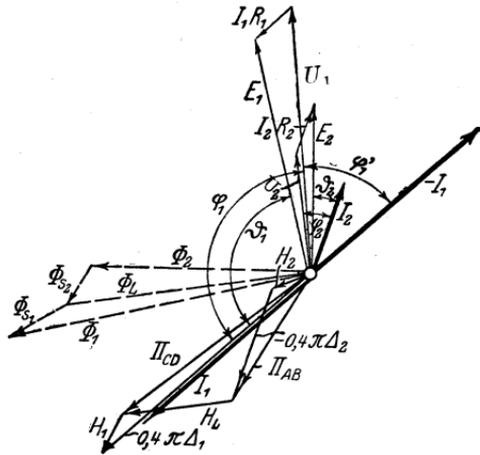


Abb. 150. Vektordiagramm des allgemeinen Transformators.

der Induktionsfluß $\Phi_L = \Phi_2 + \Phi_{s2}$. Die Durchmagnetisierung der Luft erfordert die MMK H_L , die zu Π_{AB} addiert nach (310,3) die Potentialdifferenz Π_{CD} zwischen C und D ergibt. Π_{CD} erzeugt den primären Streufluß Φ_{s1} , der proportional und phasengleich mit Π_{CD} angenommen werden kann und zu Φ_L addiert den primären Induktionsfluß Φ_1 ergibt. Zur Magnetisierung der linken Ringhälfte ist noch die MMK H_1 erforderlich, die nach (310,4) zu Φ_{CD} addiert die Größe $0,4\pi \Delta_1$ ergibt. Dadurch ist Phase und Größe von I_1 festgelegt. Die weitere Konstruktion ergibt sich genau wie in (332). Bei der in Abb. 149 gezeichneten Anordnung ist die Streuung erheblich, sie wird um so mehr verringert, je öfter man unter Wegfall der Luftspalte primäre und sekundäre Spulen miteinander abwechseln läßt. Es fällt dann H_L weg, im übrigen bleibt das Diagramm im wesentlichen dasselbe. Daher ist auch Diagramm Abb. 148 auf diesen Fall anwendbar.

(335) **Einfluß der Frequenz f auf die Leistung.** Wenn bei gegebener Windungszahl w die Leistung konstant bleiben soll, so muß auch das Produkt $f\mathfrak{B}$ konstant bleiben. \mathfrak{B} kann über eine bestimmte Grenze nicht gesteigert werden. Die Leistung muß daher mit sinkender Frequenz abnehmen. Bei 25 Per/s werden die Transformatoren bis zu 40% schwerer als bei 50 Per/s. Die Wirbelstromverluste bleiben, so lange $f\mathfrak{B}$ konstant ist, auch konstant. Die Hystereseverluste wachsen mit abnehmender Frequenz, daher auch die Gesamtverluste.

(336) Die **Überlastbarkeit** der Transformatoren ist sehr groß, besonders der Öltransformatoren, sofern der bei starker Überlastung auftretende Spannungsabfall keine Betriebsstörung verursacht. Für kurzzeitige Betriebe findet man Überlastungen bis zu 300%, für intermittierende solche bis zu 200% zugelassen. Die Überlastbarkeit von Öltransformatoren ist wesentlich eine Funktion der Wärmekapazität der Ölfüllung.

(337) **Der Wirkungsgrad eines Transformators** ändert sich mit der Belastung (vgl. Abb. 151). Bei konstanter Spannung sind die Verluste im Eisen von der Belastung unabhängig, prozentual sind sie also umgekehrt proportional der jeweiligen Belastung. Dagegen nehmen die Verluste durch Stromwärme proportional dem Quadrat der Belastung, also prozentual proportional mit der Belastung ab. Die Stromwärme verteilt man zu etwa gleichen Teilen auf die beiden Wicklungen, geht aber bei Lichttransformatoren mittlerer Größe (von etwa 5 kW an) nicht gern über 2%, bei kleinen nicht über 3% der vollen Leistung. Geringe Verluste im Eisen gewährleisten einen hohen Wirkungsgrad bei schwacher Belastung, haben aber wegen der geringen Magnetisierung höhere Spannungsverluste zur Folge; bei dauernder starker Belastung ist die Magnetisierung stark zu wählen, weil höhere Verluste im Eisen zulässig sind. Der Wirkungsgrad beträgt bei kleinen Transformatoren von 1 kW etwa 92%, er erreicht bei mittleren 96 bis 97% und steigt bei den größten Ausführungen von etwa 10 000 kW an auf etwa 99%. Ist der Leistungsfaktor kleiner als eins, so sind die Verluste prozentual höher, der Wirkungsgrad ist also nicht so hoch.

Jahreswirkungsgrad heißt das Verhältnis der in einem Jahre abgegebenen sekundären Arbeit zu der im gleichen Zeitraum verbrauchten primären Arbeit. Bei der Abmessung des Jahreswirkungsgrades ist nicht zu übersehen, daß der Verbrauch an Leerlaufarbeit über Tag nicht zu den gleichen Kosten angesetzt werden darf, wie z. B. der Verbrauch an elektrischer Arbeit zur Zeit der maximalen Stromabgabe mit Beleuchtungsmaximum. Eine unbedeutende Verringerung der Eisenverluste auf Kosten einer wesentlichen Verteuerung des ganzen Transformators ist zu verwerfen.

(338) **Entwurf der Transformatoren.** So einfach das Prinzip des Transformators ist, so vielseitig sind die Gesichtspunkte, nach denen er zu entwerfen ist. Bei induktionsfreier Belastung, z. B. durch Glühlampen, kann man große Streuung oder induktiven Spannungsverlust zulassen, weil dieser dann nur wenig Einfluß auf den Spannungsverlust hat, wie Abb. 148 erkennen läßt; bei induktiver Belastung, z. B. durch Motoren, verursacht die Streuung größere Spannungsschwankungen. Denkt man sich die Schenkel eines Transformators auf die Hälfte verkürzt, ihren Querschnitt verdoppelt, so ist das Gewicht der Schenkel dasselbe geblieben, jede Windung erzeugt jetzt aber eine doppelt so große EMK, es ist also nur die halbe Windungszahl für dieselbe Spannung erforderlich. Da die Länge

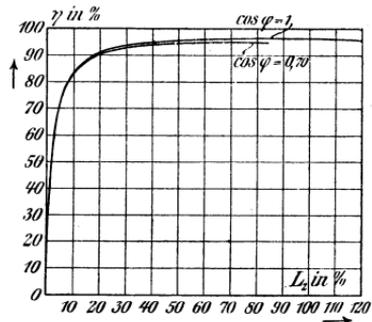


Abb. 151.
Wirkungsgrad des Transformators.

einer Windung aber nicht auf das Doppelte steigt, so braucht man für dieselbe Leistung weniger Kupfer, andererseits aber mehr Eisen, weil die Joche auch einen doppelt so großen Querschnitt erhalten müssen, mithin schwerer werden. Man kann die Leistung daher angenähert proportional dem Gewicht der Schenkel annehmen. Da ferner der Abstand der Wicklungen voneinander, röhrenförmige Anordnung vorausgesetzt, nicht größer zu werden braucht, so wächst der für die Streuung in Betracht kommende Querschnitt zwischen den Wicklungen weniger stark als der Eisenquerschnitt, mithin wird die Streuung geringer. Geringe Streuung erhält man daher bei kurzen dicken Schenkeln, bei starkem Induktionsfluß, bei eng übereinander geschobenen oder innig gemischten Primär- und Sekundärwicklungen. Die Streuung und der ihr proportionale induktive Spannungsverlust sind um so größer, je höher die Spannung ist, weil der Abstand zwischen den Wicklungen bei hohen Spannungen wegen der Isolierung größer gewählt werden muß. Bei sehr hohen Spannungen teilt man daher auch wohl die Hochspannungswicklung und ordnet den einen Teil innerhalb, den anderen außerhalb der Niederspannungswicklung an. Wie groß der induktive Spannungsverlust ist, hängt von der Nennleistung des Transformators ab. Bei kleineren Transformatoren für mäßig hohe Spannungen (3000 V) kann man 3 bis 4% annehmen, bei größeren Transformatoren für hohe Spannungen (15 000 bis 30 000 V) 5 bis 6%, für Höchstspannungen (100 000 V) 9 bis 10%. Das Gewicht je Leistungseinheit beträgt bei kleinen Transformatoren (10 kVA) etwa 15 kg/kVA, bei mittleren (1000 kVA) 5 bis 10 kg/kVA, bei sehr großen (30 000 kVA) etwa 2,8 bis 2,7 kg/kVA. Die magnetische Induktion mittelgroßer Transformatoren beträgt bei 50 Per/s bis zu 14 000 Gauß. Dabei nimmt man hochlegierte Bleche von 0,3 bis 0,35 mm Stärke. Vielfach gilt als Regel, die Verluste in den Wicklungen gleich den Verlusten im Eisen zu machen und die Verluste in den Wicklungen gleichmäßig auf beide Wicklungen zu verteilen, doch stoßen andere Gesichtspunkte diese Regeln vielfach um, z. B. die Forderung eines guten Jahreswirkungsgrades, die bei langen Leerlaufzeiten schwache Magnetisierung verlangt und dadurch zu hohen Kupferverlusten führt. Kurze dicke Schenkel verursachen, weil sie schwerere Joche verlangen, größere Eisenverluste als lange dünne Schenkel. Bei Kurzschlüssen treten starke Kräfte auf, die die Spulen aus ihrer Lage zu bringen suchen. Diese müssen daher gegen Lagenänderungen gesichert werden (320). (Vgl. Vidmar, Moderne Transformatorenfragen. Braunschweig 1915, Vieweg u. Sohn. D. wirtschaftliche Aufbau d. elektr. Masch. Berlin 1918, Springer.)

(339) Spartransformatoren oder Transformatoren mit einspulgiger Wicklung (Autotransformatoren, Reduktoren) werden hauptsächlich zum Anschluß von Bogenlampen an Niederspannungsnetze sowie zum Anlassen und Regulieren von Wechselstrommotoren benutzt. Bei gewöhnlichen Transformatoren sind Primär- und Sekundärwicklung sorgfältig voneinander isoliert. Braucht diese Bedingung aber nicht erfüllt zu werden — z. B. wenn beiderseits Niederspannung herrscht —, so gestattet die Sparschaltung, besonders bei nicht zu großem Übersetzungsverhältnis, die Transformatoren kleiner zu bauen. Es wird (Abb. 152) nur eine fortlaufende Wicklung zwischen den Klemmen A und B vorgesehen, die Primärspannung wird an diese Klemmen gelegt, der Sekundärkreis dagegen von einem mittleren Punkte C und dem Punkte B abgezweigt. Es verhält sich dann bei Leerlauf genau und bei Belastung angenähert U_1 zu U_2 wie die Windungszahl zwischen

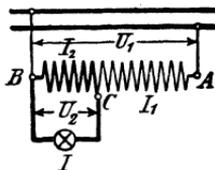


Abb. 152.
Einspulgiger Transformator, Sparschaltung.

AB zur Windungszahl zwischen CB. Die Stromstärken verhalten sich nahezu umgekehrt wie die Windungszahlen, weswegen der Teil CB stärkeren Querschnitt erhalten muß. Die Stromstärke im äußeren Sekundärkreis ist angenähert gleich der Summe der Stromstärken in AC und BC. Man kann die Primärspannung auch

an BC anlegen und den Sekundärstrom von AB abnehmen. Die Spannung ist dann im Verbrauchskreise höher als im Netz. Die Sparwirkung kommt dadurch zustande, daß man den Teil BC für einen schwächeren Strom wickeln kann und im ganzen nur so viel Windungen aufzubringen braucht, wie bei getrennten Wicklungen die Primärwicklung allein erhalten müßte.

Die Sparschaltung kann auch bei Drehstromtransformatoren angewandt werden, wenn die drei Wicklungsarme in Stern geschaltet sind.

(340) Ausgleichstransformatoren und Spannungsteiler. Man kann in Abb. 152 auch an AC einen Sekundärkreis anschließen. Der Transformator wirkt dann als Spannungsteiler (Divisor, Kompensator). Den Punkt C kann man z. B., wenn er in der Mitte von AB liegt, mit dem Mittelleiter eines Dreileiter-systems verbinden, um den Ausgleich zu sichern. Ist der Unterschied der Stromstärken in beiden Hälften höchstens gleich i , so muß der Ausgleicher für die Stromstärke $\frac{1}{2} \cdot i$ gebaut sein. Die Wicklungsabteilungen müssen gleichmäßig auf beide Schenkel verteilt sein, wenn nicht starke Streuung auftreten soll. Dasselbe gilt für Dreileitertransformatoren, deren Schaltung Abb. 153 angibt.

Soll ein Nulleiter an einen Drehstromtransformator angeschlossen werden, um beliebig Lampen zwischen je einen Außenleiter und den Nulleiter schalten zu können, so muß man entweder die Zickzack-Schaltung (343) anwenden, oder die Transformatoren primär im Dreieck, sekundär in Stern schalten. Durch letztere Schaltung (Dobrowolsky) wird die Spannung in jedem Zweige der Sekundärwicklung konstant gehalten, weil die Spannung an den einzelnen Zweigen der Primärwicklung konstant bleibt.

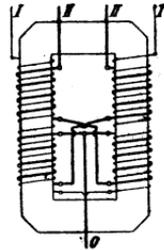


Abb. 153. Transformator mit Dreileiter-schaltung.

(341) Zusatztransformatoren. Man kann eine beliebige vorhandene Spannung durch Zusatztransformatoren erhöhen. In Verbindung mit einem Haupttransformator wird die Primärwicklung des Zusatztransformators von der Hoch- oder von der Niederspannung gespeist, die Sekundärwicklung mit der Sekundärwicklung des Haupttransformators in Reihe geschaltet. Häufig wird gerade zu diesem Zweck die Sparschaltung angewendet. Über den drehbaren Zusatztransformator bei Drehstrom vgl. (327).

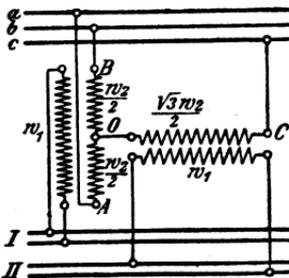


Abb. 154. Scottsche Schaltung zur Transformation von Drehstrom in Zweiphasenstrom.

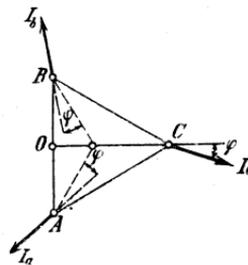


Abb. 155. Vektordiagramm der Scottschen Schaltung.

(342) Transformatoren zum Übergang von Zweiphasenstrom auf Dreiphasenstrom (Scotts Schaltung). Zum Übergang von Zweiphasen- auf Dreiphasenstrom dienen zwei Transformatoren in der Schaltung nach Abb. 154 und mit den in die Abbildung eingeschriebenen Windungsverhältnissen. Die Erklärung der Wirkungs-

weise ergibt sich aus dem Diagramm (Abb. 155). AB , BC und CA sind die drei Drehstromspannungen des Sekundärkreises; die Potentiale der Punkte A , B , C und O in Abb. 154 werden durch die gleichnamigen Punkte in Abb. 155 dargestellt. Weitere Schaltungen siehe Rasch ETZ 1911, S. 681. Kübler, ETZ 1921. S. 13.

(343) Schaltung der Zweige bei Drehstrom. Die drei Zweige jeder der beiden Wicklungen können in Stern oder in Dreieck geschaltet werden. Die Sternschaltung ergibt das $\sqrt{3}$ -fache der Spannung der Dreieckschaltung. Um bei ungleicher Belastung der drei Zweige bei Sternschaltung einen besseren Spannungsausgleich zu erhalten, werden auch wohl die Sekundärwicklungen I, II, III der drei Schenkel in je zwei Teile a und b zerlegt und Ia mit IIb, IIa mit IIIb, IIIa mit Ib in Reihe geschaltet, und zwar so, daß ihre EMKe 60° und nicht 120° Phasenverschiebung gegeneinander besitzen, — Zickzackschaltung. Es tritt daher bei Zerlegung in je zwei gleiche Teile in der resultierenden sekundären EMK ein Verlust im Verhältnis $\sqrt{3}:2$ ein.

(344) Parallel- und Reihenschaltung der Transformatoren. Die Primärwicklungen lassen sich immer parallel schalten, wenn sie für gleiche Spannungen bestimmt sind. Bleibt die Primärspannung konstant, so bleibt angenähert auch die Sekundärspannung konstant; die Stromverbraucher in jedem Kreise sind daher parallel zu schalten. Sollen die Sekundärwicklungen auch parallel geschaltet werden, so müssen die Transformatoren dieselbe Sekundärspannung und im wesentlichen gleich große ohmsche und gleich große induktive Spannungsverluste haben. Der Parallelbetrieb wird daher unbefriedigend, wenn die Leistungen zu verschieden groß sind. Der VDE empfiehlt vom Parallelbetrieb abzusehen, wenn das Nennleistungsverhältnis größer als $3:1$ ist. Bei einphasigem Wechselstrom genügt es, auf die richtige Verbindung der Klemmen miteinander zu achten. Drehstromtransformatoren müssen dagegen bestimmten Schaltungsregeln genügen, damit sie sich zugleich primär und sekundär parallel schalten lassen. Das Dreieck der Sekundärspannungen hat nämlich eine ganz bestimmte Lage zu dem Dreieck der Primärspannungen. Die Lage des primären Spannungsdreiecks ist infolge der Parallelschaltung für alle Transformatoren dieselbe, die Lage des sekundären Spannungsdreiecks muß nun auch für alle Transformatoren dieselbe Lage haben. Dies ist z. B. der Fall, wenn alle Transformatoren dieselbe Schaltung besitzen, aber z. B. nicht, wenn ein Teil primär und sekundär in Stern, der andere etwa primär in Stern, sekundär in Dreieck geschaltet ist. Vgl. F a y e - H a n s e n, ETZ 1908, S. 1081. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Schaltungen findet sich in den Maschinenregeln, § 2.

Die Anschlüsse sind immer in gleichartiger Weise aus dem Transformator herauszuführen und genau zu bezeichnen, damit bei der Parallelschaltung mehrerer Transformatoren auf der Primär- und Sekundärseite Kurzschlüsse vermieden werden.

Die Primärwicklungen lassen sich auch in Reihe schalten, wenn sie für dieselbe Stromstärke bestimmt sind. Bei konstanter Stromstärke im Primärkreise bleibt angenähert auch die Stromstärke im Sekundärkreise konstant; die Stromverbraucher in jedem Kreise sind daher in Reihe zu schalten. Durch Kurzschließen der Sekundärwicklung wird der Transformator außer Betrieb gesetzt. Diese Schaltung dient z. B. zum Anschluß von Bogenlampen an Hochspannungskreise bei sehr einfacher Leitungsführung und gefahrloser Bedienung der Lampen. Zu beachten ist, daß die Isolation der Primärwicklung stark genug sein muß, um der vollen Netzspannung zu widerstehen. Wird ein Sekundärkreis unterbrochen, so fällt seine entmagnetisierende Wirkung weg, während die primäre Stromstärke konstant bleibt. Die hierdurch verursachte Steigerung des Magnetismus kann eine übermäßige Erwärmung des Eisens zur Folge haben und muß möglichst vermieden werden. Man hilft sich entweder durch Anordnung eines Luftspaltes im

Eisenkern wie bei Drosselspulen oder durch selbsttätige Kurzschließer im Sekundärkreis, die beim Verlöschen der Lampe in Wirksamkeit treten.

(345) Meßwandler (229). Zum Messen hoher Wechselspannungen werden durchweg „Spannungswandler“, zur Messung der Stromstärke in Hochspannungsanlagen und überhaupt starker Wechselströme „Stromwandler“ angewendet. Diese Transformatoren dienen auch zur Speisung der Wicklungen von anderen Meßgeräten, wie Leistungsmessern, Zählern, Frequenzmessern, und werden daher so eingerichtet, daß an einen Spannungswandler mehrere Geräte in Parallelschaltung, an einen Stromwandler mehrere Geräte in Reihenschaltung angeschlossen werden können. Ferner werden die Wicklungen von Stromschützen und Auslösespulen an solche Transformatoren angeschlossen. Sie bieten die Vorteile, daß alle Wicklungen für niedrige Spannungen und mäßig starke Ströme hergestellt und, wenn der Sekundärkreis geerdet ist, ohne Gefahr berührt werden können, sowie den Vorteil bequemer Leitungsverlegung. Stromwandler müssen möglichst geringen Leerlaufstrom haben, damit die Stromstärken bei jeder Größe einander möglichst genau proportional sind. Beim Anschluß von Leistungsmessern und Zählern soll auch der Fehlerwinkel, d. h. die Abweichung der Phasenverschiebung zwischen dem Primär- und dem Sekundärstrom von 180° , vgl. Abb. 147, möglichst gering sein. Dies wird beim Stromwandler durch Verwendung besten Eisens, vorzüglichen Eisen-schluß und geringe Sättigung des Eisens (\mathfrak{B} = einigen 100 Gauß) erreicht. Bei starken Strömen genügt es für die Primärwicklung, den geraden Leiter einmal durch das Fenster des Transformators hindurchzuführen. Dabei ist unter Umständen die primäre Durchflutung schon so groß, daß für den Sekundärkreis, der gewöhnlich für 5 A gewickelt wird, eine sehr große Windungszahl erforderlich ist, um in ihm eine ebensogroße Durchflutung zu erreichen. Aus der vorgeschriebenen Spannung (gleich der Summe der Spannungsverluste der in Reihe geschalteten Meßgeräte) ergibt sich dann nach der Gleichung in (326) der Induktionsfluß und aus ihm der erforderliche Eisenquerschnitt. Die Sekundärwicklung darf nicht geöffnet, sondern muß kurz geschlossen werden, wenn der Stromwandler außer Betrieb gesetzt werden soll. Auf Kurzschlußsicherheit ist besonders Wert zu legen. Diese läßt sich am besten bei gerader Durchführung des Primärleiters erreichen, die bis herab auf 50 A möglich ist. Neuerdings werden die Stromwandler vielfach so gebaut, daß sie zugleich als Durchführung durch Wände und Decken dienen (vgl. Abb. 336, S. 417). Spannungswandler arbeiten dagegen mit hoher magnetischer Induktion ($\mathfrak{B} \approx 10\,000$ Gauß), damit der „Fehl-winkel“ möglichst klein wird. Die Sekundärwicklung des Spannungswandlers die gewöhnlich für 110 V bemessen wird, darf nie kurz geschlossen werden. Im Allgemeinen ist bei den Meßwandlern der Anschluß von drei Meßgeräten zulässig¹⁾. Abbildungen von Meßwandlern s. Abb. 334, 446, 449.

(346) Frequenztransformatoren (vgl. Diebelhorst, ETZ 1914, S. 562, Epstein, Joly, Vallauri) dienen zur Erhöhung der Frequenz der von Hochfrequenzmaschinen erzeugten Ströme für drahtlose Telegraphie. Sie beruhen darauf, daß man durch starke Gleichstrommagnetisierung bis nahe zur Sättigungsgrenze den Verlauf des Induktionsflusses gegenüber dem sinusförmigen Verlauf stark verzerrt und eine der dadurch in der sekundären Stromkurve auftretenden Oberschwingungen durch einen Resonanzschwingungskreis möglichst verstärkt. Wird z. B. der Eisenkern durch einen Gleichstrom hoch magnetisiert, so enthält die Kurve des Induktionsflusses eine besonders starke Oberschwingung doppelter Frequenz. Durch Verwendung zweier gleichsinnig mit Gleichstrom

1) Vgl. Möllinger u. Gewecke, Zum Diagramm des Spannungs- und des Stromwandlers. ETZ 1914, S. 922, 1912, S. 270. — Gewecke, Einfaches Diagramm des Drehstromspannungswandlers, ETZ 1915, S. 253. — Schrader, Kurzschlußsichere Stromwandler. ETZ 1922, S. 1478. — Möllinger, Wirkungsweise d. Motorzähler und Meßwandler. Berlin 1917, Springer.

magnetisierter Transformatoren mit **gegensinnig** in Reihe geschalteten Primär- und **gleichsinnig** in Reihe geschalteten Sekundärwicklungen kann man die Grundschwingung zum Verschwinden bringen und die Amplitude der ersten Oberschwingung verdoppeln. Durch wiederholte Frequenztransformation kann man die vierfache, achtfache usw. Frequenz herstellen. Die Anordnung gestattet nur eine Transformation von niedrigerer auf höhere Frequenz. Die Eisenkerne der Transformatoren werden aus dünnen, etwa 0,07 mm starken hochlegierten Eisenblechen in Ringform hergestellt. Bei der hohen Frequenz fallen Eisen- und Kupfergewicht sowie die Windungszahlen gering aus. Man kann an Kupfer sparen, wenn man zwei ringförmige Eisenkerne übereinander anordnet, jeden mit einer Primärwicklung versieht und die Sekundärwicklung um beide Eisenkerne gemeinsam legt. Die Transformatoren werden durch Öl gekühlt.

Dritter Abschnitt.

Dynamomaschinen.

Dynamomaschinen im allgemeinen.

(347) Arten der Maschinen; Maschinenteile. Die Maschinen zur Umwandlung mechanischer in elektrische Leistung heißen Dynamomaschinen, die Maschinen zur Umwandlung von elektrischer in mechanische Leistung heißen Elektromotoren oder Motoren. Der Übergang zwischen Generator- und Motorwirkung ist bei sämtlichen Maschinen möglich und wird in vielen Fällen ausgenutzt; es werden daher in diesem Abschnitt auch die Motoren behandelt.

Hauptbestandteile der Dynamomaschinen sind die Feldmagnete und der Anker, von denen ein Teil umlaufen muß, damit mechanische Leistung verrichtet werden kann. Weitere wesentliche Bestandteile sind Kommutator (Kollektor) oder Schleifringe, Bürsten, Bürstenhalter, Bürstenträger, Klemmen-, Umschalte- oder Kurzschlußvorrichtungen, Gehäuse, Welle, Lager und Grundplatte.

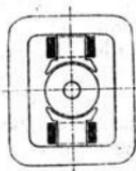


Abb. 156. Symmetrischer Außenpoltyp, zweipolig.

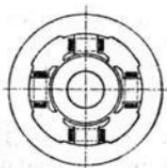


Abb. 157. Vierpoliger Außenpoltyp.

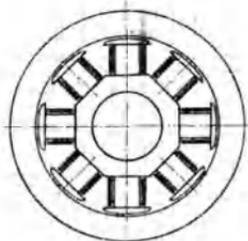


Abb. 158. Achtpoliger Innenpoltyp.

Nach der Form, in der die elektrische Leistung bei Stromerzeugern geliefert und bei Motoren verbraucht wird, unterscheidet man Gleichstrom-, Wechselstrom- oder genauer Einphasenstrom-, Zweiphasenstrom- und Drehstrommaschinen.

Nach der Art des Aufbaus unterscheidet man Außenpol-, Abb. 156, 157, Innenpol-, Abb. 158 und Seitenpolmaschinen sowie offene und gekapselte Maschinen, nach der Zahl der Pole zweipolige, vierpolige, sechspolige usw. Maschinen.

(348) Mechanischer Aufbau. Vgl. die Beispiele ausgeführter Maschinen Abb. 297 bis 330. Die Pole sollen mit Rücksicht auf symmetrische Ausbildung des magnetischen Flusses und auf magnetische Zugkräfte zum Anker symmetrisch stehen. Außenpolmaschinen werden in der Regel mit feststehendem Polgehäuse ausgeführt, als Drehstrommaschinen aber häufig mit umlaufenden Feldmagneten, um den Maschinen ein möglichst großes Trägheitsmoment zu geben (vgl. Abb. 304, S. 396).

Das Gehäuse kann entweder zugleich die Füße der Maschinen und die Lager für die Welle (Lagerschilder) tragen oder auf einer besonderen Grundplatte montiert werden.

Kleine Maschinen bis zu etwa 75 kW bei 600 U/min erhalten in der Regel „Lagerschilder“, die mit dem Polgehäuse verschraubt werden (Abb. 307). Um solche Maschinen nach Bedarf an Wand oder Decke eines Raumes befestigen zu können, ohne daß dabei die Schmiervorrichtung in ihrer Brauchbarkeit beeinträchtigt wird, werden die Lagerschilder so konstruiert, daß sie in verschiedenen Stellungen am Polgehäuse befestigt werden können. Größere Maschinen erhalten besondere Grundplatten mit 2 oder 3 Lagern, letzteres zur besseren Lagerung der Antriebsscheibe bei Riemen- oder Seilantrieb bei größeren Leistungen von etwa 200 kW an; vgl. Abb. 298, 305, 323, 326, 327, 329, 330.

Bei Antrieb durch Wasserturbinen und nach amerikanischer Bauart bei Dampfturbinen wird die Welle der Dynamos häufig vertikal gestellt, vgl. Abb. 306.

Von größter Bedeutung ist die Kühlung der Maschinen. Man unterscheidet 1. Selbstlüftung, 2. Eigenlüftung und 3. Fremdlüftung, je nachdem die Kühlluft durch die umlaufenden Teile der Maschine selbst, oder durch einen nur zu diesem Zweck am Läufer angebrachten Lüfter oder durch einen Lüfter mit eigenem Antriebsmotor bewegt wird, endlich 4. Wasserkühlung.

Dem Abschluß nach unterscheidet man 1. offene, 2. geschützte, 3. geschlossene, 4. gekapselte und 5. schlagwettersichere Maschinen. Bei den geschützten Maschinen ist die zufällige oder fahrlässige Berührung der stromführenden, durch ihre Spannung gefährlichen, und der inneren umlaufenden Teile sowie das Eindringen von Fremdkörpern, aber nicht der Zutritt der Kühlluft erschwert. Besondere Abarten sind die tropfwassersicheren und die spritz- oder schwallwassersicheren Maschinen. Die geschlossenen Maschinen werden entweder mit Rohranschlüssen für die Zu- und Abluft versehen, oder sie besitzen Mantelkühlung, bei der die Maschine durch Eigenbelüftung der Außenfläche gekühlt wird, oder Wasserkühlung. Bei den gekapselten Maschinen wird die Wärme durch den äußeren Mantel ohne besondere Vorrichtungen abgegeben; die Kühlung ist dann weit schwächer, so daß die Maschinen nicht so hoch belastet werden dürfen. Eine Abart der schlagwettersicheren Maschinen sind die, bei denen nur die Schleifringe schlagwettersicher eingeschlossen sind.

Die geschlossene, gekapselte und schlagwettersichere Bauart ist besonders häufig bei Motoren erforderlich. Die geschlossene Bauart kommt in Betrieben zur Anwendung, in denen der Kommutator und die Wicklungen gegen Staub, Feuchtigkeit und ätzende Dämpfe, wie bei Straßenbahnen, Kranbetrieb, in chemischen Fabriken, landwirtschaftlichen Betrieben, geschützt werden müssen.

Der früher benutzte Plattenschutz (Glückauf 1906, S. 1 ff., ETZ 1906, S. 200 u. 363; vgl. vor. Aufl. Abb. 155) hat sich nicht als sicher erwiesen, weil die Bleche sich verbiegen oder auch die engen Spalten sich durch Staub zusetzen. Kleinere Motoren werden gewöhnlich vollständig gekapselt ausgeführt; bei größeren werden nur die Teile, an denen Funken auftreten, insbesondere die Schleifringe der Drehstrommotoren gekapselt. An Stelle des Plattenschutzes werden breite Flanschen angeordnet, die durch lange Schrauben zusammengepreßt werden, vgl. Abb. 159. Diese dehnen sich bei einer Explosion im Inneren soweit, daß ein Spalt von etwa 0,3 mm entsteht, durch den die Verbrennungsgase entweichen können. Nach dem Druckausgleich ziehen die Schrauben in Folge ihrer Elastizität die Flansche wieder fest zusammen. Die Kapselung muß im übrigen einem inneren Überdruck von mindestens 8 Atmosphären widerstehen und es ist darauf zu achten, daß im Inneren nicht mehrere Räume vorhanden sind, die nur durch enge Öffnungen miteinander in Verbindung stehen.

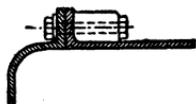


Abb. 159. Nachgiebiger Flanschschluß.

(349) Gehäuse. Große Gehäuse werden in der Regel so ausgeführt, daß der untere Teil in die Fundamentgrube hineinhängt (Abb. 297); für besondere Zugänglichkeit ist Sorge zu tragen. Man setzt solche Maschinen gern mit jedem Fuß auf Druckschrauben, durch deren Einstellung der Luftraum der Maschine nach beendeter Montage genau justiert werden kann, und sorgt durch Sicherungsstifte und Zugschrauben für Befestigung des Gehäuses nach der Einstellung. Um sehr große Gehäuse rund zu erhalten, stellt man das Gehäuse sehr steif her oder sorgt in anderer Weise dafür, daß es sich nicht durchbiegen kann (vgl. Abb. 302 u. 303). Erfahrungsgemäß treten Formveränderungen leichter bei dem unteren als bei dem oberen Gehäuseteil auf. Für den unteren Teil genügt es in vielen Fällen, der Durchbiegung durch Anbringung einer Druckschraube oder zweier Keile unterhalb der Maschine in der Richtung der vertikalen Symmetrieachse zu begegnen (Abb. 297, 302 u. 303).

Die Gehäuse werden bei kleinen Maschinen mit Lagerschildern in der Regel einteilig, bei Maschinen bis zu 6 m Durchmesser zweiteilig, darüber hinaus auch vier- und sechsteilig gebaut. Maßgebend sind Transportrücksichten (Normalprofil der Eisenbahn, bei Bergwerken Schachttransport, in manchen Gegenden Beschränkung des Gewichts der einzelnen zu transportierenden Teile mit Rücksicht auf Träger oder Lasttiere).

(350) Massenausgleich. Dynamomaschinen verlangen einen guten Massenausgleich, und zwar natürlich um so mehr, je schneller sie laufen. Der umlaufende Teil soll vor und nach der Bewicklung mit einer Welle versehen auf Schneiden gelegt oder beweglich gelagert und daraufhin geprüft werden, ob er in seiner Lage verharret, bzw. ob er ruhig läuft oder sich nach „dem Schwerpunkt einstellt“. In letzterem Falle ist durch Hinzufügen oder Fortnehmen von Gewichten für Ausgleich zu sorgen. Bei größerer axialer Ausdehnung muß die Schwerlinie mit der Wellenachse zusammenfallen. Die Ausgleichgewichte sind daher an beiden Seiten des Ankers anzubringen. Schnellaufende Läufer, z. B. für Turbodynamos, läßt man in elastisch aufgehängten Lagern laufen, deren Schwingungen selbsttätig aufgezeichnet werden. Die Ausgleichgewichte sind so anzubringen, daß die Schwingungen verschwinden. Neuerdings hat Krupp AG. eine statische Schwerpunktschale konstruiert.

(351) Schleuderprobe. Die Maschinen sollen einer Schleuderprobe unterworfen werden, bei der die Drehzahl zwei Minuten lang im Allgemeinen das 1,2-fache, die von Generatoren für Dampfturbinenantrieb das 1,25-fache, bei Generatoren für Wasserturbinenantrieb das 1,8-fache der Nenndrehzahl betragen soll.

(352) Schwungrad. Dynamos, die zur direkten Kupplung mit Dampfmaschinen oder Gasmotoren bestimmt sind, werden unter Umständen so ausgebildet, daß sie zugleich als Schwungrad dienen (Abb. 302 bis 304). Als Vorteil kommt hierbei in erster Linie die Raumersparnis in Frage, doch ist dieser Vorteil meist nur zu erkaufen durch Erhöhung des Dynamomaschinenpreises, der bei Gleichstrommaschinen fast immer, bei Drehstrom- und Wechselstrommaschinen sehr oft wesentlich höher wird als bei Anordnung besonderer Schwungräder. Bei der Formgebung des Schwungringes sollte man wieder dafür, daß die Lüftung der Maschine nicht beeinträchtigt wird. Vgl. auch Werner, D. mechan. Beanspruchung rasch laufender Magneträder. Diss. Aachen, 1908; K. Reinhardt, Festigkeitsberechnung der Schwungräder, Heft 226 d. Forschungsarb. d. V. d. I.

Werden besondere Schwungräder angewandt oder mehrere Dynamos mit einer Kolbenmaschine starr gekuppelt, so sollen alle Schwungmassen möglichst unmittelbar nebeneinander auf der Welle angebracht werden, um Torsionsschwingungen zu vermeiden. Vielfach wird das Schwungrad mit dem umlaufenden Teil der Maschine durch starke Bolzen verbunden.

Besonders gefährlich ist die Übereinstimmung (Resonanz) der „Eigenschwingungszahl“ Z der Welle mit der Schwingungszahl der von den Antriebskurbeln hervorgerufenen „erzwungenen Schwingungen“. Sie führt leicht zu starken

Schwingungen und infolge davon zu starken Beanspruchungen der Welle und Flimmern im Licht.

(353) Lager. Die Lager für Dynamomaschinen werden mit sehr reichlichen Abmessungen, Zapfendruck 5 bis 12 kg*/cm², entweder als Gleitlager oder als Kugellager ausgeführt. Der Lagerkörper wird bei normalen Typen aus Gußeisen, und entweder als Lagerschild, vgl. (348), oder als Lagerbock ausgebildet. Für genaue Zentrierung der Lager ist Sorge zu tragen. Zweckmäßig wird so entworfen, daß die Auflageflächen des Lagerkörpers und die Bohrungen des Ankers oder des Polgehäuses auf derselben Werkzeugmaschine hergestellt werden können. Bei gekapselten Maschinen werden die Polgehäuse vielfach gleich für die Aufnahme des Lagers eingerichtet. Mittlere und kleine Maschinen erhalten einteilige Lager. Die Schalen werden aus Bronze oder Gußeisen mit Weißmetall hergestellt. Von besonderer Bedeutung bei Dynamomaschinen ist wegen der Saugwirkung des Läufers, daß die Lager öldicht ausgeführt werden, und zwar sowohl so, daß das Öl nicht verspritzt, als auch so, daß das Schmiermittel nicht aus dem Ölsumpf austreten kann. Man versieht daher die Wellen mit sogenannten Spritzringen oder schließt die Lager nach der Läuferseite hin gut ab.

(354) Schmierung. Gleitlager normaler Maschinen von nicht zu großer Leistung werden durchweg, wenn sie nicht starken Erschütterungen ausgesetzt sind oder schiefe Lagen annehmen können, durch Ringe geschmiert. Kleine Lager bis zu 300 mm Länge erhalten einen, größere zwei, drei oder mehr Ringe. Beim Entwurf des Lagers ist darauf zu achten, daß die Schmierringe bequem angebracht und ihr Arbeiten jederzeit beobachtet werden kann. Maschinen von sehr großer Leistung und Drehzahl können mit Ringschmierung nicht mehr in ausreichender Weise geschmiert werden. Man verwendet dann kleine Ölpumpen, mit denen man das Öl unter Druck unter den Zapfen treten läßt, in ähnlicher Weise wie bei der Ringschmierung sammelt und gebotenen Falles in einer Rückkühlanlage kühlt. Auch Wasserkühlung von Lagern wird ausgeführt.

(355) Kugellager werden namentlich für Motoren und Maschinen kleinerer Leistung verwandt. Sie bieten den Vorteil verringerter Reibungsleistung und bringen die Wartung der Lager auf das erreichbare Mindestmaß. Auch gewähren sie die Möglichkeit, den Lagerkörper in axialer Richtung mit sehr geringen Abmessungen auszuführen. Nachteilig ist, daß sie einen sehr genauen Einbau erfordern (vgl. Abb. 314).

(356) Schenkel und Polschuhe. Die Schenkel oder Polschäfte werden in der Regel einzeln hergestellt und mit dem Joch verschraubt. Bei Außenpolmaschinen bildet das Joch zugleich das Gehäuse, bei Innenpolmaschinen die Felge des Magnetrades.

Die Schenkel werden aus Blechen oder aus Stahlguß oder durch Schmieden im Gesenke oder durch Abschneiden von runden Walzeisenstücken, bei starker Beanspruchung durch Zentrifugalkraft auch aus Stahlplatten hergestellt. Man denke sich im letzten Falle das Feldmagnetsystem durch Schnitte senkrecht zur Rotationsachse in Platten zerlegt; diese Platten werden aus dem Vollen geschnitten. Gußeisen bedingt zu große Querschnitte, daher zu großen Umfang und deshalb übermäßigen Aufwand an Erregerkupfer. Der Polschuh wird aus Stahlguß, bei offenen Nuten aber meist aus Blechen hergestellt, weil sonst durch die Bewegung des ungleichförmigen Induktionsflusses, der unter den Zähnen größer ist als unter den Nuten, Wirbelströme entstehen.

Abb. 160a bis f zeigen einige Polbefestigungen; die Flächen zwischen dem Fuß des Schenkels und dem Joch werden durch Drehen bearbeitet und haben daher zylindrische Auflageflächen. Ebene Auflageflächen würden Abhobeln oder Fräsen und namentlich bei größerer Polzahl großen Aufwand an Arbeitslohn bedingen. Bei Innenpolmaschinen ist die Befestigung mit Rücksicht auf die oft sehr bedeutenden Fliehkräfte zu berechnen und entsprechend zu sichern.

Werden ruhende Blechaußenpole durch Verschrauben mit dem Gehäuse verbunden, so kann das Gewinde direkt in den mit starken Endblechen versehenen Blechkörper geschnitten werden, wenn dieser hydraulisch zusammengepreßt und mit Bolzen zusammengenietet ist, Abb. 160d. Auf genaue Stellung der Polköpfe ist streng zu achten. Stahlgußpole sind an den Kanten der Polschuhe nötigenfalls zu bearbeiten, angeschraubte Pole sind durch Sicherungstifte, Stellringe oder Bearbeitung der Bolzen genau mit dem Gehäuse zu verbinden. Stellringe, Abb. 160b und d, bieten zugleich den Vorteil der sicheren Entlastung der Schraubenbolzen gegen tangentielle Kräfte. Werden sie angewandt, so ist aber darauf zu achten, daß sie den Anzug der Schrauben nicht stören.

Werden magnetisch gut leitende Polschäfte an ein gußeisernes Joch geschraubt, so tritt an der Verbindungsstelle ein beträchtlicher magnetischer Widerstand auf. Dieser ist möglichst dadurch zu vermindern, daß die Fläche des Gußeisens, gegen die der Polschaft geschraubt wird, bedeutend größer als der Querschnitt des letzteren gemacht wird, Abb. 160d.

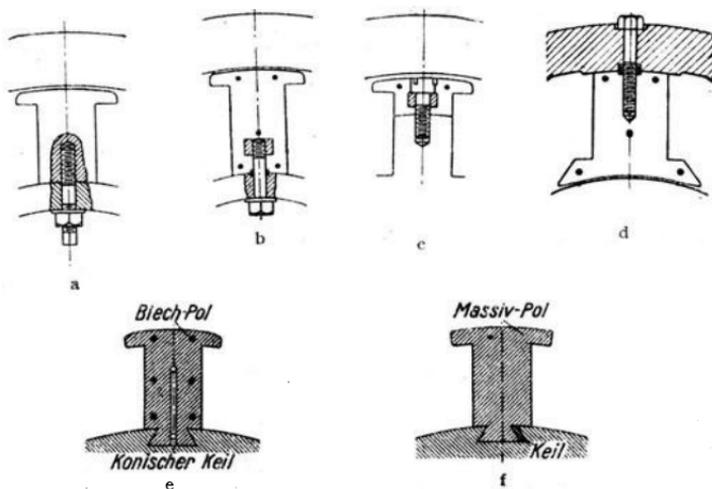


Abb. 160. Polbefestigungen.

Bei den Turbodynamos¹⁾ besteht der Feldmagnet häufig aus einem genuteten, aus vollem Stahl hergestellten Zylinder, der mit der Welle aus einem Stück geschmiedet ist, entsprechend Abb. 161, oder aus genuteten auf die Welle aufgeschraubten Stahlplatten. Die AEG stellt die Zähne aus Stahllamellen her, die schwalbenschwanzförmig in die verstärkte Welle eingesetzt sind (Z. d. V. D. I. 1909, S. 699 ff.), Abb. 162. Die Nuten werden sorgfältig durch leitende Kelle geschlossen, die, an beiden Stirnseiten leitend miteinander verbunden, eine Dämpferkurzschlußwicklung darstellen (465). Die zu beiden Seiten aus den Nuten herausragenden Wicklungsköpfe werden durch übergeschobene Bronzekappen gegen die Fliehkräfte gesichert.

Auch werden Polsterne mit Polschäften von kreisrundem Querschnitt, die auf die Welle aufgeschraubt sind, mit aufgeschraubten Polschuhen verwendet.

1) Pohl, ETZ 1908, S. 413. — Kolben, ETZ 1909, S. 121. — Rosenberg, ETZ 1909, S. 582 — Ziehl, ETZ 1909, S. 647. — Lasche, Zeitschr. d. V. D. I. 1909, S. 699. — Brown, Boveri & Cie. ETZ 1918, S. 416.

Die Pole erhalten dazu ein sauber geschnittenes Gewinde, das in das Muttergewinde der Polschäfte geschraubt wird, Abb. 163. Solcher Polsterne werden auch zwei nebeneinander gesetzt (vgl. Turbodynamo für 5000 kW von Brown, Boveri & Cie. ETZ 1918, S. 416).

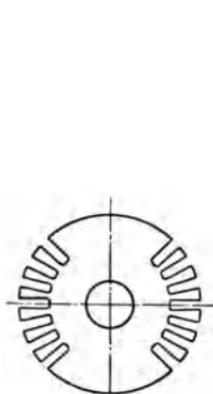


Abb. 161. Feldmagnet für Turbodynamos mit eingeschrittenen Nuten.

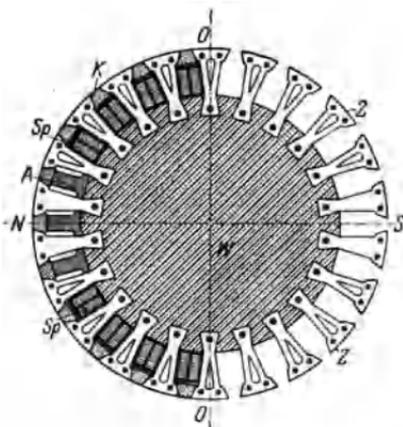


Abb. 162. Feldmagnet für Turbodynamos mit eingesetzten Blechzähnen.

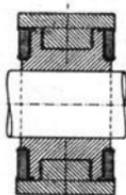


Abb. 163. Feldmagnet mit aufgeschraubten Polen.

(357) Erregung der Feldmagnete. Die Pole erhalten eine Erregerwicklung nach Art der in (303) behandelten. Am besten ist es, alle Polschäfte mit gleichen Erregerwindungen zu versehen. Da hierbei Nord- und Südpole miteinander abwechseln, so nennt man diese Bauart den Wechseelpoltyp, Abb. 156 bis 158.

(358) Die Wicklung der Schenkel wird ebenso ausgeführt wie bei den gewöhnlichen Elektromagneten (vgl. 303); aber mit Rücksicht auf die Stellung der Pole sind in vielen Fällen besondere Vorrichtungen zum Festhalten der Spulen, wie angenietete Winkel, mit Nasen versehene Stücke aus schmiedbarem Guß und dergleichen erforderlich. Sofern die Pole umlaufen, ist mit Rücksicht auf die Fliehkräfte eine festere Verbindung notwendig. Hierzu werden entweder die Polschuhe benutzt oder, wenn bei sehr großen Geschwindigkeiten die Kräfte sehr bedeutend werden, Spezialanordnungen angewendet. Bei umlaufenden Polen ist darauf Rücksicht zu nehmen, daß ein Umbiegen der Drähte unter der Wirkung der Fliehkräfte verhindert wird, doch vermeide man tunlichst Konstruktionsteile, die die Lüftung behindern. Es empfiehlt sich nicht, die Feldspule von Hand in die fertige Maschine anstatt auf den einzelnen Pol zu wickeln; eine solche Wicklung fällt meist unsauber aus und ist sehr kostspielig, sie sollte daher nur in Ausnahmefällen zugelassen werden.

(359) Rücksicht auf Kühlung. Es ist wichtig, dafür zu sorgen, daß die Oberfläche der Erregerwindungen von dem durch die Maschine in Bewegung gesetzten Luftstrom bestrichen werde, damit eine möglichst wirksame Kühlung erzielt wird. Aus diesem Grunde ist namentlich ein zu enges Zusammendrängen der Feldmagnetwindungen zu vermeiden. Die Polbewicklungen werden auch wohl aus mehreren konzentrischen, durch Verschnürung zusammengehaltenen Spulen mit passenden Holzwischenlagen zusammengesetzt. Die vom Anker weggeschleuderte Luft kann dann bequem durch die parallel zur Spulennachse liegenden Kanäle streichen und die Wicklung wirksam kühlen, so daß sich bei geringer Erwärmung eine Ersparnis an Erregerkupfer ergibt.

Anker.

(360) Die **Anker der Dynamomaschine** werden aus runden Scheiben oder Ringen von Eisenblech von 0,3 bis 0,5 mm Dicke (nach den Verbandsnormalien) aufgebaut. Dies ist nötig, um das Auftreten von Wirbelströmen nach Möglichkeit zu verhüten. Die Ebene der Bleche muß dabei mit der Richtung des magnetischen Induktionsflusses zusammenfallen. Kleinere Scheiben und Ringe werden aus einem Stück, größere Ringe aus Teilen mit Überblattung nach Art der Gallischen Kette zusammengesetzt. Die Grenze für die eine oder andere Ausführungsform ergibt sich aus den normalen Größen für Dynamobleche. Diese sind $2000 \times 1000 \times 0,5$ und $1600 \times 800 \times 0,3$ mm. Beim Entwurfe achtet man auf gute Ausnutzung der Tafeln.

Die Ankerbleche werden durch Druckringe gefaßt und durch Verschrauben mit Bolzen, die gegen Ankerkörper und Bleche zu isolieren sind, oder bei größeren Maschinen durch vorgelegte Schrumpf- oder Sprengringe, Verkeilungen oder Eingüsse festgehalten. Bei der Herstellung bedient man sich zweckmäßig starker Schraubpressen oder hydraulischer Pressen. Eine ältere Anordnung, die Druckringe bei umlaufendem Anker mit Hilfe eines auf die Welle geschnittenen Gewindes zu verschrauben, ist zu vermeiden.

Die Endbleche werden in der Regel, um ein Aufblättern der Blechpakete zu vermeiden, stärker (2—3 mm) hergestellt, oder der Blechkörper wird an den Zähnen treppenartig abgesetzt.

(361) **Ankerwicklungen.** Man unterscheidet Ring-, Trommel- und Scheibenwicklung. Letztere ist überhaupt nur selten ausgeführt worden, ihr Wicklungsprinzip ist in der Regel das der Trommelwicklung. Bei der Ringwicklung wird der isolierte Kupferleiter um einen Eisenring herumgewickelt. Auch diese Wicklung ist veraltet. Die üblichste Wicklung ist die Trommelwicklung. Bei ihr liegen die Drähte nur auf der Außen- oder nur auf der Innenfläche eines Eisenzylinders und auf oder an dessen Stirnflächen. Daher kann jede einzelne Windung oder Spule, sofern der Anker mit offenen Nuten versehen ist, vom Ankerkern abgehoben werden. Diese Art Wicklung läßt das für die Fabrikation der Maschinen wichtige Verfahren zu, die Spulen in Schablonen zu wickeln und dann auf den Anker zu bringen.

Die einzelnen Wicklungsteile werden auf besonderen „Formen“ oder „Schablonen“ aus Holz, Messing oder Eisen vor dem Einlegen in den Anker fertig gebogen und in die Nuten eingelegt. Stabwicklung wird erst nach dem Biegen isoliert, Drahtspulen werden häufig ebenfalls noch einmal mit Isolierband umwickelt. Die Wickelformen werden entweder so eingerichtet, daß jeder Draht oder jeder Stab (abgerundete Kanten!) gegebenenfalls unter Benutzung des Holzhammers in der Form in die gewünschte definitive Gestalt gebogen wird, oder so, daß schmale Spulen von sehr langgestreckter Form auf geteilte Dorne gewickelt und dann, nachdem die verlangte Drahtzahl aufgelaufen ist, auseinander gezogen werden.

Bei Ankern mit halb geschlossenen Nuten können die einzelnen Drähte der vorher gewickelten Spule eingelegt („eingeträufelt“) werden. Bei Ankern mit nahezu oder ganz geschlossenen Nuten kann die Wicklung nur durch „Einziehen“ oder „Nähen“ eingebracht werden. Man füllt dazu anfänglich die Nut mit Stäben vom Durchmesser des isolierten Drahtes und schiebt beim Wickeln Stab für Stab mit den einzuziehenden Windungen heraus. Man kann auch die einzelnen Windungen geöffnet in U-Form von einer Stirnseite aus in die Nuten stecken und sie auf der andern durch Löten miteinander zu Spulen verbinden.

Liegt die Trommelwicklung auf der äußeren Zylinderfläche, so ist der Ankerkörper bei kleinen Durchmessern ein Vollzylinder, bei größeren Durchmessern ein Hohlzylinder (Eisenring). Liegt die Trommelwicklung an der Innenseite des Zylinders (Hohltrommelwicklung), so ist der Eisenkörper immer ein Ring, der sich in einem äußeren gußeisernen oder Stahlgußgehäuse befindet.

Bei großen Maschinen ist es wichtig, die Wickelköpfe, d. h. die aus dem Eisen herausragenden Teile der Spulen, auch auf dem feststehenden Teil in ihrer Lage festzuhalten, weil sie bei Kurzschlüssen sehr starken elektrodynamischen Kräften ausgesetzt sind, vgl. Abb. 299 bis 301.

(362) Material der Wicklung. Die Wicklung wird aus Leitungskupfer nach den Normalien des Verbandes Deutscher Elektrotechniker und wurde im Kriege auch aus Aluminium in Form von Draht, Band, Seil oder Stäben hergestellt. Bei Zink- und Eisenwicklung wird die Ausnutzung des Wicklungsraumes so schlecht, daß die Maschinen erheblich schwerer und teurer werden. Solche Maschinen werden daher nicht mehr hergestellt. (Vgl. R. Richter, Elektr. Masch. mit Wicklungen aus Aluminium, Zink u. Eisen. Braunschweig 1916, Vieweg u. Sohn.)

Isolation der Ankerwicklung. Es ist zu unterscheiden zwischen Isolation am Ankerkörper und Isolation der eigentlichen Wicklung. Zur Bekleidung des Ankerkörpers und Auskleidung der Nuten kommt in Frage für Spannungen bis zu etwa 500 V getränkte Leinwand, Mikanitleinwand, Preßspan und andere präparierte Papiersorten, für Hochspannung fast nur Glimmer und Mikanit. Die Zwischenräume zwischen den Leitern werden dabei auch wohl mit Isolierstoff ausgefüllt, damit alle Lufträume beseitigt werden und sich kein Ozon bilden kann. Die so hergestellten Spulen werden dann erwärmt und gepreßt („gebacken“; vgl. Perlewitz, ETZ 1911, S. 1028). Die Stäbe von Stabwicklungen werden durch Bewicklung mit Leinwand, Papier und dergleichen oder durch Einhüllen mit Preßspan oder Mikanit isoliert und mit einem Isolierlack getränkt. Drähte werden durch zwei- oder dreifaches Besspinnen mit Baumwolle oder Beklöppeln isoliert, Seile und Litzen werden bekloppt. Für Teile, die besonders leicht der Beschädigung ausgesetzt sind, verwendet man Schutzhülsen aus geklopptem Garn, sogenannte „Hosen“.

Die durch Isolation der Leiter verursachte Vergrößerung des Durchmessers kann im allgemeinen nach folgenden Angaben angenommen werden:

Dicke der Bandwicklung	mit halber Überlappung	einseitig		i. ganzen	
		0,35 mm	0,70 mm	1—0,50	„
„	„ Papierbewicklung	„	„	„	„
„	„ Umspinnung von Runddraht von 0,1—1 mm	„	„	„	„
„	„	„	„	„	„
„	„	„	„	„	„
„	„ Umklöppelung	0,35	„	0,70	„

Um an Raum für Isolation zu sparen, sucht man bei Nutenankern mit nicht zu hoher Nutenzahl auszukommen (grobe Nuten); häufig müssen dann in einer Nut viele Stäbe oder Spulenseiten (bis zu 8) untergebracht werden. Die Bestandteile solcher Bündel werden einzeln isoliert und vor dem Einlegen vereint noch einmal mit Isolation umgeben. Besondere Auskleidung der Nuten ist dann für niedrige Spannung entbehrlich. Einzelheiten geben Abb. 164a bis e.

(363) Hohe Spannungen im Anker. Beim Entwurf irgendeiner Ankerwicklung ist mit großer Sorgfalt darauf zu achten, daß hohe Spannungen zwischen nebeneinander liegenden Leitern, z. B. bei der Anordnung nach Abb. 164e, vermieden werden. Es genügt dabei nicht, nur mit den im normalen Betriebe auftretenden Spannungen zu rechnen, weil Umstände besonderer Art (Überspannungswellen) hohe Spannungen zwischen benachbarten Windungen der Wicklung hervorrufen können.

(364) Prüfung der Isolation. Die fertigen Spulen und der fertig gewickelte Anker sind auf Isolation zu prüfen. Da alle Isolierstoffe bei steigender Temperatur an Isolierfestigkeit verlieren, empfiehlt es sich, das Material bei derjenigen Höchsttemperatur zu prüfen, die im äußersten Fall in der Maschine vorkommen kann, wobei zu bedenken ist, daß die gewöhnlich gemessenen Erwärmungen Mittelwerte

darstellen, die wesentlich unter der höchsten Temperatur im Innern der Maschinenteile liegen.

Ankerspulen werden vor dem Einlegen auf Isolation der Windungen gegeneinander geprüft, indem man sie mit offenen Enden über einen Transformator kern schiebt, der mit Hilfe einer Primärwicklung mit Wechselstrom erregt wird. Hat eine Spule in sich Schluß, so fließen bei der Prüfung in ihr starke Ströme; man erkennt sie daher leicht an der Erwärmung. Nach dem Einlegen der Spulen

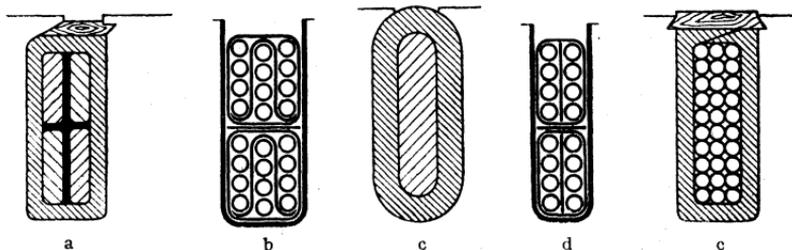


Abb. 164 a bis e. Nutenformen.

empfiehlt sich eine erneute Prüfung in der Weise, daß ein mit Wechselstrom erregter Magnet durch einen Teil des Ankers geschlossen wird, so daß in den einzelnen Ankerspulen durch den Wechselselektromagnetismus nicht zu kleine EMKE induziert werden. Auf einfache Weise erreicht man das, indem man einen hufeisenförmigen offenen Wechselstrommagnet an den Anker legt.

Die fertige Maschine soll einer dreifachen Isolationsprüfung unterworfen werden, einer Wicklungs-, einer Sprungwellen- und einer Windungsprobe. Bei der Wicklungsprobe wird die Isolation von Wicklung gegen Wicklung (bei Maschinen mit mehreren Ankerwicklungen) und von Wicklung gegen Eisenkörper mit einer fremden Wechselstromquelle mit erhöhter Spannung geprüft. Die Sprungwellenprobe dient zur Feststellung der ausreichenden Isolation von Wicklung zu Wicklung gegenüber den im Betriebe auftretenden Sprungwellen. Sie besteht darin, daß die mit normaler Frequenz erregte Maschine über eine Funkenstrecke, die auf den 1,3-fachen Betrag der Spannung eingestellt ist, auf einen Kondensator oder ein Kabel von bestimmter Prüfkapazität geschaltet wird. Die Windungsisolation wird bei Leerlauf durch Erhöhung der erzeugten oder angelegten Spannung geprüft. Näheres siehe Maschinenregeln d. VDE.

(365) Nuten. Die Anker werden mit Nuten zur Aufnahme der Wicklung ausgeführt. Die Nuten sind entweder ganz offen oder halb oder ganz geschlossen (vgl. Abb. 164 a bis e): Bei halb oder ganz geschlossenen Nuten wird der stehengebliebene Steg am Umfange so schwach gemacht, als es die Herstellung und mechanische Rücksichten gestatten.

Die Nuten werden durch Stanzen hergestellt. Schnitte zum gleichzeitigen Ausstanzen ganzer Bleche oder großer Segmente mit vielen Nuten sind kostspielig; es ist daher das Ausstanzen einzelner Nuten („Hacken“), bei denen das Ankerblech nach einer Teilverrichtung mit selbsttätigem Vorschub vor dem Nutenschnitt vorbei bewegt wird, oft vorteilhafter. Hierbei läßt sich die Nutung ohne erhebliche Kosten für jede Maschine in den jeweilig am besten erscheinenden Abmessungen herstellen. Die Bleche sind unter Benutzung von Führungsbolzen möglichst genau übereinander zu schichten, um das Nacharbeiten der Nutenwände, wobei ein Verschmieren der Bleche miteinander nicht völlig zu vermeiden ist, auf das geringste Maß zu beschränken.

Mit Rücksicht auf die Stanzarbeit müssen die stehengebliebenen Zähne mindestens noch 2 mm Breite haben. Sollen genutete Anker nach dem Zusammenbau

abgedreht werden, so muß bei offenen Nuten für sehr reichliche Zahnbreite gesorgt werden. Halb offene Nuten werden in dem Falle zweckmäßig geschlossen gestanzt und erst nach dem Abdrehen mit der Säge aufgeschnitten. Während des Abdrehens werden die Nuten mit Holz oder sonstwie ausgefüllt.

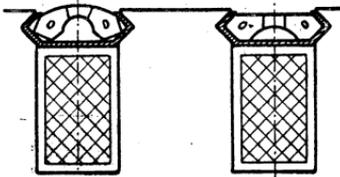


Abb. 165. Nutenverschluß durch Spreizkeile.

Nuten eingeschoben werden. Dann werden sie durch einige Schläge von oben gespreizt, Abb. 165 rechts.

(366) Befestigung des Ankers auf der Welle. Umlaufende Anker aus vollen Blechen werden in der Regel so mit der Welle verbunden, daß in der Mitte der Bleche ein zur Welle passendes Loch mit Federn eingestanzt wird, so daß das „aktive“ Eisen unmittelbar auf der Welle zusammengebaut werden kann. Dabei ist zu beachten, daß für Luftzutritt zu den Ventilationsschlitzern besondere Öffnungen vorgesehen werden müssen (vgl. Abb. 309, 310, 311). Bei größerem Durchmesser bildet das Ankereisen einen Ring. Es ist dann eine besondere Nabe mit Armen vorzusehen. Die Eisenbleche werden entweder unmittelbar gegen die in der Richtung der Achse des Ankers langgestreckten Arme gelegt (Abb. 307, 312, 320, 329, 330), oder es ist ein besonderer Schwungradkranz vorhanden, gegen den die Bleche gelegt werden (Abb. 297, 326).

(367) Lüftung des Ankers. Da sich das Ankereisen beim Betriebe erwärmt, ist es vorteilhaft, es in geeigneten Abständen (50—100 mm) mit Lüftungsschlitzen von etwa 10 mm Breite zu versehen. Zur Aufrechterhaltung des Ab-

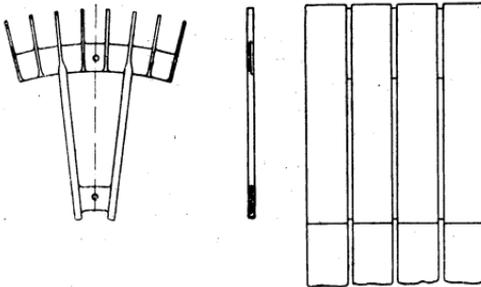


Abb. 166. Luftschlitze und Zwischenbleche dafür.

standes dienen Finger nach Abb. 166 oder Bleche mit an 3 Seiten abgestanzten und dann rechtwinklig aufgebo- genen Lappen, wobei diesen Zwischenstücken zugleich die Rolle des Flügels eines Kreisventilators zufällt. Schnell laufende Maschinen von großer Leistung, ins- besondere Turbodynamos, be- dürfen einer starken Lüf- tung, für die in der Regel an den Stirnseiten besondere Ventilatorflügel angebracht werden. Die Luft wird dann häufig in axialer Richtung durch unmittelbar unter den Nuten und verteilt im Joch vorgesehene Löcher durch den Ankerkörper getrieben (vgl. Abb. 300).

Bei gekapselten Maschinen ist die Abkühlung stark vermindert, sie leisten daher bei gleicher Erwärmung nur 40—50% von der Leistung offener Maschinen. Einen mit Wasserkühlung und Lüftung arbeitenden Motor zeigt Abb. 311, bei dem die Luft durch Wasser gekühlt wird. Die Leistung wird dadurch nahezu ebenso hoch wie bei normalen Motoren. Bei Straßenbahnmotoren läßt man eine höhere Temperatur zu; man rechnet daher aber auch mit einer größeren Abnutzung. Vgl. auch (305).

Die Siemens-Schuckert- werke stellen halb offenen Nutenschluß für Induktionsmotoren durch Spreizkeile her. Zwei Blechpakete, Abb. 165 links, werden durch einige zwischengelegte Stege aus unmagnetischem Material miteinander durch Nieten verbunden. Sie können bei ihrer gewölbten Form bequem in die

Abb. 166 oder Bleche mit an 3 Seiten abgestanzten und dann rechtwinklig aufgebo- genen Lappen, wobei diesen Zwischenstücken zugleich die Rolle des Flügels eines Kreisventilators zufällt. Schnell laufende Maschinen von großer Leistung, ins- besondere Turbodynamos, be- dürfen einer starken Lüf- tung, für die in der Regel an den Stirnseiten besondere Ventilatorflügel angebracht werden. Die Luft wird dann

(368) Anordnung der Wicklungen¹⁾. Man unterscheidet

1. Käfigwicklungen,
2. Phasenwicklungen,
3. Fortlaufende in sich geschlossene Wicklungen,
4. Aufgeschchnittene Wicklungen, auch schleidene Wicklungen genannt.

Die Käfigwicklung von Dobrowolsky besteht aus Stäben, die parallel zur Achse in Nuten oder Löchern an der Oberfläche des Ankers oder der Feldmagnete angebracht und sämtlich auf beiden Seiten durch starke Ringe leitend miteinander verbunden sind. Sie wird besonders für die Läufer kleiner Induktionsmotoren (508), als Anlaufwicklung bei Synchronmotoren (500,3) und als Dämpfungswicklung bei Synchronmaschinen (465) angewendet.

Die Phasenwicklung wird besonders bei Wechselstrommaschinen angewendet. Sie besteht aus Spulen oder Spulengruppen, die sich für jedes Polpaar in derselben Weise wiederholen. Ihre Schaltung ist sehr mannigfaltig. Reihenschaltung ist in weitestem Maße möglich, gibt aber eine um so weniger gute Ausnutzung, je größer die Phasenverschiebungen der in den einzelnen in Reihe geschalteten Spulen induzierten EMKe gegeneinander sind; parallel können nur solche Spulen geschaltet werden, in denen die induzierten EMKe gleiche Phasen haben. Abb. 167 a zeigt eine Einphasenwicklung mit einer geringeren Spulenweite als die Polteilung τ beträgt — kurzen Spulen, Abb. 167 b eine Zweiphasen-, Abb. 167 c eine Dreiphasenwicklung mit einer mittleren Spulenweite gleich der Polteilung τ — langen, übergreifenden Spulen. Näheres hierüber siehe (457 f).

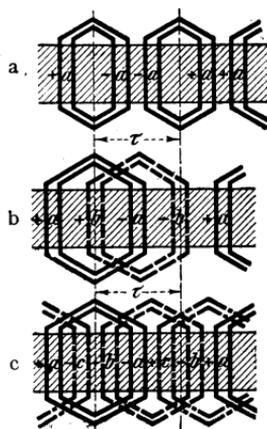


Abb. 167 a bis c. Einphasen-, Zweiphasen-, Dreiphasenwicklung.

Fortlaufende in sich geschlossene Wicklungen werden namentlich bei Kommutatormaschinen für Gleichstrom und Wechselstrom benutzt. Sie bestehen aus aneinander gereihten Wicklungselementen, deren Anfang und deren Ende an je zwei verschiedene Kommutatorteile angeschlossen werden. Bei der Ringwicklung besteht ein Element aus einer oder mehreren um den Ringquerschnitt gelegten Windungen. Bei der Trommelwicklung wird der Kupferleiter auf der Zylinderfläche parallel zur Achse unter einem Pole hin-, unter dem benachbarten Pole zurückgeführt. Hin- und Rückführung bilden eine Windung, mehrere solche in denselben Nuten liegende Windungen eine Spule. Eine solche Spule oder auch, wenn keine Spulen vorhanden sind, die einzelne Windung bildet ein Wicklungselement. Das Einfachste ist, den Abstand der Hin- und der Rückführung — der beiden Spulenseiten — gleich oder nahezu gleich der Polteilung τ zu wählen. Man erhält dann lange Spulen oder Durchmesserswicklung, Abb. 168, so genannt, weil die Spulenseiten bei einer zweipoligen Anordnung auf einem Durchmesser liegen. Man kann den Abstand

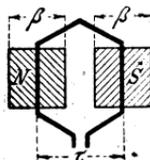


Abb. 168. Lange Wicklungsschleife.

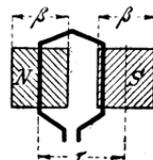


Abb. 169. Kurze Wicklungsschleife.

1) Lehrbücher: Arnold u. la Cour, D. Gleichstrommasch. — Pichelmayr, Dynamobau, R. Richter, Ankerwicklungen für Gleich- u. Wechselstrommaschinen u. andere. — Reithofer, Eichberg, Kalix, Z. f. E. Wien, 1898, S. 17.

auch kürzer (oder größer) wählen, jedoch mindestens gleich dem Polschubbogen β , damit nicht beide Seiten unter demselben Pole liegen können — *Sehnenwicklung*, Abb. 169. In der Regel liegen Hinführung eines Wicklungselementes und Rückführung eines anderen Wicklungselementes übereinander, z. B. alle Hinführungen unten, alle Rückführungen oben — *zweischichtige Wicklung* — Abb. 174 bis 176. Für Wechselstrommaschinen ohne Kommutator verwendet man auch aufgeschnittene Wicklungen. Dies sind geschlossene Wicklungen, die in eine Anzahl gleicher Teile zerlegt werden, worauf die Teile wieder so zusammengefügt werden, daß eine höhere Spannung oder auch eine bessere Ausnutzung der Wicklung erzielt wird (462).

(369) Darstellung der Wicklungen. Zeichnerisch wird die Wicklung im Wicklungsschema entweder durch eine Projektion auf eine zur Ankerachse senkrechte Ebene dargestellt, indem man den Anker etwa von der Kommutatorseite aus betrachtet, Abb. 173, oder durch eine Abwicklung der Zylinderfläche, wobei die Polflächen schraffiert eingezeichnet werden können, Abb. 174. Bedient man sich dabei der in Abb. 168 angegebenen Schraffur, so daß die Neigung der Linien auf den Nordpolflächen dem schrägen Strich des N entspricht, so findet man beim Vorbeibewegen des Wicklungsschemas vor den Polen die Richtung der induzierten EMK in Übereinstimmung mit dem scheinbaren Wandern der Schraffurlinien über die Leiter. Die übereinander liegenden Spulenseiten werden in der Regel im Schema dicht nebeneinander gezeichnet und zweckmäßig durch die Strichstärke unterschieden. Bei großen Ankern verursacht die Zeichnung des ganzen Schemas unverhältnismäßig viel Mühe, man bedient sich daher meistens einer Wicklungstabelle, die angibt, in welche Nuten Hin- und Rückführung der aufeinander folgenden Wicklungselemente gelegt werden sollen.

(370) Kommutatorwicklungen können als Ring- oder Spiralwicklung (Paciotti 1860; Gramme 1872) oder als Trommelwicklung (von Hefner-Alteneck 1873) ausgeführt werden. Die Ringwicklung wird indessen wegen der Schwierigkeiten in der Befestigung des Ankers auf der Welle und der Unmöglichkeit, Schablonenwicklung anzuwenden, kaum noch ausgeführt. An jedem Kommutatorort endigt ein Element und beginnt ein neues. Es sind also ebensoviel Kommutatororte wie Wicklungselemente vorhanden. Mitunter wird zwischen die Verbindungsstellen der Elemente und die Kommutatororte noch je ein Draht oder Blech von höherem spezifischen Widerstande eingeschaltet — *Widerstandsverbindungen*.

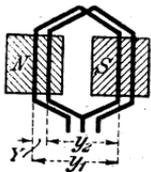


Abb. 170.
Schleifenwicklung

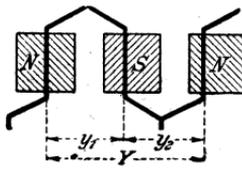


Abb. 171.
Wellenwicklung.

Der Abstand zwischen den Anfängen zweier aufeinander folgender Elemente ist der Schritt Y der Wicklung. Er setzt sich bei der Trommelwicklung aus den beiden Teilschritten y_1 und y_2 zusammen. y_1 ist der Abstand zwischen Hin- und Rückführung desselben Elementes (zwischen den Mitten der Seiten einer Spule), y_2 der Abstand zwischen

der Rückführung eines Elementes und der Hinführung des nächsten. Ist der zweite Teilschritt y_2 rückwärts gerichtet, also $Y = y_1 - y_2$, Abb. 170, so erhält man die *Schleifenwicklung*, ist er vorwärts gerichtet, also $Y = y_1 + y_2$, Abb. 171, so erhält man die *Wellenwicklung*.

Der Unterschied in der Lage zweier Wicklungselemente zu den Polen nennt man ihre *Feldverschiebung* oder *Verschiebung im Felde*. Bei der Ring- und der Schleifenwicklung ist der Gesamtschritt Y gleich der Verschiebung zweier aufeinander folgender Wicklungselemente im Felde. Bei der Wellenwicklung ist der Gesamtschritt Y etwas kleiner oder größer als die doppelte

Polteilung τ , also $Y \approx 2\tau$. Die Abweichung ($2\tau - Y$) ist gleich der Feldverschiebung zweier aufeinander folgender Wicklungselemente.

Man mißt die Schritte, die Feldverschiebung und die Polteilung entweder durch die Zahl der Stäbe (Spulenseiten), die auf die zu messende Größe entfallen, Abb. 172a, oder besser durch die Zahl der Nuten, Abb. 172b, indem man annimmt, daß auf jede Nute zwei Stäbe oder Spulenseiten wie in Abb. 170 entfallen. Enthält eine Nute 4, 6 . . . Spulenseiten, so löst man sie in 2, 3 . . . Nuten auf und zählt dementsprechend, Abb. 172c. Bei der letzten Art der Zählung stimmt die Zahl der Nuten mit der Zahl der Kommutatorteile überein. Die Gesamtzahl der Spulenseiten auf dem Anker ist doppelt so groß wie die Zahl der Kommutatorteile m . Bei der Zählung nach Stäben hat der Gesamtschritt einen doppelt so großen Zahlenwert wie bei der Zählung nach Nuten, er muß eine gerade Zahl, die beiden Teilschritte müssen ungerade Zahlen sein. Im folgenden wird die einfachere Zählung nach Nuten angewendet.

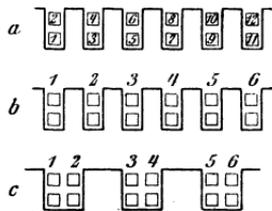


Abb. 172. Zählung der Spulen.
a) Spulenseiten, b) eine Spule/Nute,
c) zwei Spulen/Nute.

(371) Durchmesser- und Sehnenwicklung. Bei der Durchmesserwicklung überbrückt der Teilschritt y_1 genau oder ungefähr einen der Polteilung τ gleichen Bogen und es ist ($p = \text{Zahl der Polpaare}$)

$$y_1 \approx \text{oder} = \frac{m}{2p} = \tau$$

Bei der Wellenwicklung ist dann auch

$$y_2 \approx \tau, \text{ also } y_1 \approx \frac{Y}{2}, y_2 \approx \frac{Y}{2}$$

Bei der Sehnenwicklung gilt für die Schleifenwicklung

$$\beta \leq y_1 < \frac{m}{2p} = \tau$$

für die Wellenwicklung

$$y_1 \geq \frac{Y}{2}, y_2 \leq \frac{Y}{2}$$

der eine Teilschritt ist verkürzt, der andere vergrößert, jedoch nur so weit, daß der kürzere Teilschritt größer als der Polschuhbogen β ist.

Die Sehnenwicklung bietet den Vorteil einer geringeren Ankerrückwirkung und bei Schleifenwicklung einer Ersparnis an Kupfer und gesamter Ankerlänge, ist aber bei Maschinen mit Wendepolen (393) nicht zu brauchen.

(372) Gangzahl. Mehrfach geschlossene Wicklungen entstehen, wenn man mehrere in sich geschlossene Wicklungen derart auf dem Anker anordnet, daß die aufeinander folgenden Nuten in regelmäßiger Folge den einzelnen Wicklungen angehören. Dazu muß die Gesamtzahl der Nuten durch die Zahl der Wicklungen teilbar sein. Eine zweifach geschlossene Wicklung entsteht z. B., wenn die Nutenzahl gerade ist und die Anfänge der Elemente der einen Wicklung an die geraden, die der anderen an die ungeraden Kommutatorteile angeschlossen werden. Denkt man sich einen Ringanker mit einer zweifachen Spiralwicklung an einer Stelle durchschnitten und gerade gestreckt, so bildet die Wicklung eine doppelgängige Schraubenlinie. Man nennt daher eine solche Wicklung eine doppelgängige Wicklung oder sagt, ihre Gangzahl sei 2. Es ist nicht nötig, daß die Wicklung in zwei in sich geschlossene Hälften zerfällt. Verkürzt man nämlich die eine Hälfte um eine Windung und biegt man die Schraubenlinie wieder zu

einem Ringe zusammen, so kann man das Ende der ersten Schraubenlinie mit dem Anfang der zweiten und das Ende der zweiten mit dem Anfang der ersten zusammenschließen. Man erhält dadurch eine einfach in sich geschlossene zweigängige Wicklung. Eine solche Wicklung hat eine ungerade Windungszahl. Als Beispiel diene eine Wicklung mit 9 Windungen, die man in der Reihenfolge 1, 3, 5, 7, 9, 2, 4, 6, 8, 1 zusammenschließt. Eine mehrgängige, einfach geschlossene Wicklung erhält man, wenn die Gesamtzahl der Elemente m nicht durch die Gangzahl a teilbar ist.

Diese Betrachtungen kann man auch auf die Schleifen- und die Wellenwicklung übertragen.

Benachbarte Elemente einer mehrfach geschlossenen Wicklung sind nur um je einen Kommutatorteil gegeneinander verschoben. Sie werden also parallel geschaltet, wenn man nur genügend dicke Bürsten anwendet, die mindestens so viel Kommutatorteile bedecken, wie Gänge vorhanden sind. Dies gilt auch für die einfach geschlossenen mehrgängigen Wicklungen. Insoweit sich die Endwindungen der zwischen zwei ungleichnamigen Bürsten liegenden Wicklungsteile zwischen den Polen befinden und daher frei von elektromotorischen Kräften sind, liegt hierin keine Schwierigkeit. Bei den einfach geschlossenen Wicklungen sind freilich die Widerstände der parallel geschalteten Abteilungen nicht immer gleich groß, doch ist der Unterschied, wenn viele Windungen vorhanden sind, nicht von Bedeutung. Die mehrgängigen Wicklungen werden daher besonders bei Maschinen für starke Ströme angewendet. Die Gangzahl werde im folgenden mit a bezeichnet.

(373) Zahl der Umgänge der Wicklung. Wenn die Anzahl m der Kommutatorteile nicht durch den resultierenden Schritt Y teilbar, mithin m/Y keine ganze Zahl ist, so stimmt ein Umgang nicht genau mit dem Ankerumfang überein, die Differenz beider ist bei Wellenwicklung die Gangzahl a . Da von jedem Kommutatorteil ein Schritt ausgeht, also m Schritte gemacht werden müssen, um die ganze Wicklung zu durchlaufen, so ist der ganze zurückzulegende Weg mY . Dazu sind $mY/m = Y$ Umgänge zu machen. Bei der Spiral- und der Schleifenwicklung macht die Wicklung a Umgänge, bei der Wellenwicklung eine größere Zahl Y .

(374) Wicklungsformeln. A. Spiral- und Schleifenwicklung.
1. Einfach geschlossene: $Y = \pm a$, m nicht durch a teilbar. 2. Mehrfach geschlossene: $Y = \pm a$, m durch a teilbar. a ist in der Regel nicht größer als 2. Die Wicklung ist a -fach geschlossen.

B. Wellenwicklung. Bei zweipoligen Maschinen ist die Wellenwicklung elektrisch mit der Schleifenwicklung gleichwertig, von der sie sich nur durch die Lage der Stirnverbindungen unterscheidet.

Bei mehrpoligen Maschinen ist der Schritt Y ungefähr gleich der doppelten Polteilung 2τ , jedoch entweder etwas größer oder etwas kleiner; denn wäre er genau gleich der doppelten Polteilung, so würde sich die Wicklung schon nach einem Umgang in sich schließen, während es erst nach einer größeren Anzahl von Umläufen geschehen soll. Wenn p die Zahl der Polpaare ist, so möge die Feldverschiebung nach einem Umgang,

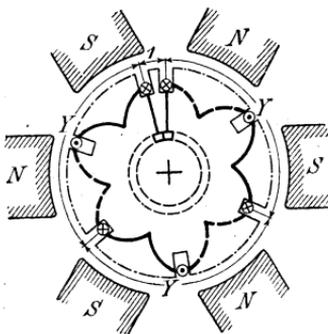


Abb. 173. Wicklungsschritte bei Wellenwicklung.

also nach p Schritten, a Nuten (vorwärts oder rückwärts) betragen, Abb. 173, in der $a = 1$ ist. Bei m Nuten auf dem Umfange ist demnach

$$pY = m \pm a, \text{ oder } m = pY \mp a$$

Das Pluszeichen in der letzten Formel ist vorzuziehen, weil es kürzere Stirnverbindungen gibt.

Sobald die Feldverschiebung durch Y teilbar wird, schließt sich die Wicklung in sich, weil man dann auf den Ausgangspunkt trifft. Dies geschehe nach η Umgängen. Dann ist die Feldverschiebung gleich ηa Teilen geworden. Es muß also $\eta a / Y$ eine ganze Zahl sein. Nun sind zwei Fälle möglich:

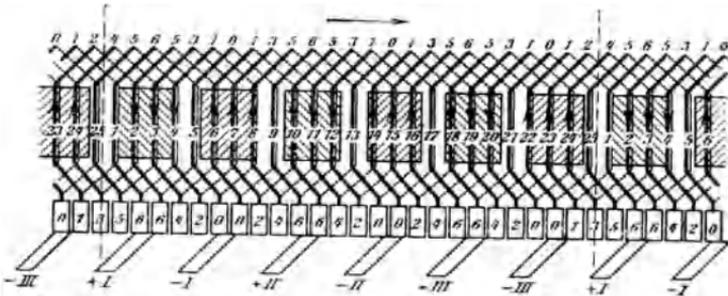


Abb. 174. Sechspolige Schleifenwicklung. $Y=1, y_1=4, y_2=3, m=25, p=3$.

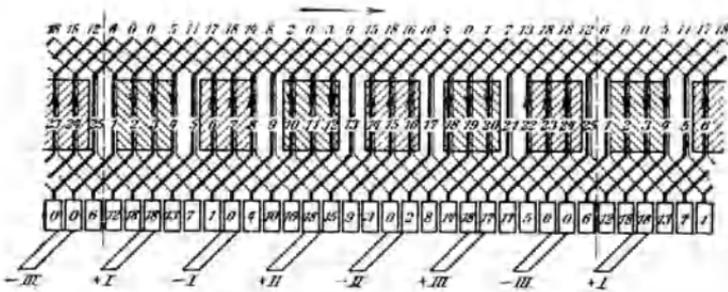


Abb. 175. Sechspolige Wellenwicklung, Reihenschaltung. $Y=8, y_1=4, y_2=4, n=25, p=3, a=1$.

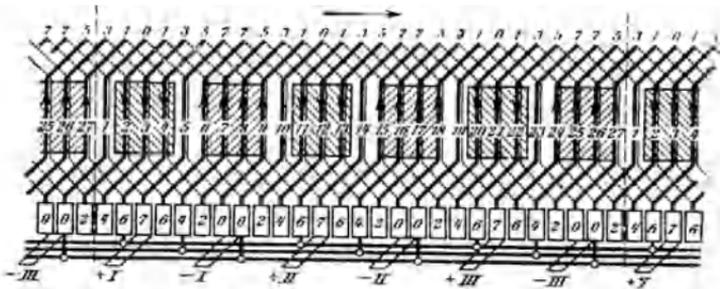


Abb. 176. Sechspolige Wellenwicklung, Reihenparallelschaltung mit Ausgleichverbindungen. $Y=8, y_1=4, y_2=4, m=27, p=3, a=3$.

- a) Y und a haben keinen gemeinsamen Teiler. Dann muß η durch Y teilbar sein. Der kleinste Wert von η ist dann also Y , d. h. die Wicklung schließt sich erst, wenn alle Windungen durchlaufen sind. — Einfach geschlossene Wicklung.
- b) Y und a haben i als größten, gemeinsamen Teiler. Setzt man

$$Y = Y_1 i, a = a_1 i$$

so wird

$$\frac{\eta a}{Y} = \frac{\eta a_1 i}{Y_1 i} = \frac{\eta a_1}{Y_1}$$

eine ganze Zahl. Da a_1 und Y_1 teilerfremd sind, ist $\eta = Y_1 = Y/i$ die kleinste Zahl, die eine ganze Zahl ergibt. Die Wicklung schließt sich dann also schon nach η Umgängen und zerfällt daher in i einfache Wicklungen: mehrfach geschlossene Wicklung.

(375) Zahl der parallel arbeitenden Wicklungsteile. Stromabnahmestellen sind da, wo sich beim Durchlaufen der Wicklung die Richtung der EMK umkehrt. Dies ist allemal der Fall, wenn die Feldverschiebung um die Polteilung gewachsen ist. Bei der Ring- und der Schleifenwicklung ist die gesamte Feldverschiebung nach Durchlaufen der ganzen Wicklung gleich ma , also die Zahl der parallel arbeitenden Teile gleich ma/τ oder da $m = 2p\tau$, gleich $2pa$. Bei der Wellenwicklung ist die gesamte Feldverschiebung gleich Ya , also die Zahl der parallel arbeitenden Teile gleich $Ya/\tau = 2a$, da $Y \approx 2\tau$ ist. Man nennt daher die Wellenwicklung mit $a = 1$ Reihenwicklung, weil sie nur zwei parallel geschaltete Zweige besitzt, mithin bei gegebener Stabzahl die höchste Spannung gibt, die von Arnold angegebene Wellenwicklung mit $a > 1$ die Reihenparallelwicklung.

Bestehen die Wicklungselemente aus Spulen, so werden die Verbindungen benachbarter Spulen entweder nach den Regeln der Schleifenwicklung oder der Wellenwicklung hergestellt. Beispiel der Wellenwicklung mit Spulen ist der übliche Straßenbahnmotor.

(376) Beispiele von Wicklungen. In den Abb. 174 bis 176 sind drei sechspolige einfach geschlossene Trommelwicklungen dargestellt. Setzt man die EMK jedes im Felde gelegenen Stabes gleich Eins, so ergeben sich die in die Kommutatorteile eingeschriebenen Potentiale, woraus sofort die Stellung der Bürsten und die Spannung der Maschine zu entnehmen ist. Man erkennt, daß bei der Reihenwicklung, Abb. 175, die gleichpoligen Bürsten durch nicht im Felde liegende Stäbe miteinander verbunden sind. Es genügen daher zwei Stromabnahmestellen, etwa $+I$ und $-I$ oder $-II$, doch macht man hiervon nur in besonderen Fällen Gebrauch.

(377) Ausgleichleitungen. Bei vielpoligen Maschinen ist es für die Güte des Betriebes wichtig, daß sich die Leistung gleichmäßig über die ganze Wicklung verteilt. Um den Ausgleich zu befördern, ordnet man Ausgleichleitungen (Äquipotentialverbindungen) an, die sich besonders bei Schleifenwicklung und bei Reihenparallelschaltung leicht anbringen lassen. Man verbindet durch Drahringe, die z. B. zwischen Wicklung und Kommutator untergebracht werden, solche Punkte der Wicklung miteinander, die dauernd gleiches Potential haben, vgl. Abb. 176. Wichtig ist dabei eine theoretisch ganz regelmäßige Potentialverteilung, wie sie vorhanden ist, wenn m durch p teilbar ist. Bei Reihenschaltung ist dies nicht der Fall, Arnold fügt daher hier noch eine Hilfsschleife ein (vgl. Arnold, Dynamomasch., S. 60 ff.).

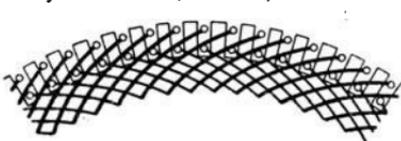


Abb. 177. Stirnverbindungen der Ankerwicklung.



Abb. 178. Anker mit Zylinderwicklung.

(378) Stirnverbindungen. In den weitaus meisten Fällen wird die Trommelwicklung so ausgeführt, daß zwei Lagen von Leitern am Ankerumfang hergestellt werden, von denen jeweilig durch die Stirnverbindungen ein oberer mit einem

unteren Leiter verbunden wird (Abb. 177). Liegen hierbei die Stirnverbindungen ganz oder nahezu in der Mantelfläche des Ankers, so heißt die Wicklung „Mantel-“ oder „Faß-“ oder „Oberflächenwicklung“ mit „Gitterkopf“, Abb. 178. Diese Ausführungsform ist die vorteilhafteste. Sind dagegen die Verbindungen auf den Stirnseiten des Ankers nach der Welle hin abgebogen, so heißt die Wicklung „Stirnwicklung“ mit „Gabelkopf“.

Schleifringe, Kommutator, Bürsten.

(379) Stromzuführung. Der Strom wird umlaufenden Wicklungen je nach Bedarf durch Bürsten und Schleifringe, von denen jeder nur die Verbindung mit einem oder einigen Punkten der Wicklung herstellen kann, oder durch Kommutatoren, die eine Einführung des Stromes an ständig wechselnden Punkten der Wicklung gestatten, entnommen oder zugeführt. Schleifringe werden aus Gußeisen, Bronze oder Kupfer hergestellt. Es ist bei größeren Durchmessern zu empfehlen, die Schleifringe zweiteilig zu machen, um die Auswechslung zu erleichtern; man vermeidet große Umfangsgeschwindigkeiten mit Rücksicht auf Verschleiß und Leistungsverluste. Die Schleifringe werden auf isolierende Buchsen gesetzt, die Anschlußdrähte fest mit ihnen verschraubt und gegen die Fliehkraft gesichert.

(380) Die Kommutatoren bestehen aus flachen Teilen *A*, Abb. 179, aus hart gezogenem Kupfer. Zur Isolation der einzelnen Teile dient Glimmer oder ein geeignetes Glimmerpräparat von 0,7—0,9 mm Stärke. Der Glimmer muß so ausgesucht werden, daß er sich ebenso stark abnutzt wie die Kupferteile, damit die Lauffläche des Kommutators glatt bleibt. Wird letztere unrund, so werden die auf dem Kommutator schleifenden Bürsten von den Unebenheiten stoßweise abgehoben, in Schwingungen versetzt, und es entstehen Funken. Die Kommutatorteile werden meist auf einer zweiteiligen Buchse aus Gußeisen aufgebaut, die durch Glimmerkappen von 1,5—5 mm Dicke isoliert und durch Anziehen der Spanschrauben verspannt wird (Abb. 179). Bei sehr großen Kommutatoren werden die Preßringe geteilt. In einzelnen Fällen verwendet man auch Preßstücke, die durch radiale Schrauben mit der Kommutatorbuchse verschraubt werden. Auch bei Erwärmung darf keine Veränderung irgendeines Teiles des Kommutators bemerkbar werden. *Die Isolation der Kommutatorteile gegeneinander und gegen den Körper wird mit Hochspannung geprüft.

Gegen die Wirkung der Fliehkraft erhalten Kommutatoren mit sehr großer Umfangsgeschwindigkeit (z. B. bei Turbodynamos) Schrumpfringe aus Nickelstahl, zu deren Isolation Glimmer dient. (Abb. 298.)

Die radiale Abnutzungstiefe der Kommutatorteile ist reichlich zu bemessen, damit nach längerer Betriebsdauer durch Abdrehen erneut eine glatte Oberfläche des Kommutators hergestellt werden kann. Zweckmäßig ist es, auf der Ankerseite des Kommutators bei *A*, Abb. 179, einen Einschnitt einzudrehen, durch dessen Tiefe zugleich angedeutet wird, bis zu welchem geringsten Durchmesser abgedreht werden darf. Kommutatoren dürfen nie durch Schnitte parallel zur Achse geteilt werden. Es ist zweckmäßig, die Kommutatoren so zu bauen, daß die Innenseite von abkühlender Luft bestrichen wird. Sehr lange Kommutatoren können durch Lüftungsschlitze unterteilt werden. Bei dem Bau langer Kommutatoren ist darauf Rücksicht zu nehmen, daß sich die Kommutatorteile bei Erwärmung ausdehnen können. Die Siemens-Schuckertwerke legen bei Turbodynamos je zwei auf einer Seite ausgehöhlte Teile so gegeneinander, daß sie einen zur Achse parallelen Kanal bilden, durch den Luft zur Kühlung gedrückt wird (Abb. 298). Die Kommutatorbuchse wird zweckmäßig bei großen Maschinen mit dem Ankerkörper verschraubt, so daß Anker und Kommutator ein von der Welle unabhängiges Ganzes bilden. Bei kleinen

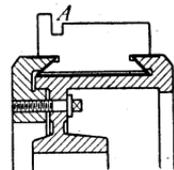


Abb. 179. Kommutator.

Maschinen wird der Kommutator einfach mit Feder und Nut auf der Welle befestigt (Abb. 307). Beim Betriebe werden die Kommutatoren durch Stromwärme im Übergangswiderstand zwischen Bürsten und Kommutator, durch die Reibung der Bürsten auf dem Kommutator und unter Umständen durch Wirbelströme in den Kommutatorteilen erwärmt. Zur Berechnung der Temperaturzunahme $\Delta\vartheta$ benutzen Arnold und la Cour (Gleichstromsch., 3. Aufl., Bd. 1, S. 689) die Formel

$$\Delta\vartheta = \frac{70 \text{ bis } 120}{1 + 0,1 v_k} \cdot \frac{V_k}{F_k}$$

worin v_k die Kommutatorgeschwindigkeit in m/s, V_k die gesamten Verluste im Kommutator in Watt und F_k die Oberfläche des Kommutators in cm^2 bedeutet.

(381) Funkenbildung. Funken erhöhen die Erwärmung beträchtlich und führen zu schnellem Verschleiß, sie sind daher durchaus zu verhüten. Ist ein Kommutator abgedreht worden, so ist sorgfältig zu prüfen, ob die Drehspäne nicht die Isolation zwischen zwei Segmenten überbrückt haben. Solche Überbrückungen gefährden die Ankerwicklung und sind daher zu entfernen. Zum Abdrehen dient ein spitzgeschliffener Stahl; nach dem Drehen schleift man mit Glaspapier (aber nicht Karborundum-Papier), event. bei Anwendung von etwas Öl, bis zur Herstellung einer spiegelglatten, hochglanzpolierten Oberfläche. Es empfiehlt sich, den Kommutator regelmäßig nach dem Betriebe mit feinstem Sandpapier ablaufen zu lassen, wobei man das Sandpapier mit Hilfe eines nach der Rundung des Kommutators geschnittenen Holzes, aber nicht unmittelbar mit den Fingern oder der Handfläche andrückt.

(382) Die Bürsten bestehen aus Kohle, Kupferblech, Kupferdraht, Kupfergaze, Kohle mit Metallblatteinlagen, gepreßten verkupferten Kohlenkörnern, Kupfergaze mit Graphitfüllung, Messing, Aluminium usw.

Metallbürsten haben den Vorteil, daß sie verhältnismäßig hohe Stromdichten an der Auflagestelle gestatten ($25\text{--}35 \text{ A/cm}^2$) und infolge ihrer Elastizität auch bei einem unrunder Kommutator eine innige Berührung gewährleisten. Hinsichtlich der Kommutierung sind sie weniger vorteilhaft, auch arbeiten sie mit höherem Reibungskoeffizienten (im Mittel 0,5) als Kohlenbürsten, verursachen großen Verschleiß und bedingen sehr sorgfältige Wartung des Kommutators, wenn er nicht durch ungleichmäßige Abnutzung bald unbrauchbar werden soll. Bei Anwendung von Metallbürsten empfiehlt es sich, den Kommutator mit geeigneten Mitteln ganz leicht zu schmieren. Wenn der Kommutator mit wechselndem Drehsinn umläuft, so sind Metallbürsten in der Regel nicht verwendbar.

Kohlenbürsten gestatten nur geringe Stromdichten ($5\text{--}15 \text{ A/cm}^2$), sie erleichtern aber die Kommutierung, arbeiten mit geringerem Reibungskoeffizienten (im Mittel 0,2) und verursachen infolge der schmierenden Wirkung des Graphits im allgemeinen geringen Verschleiß. Die Fabriken fertigen verschiedene Qualitäten an, die sich hinsichtlich der Härten und des Widerstandes unterscheiden; je höher die Maschinenspannung ist, um so größer pflegt man den Härtegrad und um so geringer die Leitfähigkeit der Kohle zu wählen. Für starke Ströme werden die Bürsten mit Metallzusätzen versehen. Mittlere Werte der zulässigen Stromdichten sind: für harte Kohlen 6 A/cm^2 , für mittelweiche 12 A/cm^2 , für weiche 15 A/cm^2 , für Kohlen mit Metallzusätzen 25 bis 45 A/cm^2 . Um den Stromübergang von der Kohle zum Bürstenhalter zu verbessern, verkupfert man vielfach die dem Kommutator abgewandte Seite der Bürste und verbindet sie durch eine Kupferlitze unmittelbar mit der auf den Bürstenbolzen sitzenden Klau, vgl. Abb. 182, im Betrieb soll aber die Verkupferung niemals mit dem Kommutator selbst irgendwie in Berührung kommen. Das Schmieren des Kommutators mit Öl oder dergleichen ist bei Anwendung von Kohlenbürsten zu vermeiden.

Der Auflagedruck soll bei weichen Kohlen $150\text{--}250 \text{ g/cm}^2$, bei harten 250 bis 400 g/cm^2 betragen. Der Reibungskoeffizient ist nach Lisca (Arbeiten

aus d. El. Inst. d. T. H. Karlsruhe, Bd. II): bei Graphit 0,06—0,20, bei Kohle 0,20—0,35, bei Metallgraphit 0,12—0,30, bei Metall 0,50. Er ist sehr stark von der Beschaffenheit des Kommutators abhängig.

Nach dem Einsetzen neuer Kohlen ist durch Aufschleifen dafür Sorge zu tragen, daß die beabsichtigte Auflagefläche auf dem Kommutator wirklich hergestellt wird.

(383) Übergangswiderstand. An jeder Bürsten-Auflagestelle entsteht ein Übergangswiderstand, dessen Größe sich mit dem Auflagedruck, der Umfangsgeschwindigkeit, der Stromrichtung und der Stromdichte ändert, und zwar so, daß der Widerstand mit zunehmender Geschwindigkeit (nur, solange diese gering ist) und mit abnehmendem Auflagedruck größer wird (vgl. D e t m a r, ETZ 1900, S. 429). Der Übergangswiderstand ist bei Kommutatoren größer als bei Schleifringen. Er ist von der Geschwindigkeit in beiden Fällen aus naheliegenden Gründen um so mehr abhängig, je weniger Kommutator oder Schleifring rund laufen, und je weniger gut der Bürstenhalter den Bewegungen des Kommutators folgt.

Der Übergangswiderstand hängt besonders stark von der Stromdichte, bei schnellen Änderungen von der effektiven Stromdichte ab. Er sinkt bei wachsender Stromdichte derart, daß der Spannungsverlust an der Bürste von der Strombelastung fast ganz unabhängig ist. Bei weichen Bürsten ist der Spannungsverlust an einer Bürste 0,8—1,2, bei harten 1,3—1,8 V. In der Richtung Metall-Kohle ist er größer als in der Richtung Kohle-Metall. Feuer tritt nach L i s c a (ETZ 1909, S. 83) auf, wenn die Spannung einen bestimmten Wert, die Funkengrenze, überschreitet, die für jede Kohlensorte eine Konstante in Höhe von 14 (Kohle Anode) bis 22 V (Kohle Kathode) ist. Bei Überschreitung der Funkengrenze wächst der Widerstand stärker als vorher mit der Stromdichte.

(384) Die Bürstenhalter haben die Aufgabe, die Bürste mit passendem Auflagedruck in der richtigen Lage gegen den Kommutator zu drücken. Der Druck beträgt bei ortsfesten Maschinen für Kupferbürsten 120 g*/cm², für Kohlenbürsten 150 bis 400 g*/cm² (382); bei bewegten oder nicht erschütterungsfrei aufgestellten Motoren, z. B. Fahrzeugmotoren, kommen nur Kohlenbürsten in Frage, denen man einen Auflagedruck von mindestens 250 g*/cm² gibt. Ein übermäßiges Andrücken der Bürsten, zu dem die Maschinisten namentlich bei schlecht gepflegten Kommutatoren neigen, ist zu vermeiden. Die Bürstenhalter müssen eine Vorrich-

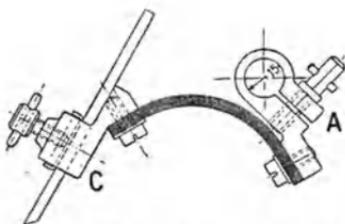


Abb. 180. Bürstenhalter, vorwiegend für Metallbürsten.

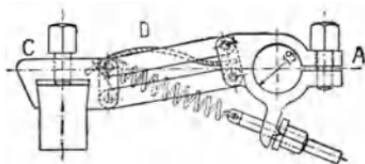


Abb. 181. Kohlenbürstenhalter, Kohlenbürste fest eingespannt.

tung zur Einstellung der richtigen Lage und des richtigen Druckes besitzen, weiter müssen sie so eingerichtet sein, daß die Bürsten leicht ausgewechselt werden können. Vielfach sind die Bürstenklötze der allein nachgiebige Teil, vgl. Abb. 182, bei der der mit einer Rolle auf die Kohle drückende Finger abgeklappt werden kann. Die Führung der Bürste ist dann so zu gestalten, daß ein Aufkanten weder bei radialer noch bei tangentialer Verstellung oder Durchfederung des Bürstenhalters eintritt. Eine gewisse Beweglichkeit muß gewahrt bleiben, weil das Rundlaufen der Kommutatoren auf die Dauer nicht genau aufrecht zu erhalten ist. Die Federung soll daher gut sein; hart gefederte Bürsten verursachen schnellen Verschleiß und

starkes Geräusch. Je leichter der Bürstenhalter, um so besser kann er geringen Ungleichheiten der Kommutatoroberfläche folgen.

Abb. 180 zeigt einen Bürstenhalter für tangential anliegende Bürsten, meist für Metallbürsten angewandt. Abb. 181 und 182 zeigen typische Konstruktionen für Kohlenbürstenhalter.

Abb. 183 zeigt einen Doppelbürstenhalter von Schuckert, der gestattet, bis zu einem gewissen Grade die Vorzüge der Metallbürste mit denen der Kohlenbürste zugleich auszunutzen.

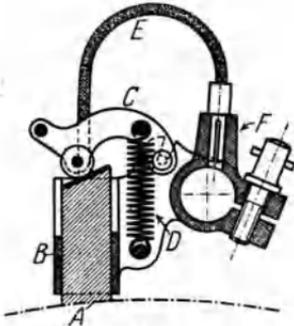


Abb. 182. Kohlenbürstenhalter, Kohlenbürste federnd gelagert.

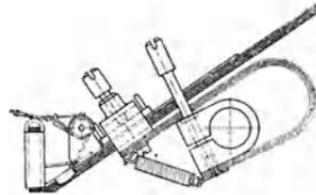


Abb. 183. Kombiniertes Metall- und Kohlenbürstenhalter.

(385) Bürstenträger. Die Bürstenhalter werden meist mit Klauen, seltener mit Schwalbenschwänzen am Bürstenstift befestigt. Der Bürstenstift oder Bürstenbolzen wird aus Eisen, hin und wieder auch aus Messing oder Kupfer hergestellt. Er ist kräftig zu halten, damit er nicht schwingt. Die freitragende Länge der Bürstenstifte sollte über ein gewisses Maß nicht hinausgehen; bei sehr langen Kommutatoren müssen die Bürstenstifte beiderseits mit Tragringen verschraubt werden, so daß eine Art Käfig entsteht (Abb. 298, 323, 326, 327, 329). Die Isolation der Bürstenstifte gegen den sie tragenden Bürstenträger besteht in Buchsen aus Stabilität, Vulkanasbest, Eisengummi, Mikanit usw., die allenthalben einige Millimeter über die Metallteile herausstehen sollen. Die Buchsen müssen möglichst mit übergreifenden Kanten ausgeführt werden, weil stumpfgestoßene Kanten leicht zu Durchschlägen Veranlassung geben.

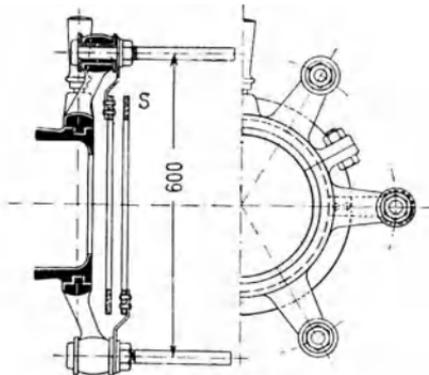


Abb. 184. Bürstenbrücke, sechspolig.

Die Bürstenträger werden am Motorgehäuse oder am Lager Schild durch Schrauben befestigt oder in Form von sogenannten Brillen ausgeführt und auf das Lager gesetzt (Abb. 184).

Verstellbarkeit der Bürsten ist bei neueren Maschinen vielfach nicht mehr erforderlich. Ist sie doch nötig, so wird die Bürstenbrille kleinerer Abmessung nach Lockern einer Klemmschraube von Hand, der Bürstenträger großer Maschinen mittels Schraubenspinde und Mutter verschoben (Abb. 297, 298). Die Bürstenträger

werden häufig zugleich zur Befestigung von Sammelschienen benutzt, die zur Verbindung der gleichpoligen Bürstenstifte dienen.

(386) Kurzschließer. Bedarf man der Anwendung von Schleifringen und Bürsten nur während bestimmter Zeiten, z. B. beim Anlassen von Motoren, so verwendet man Vorrichtungen, die zugleich das Abheben der Bürsten und das Kurzschließen der Schleifringe ermöglichen, vgl. Abb. 266. Einen selbsttätigen Kurzschließer der Siemens-Schuckertwerke, besonders für Gegenschaltung bei Induktionsmotoren (538), zeigt Abb. 185.



Abb. 185. Zentrifugal-kurzschließer.

(387) Die Klemmen der Maschine sind so anzubringen, daß sowohl eine bequeme Zuführung der äußeren Leitungen möglich, als auch fahrlässige Berührung und Kurzschließen durch zufällig auf die Klemmen fallende oder aus Unachtsamkeit oder Unkenntnis darauf gelegte Metallteile ausgeschlossen ist. Bei großen Maschinen ist es in der Regel am zweckmäßigsten, sie an deren unterem Teil anzubringen, vgl. Abb. 297, bei kleineren Maschinen, sie durch einen Schutzkasten abzudecken. Bei Wechselstrommaschinen ist darauf zu achten, daß die durch Eisenteile der Maschine, z. B. durch das Gehäuse, zu führenden Leitungen stets durch ein gemeinsames Loch gehen, andernfalls entstehen infolge wechselnder Magnetisierung starke Verluste und örtliche Erwärmungen durch Hysterese und Wirbelströme.

Kommutatormaschinen.

(388) Ankerrückwirkung. Durch den Ankerstrom wird bei Belastung auch die Ankerwicklung zum Sitz einer magnetomotorischen Kraft, die bei Leerlauf nicht vorhanden war. Der magnetische Zustand der Maschine ändert sich dadurch, und zwar stets so, daß eine Verzerrung des bei Leerlauf vorhandenen magnetischen Feldes auftritt. Bei einer zweipoligen Anordnung stellt Abb. 186a den Verlauf der Induktionslinien bei Leerlauf, Abb. 186b den Verlauf der Induktionslinien dar, die vorhanden sein würden, wenn das Ankerfeld allein bestände, Abb. 186c

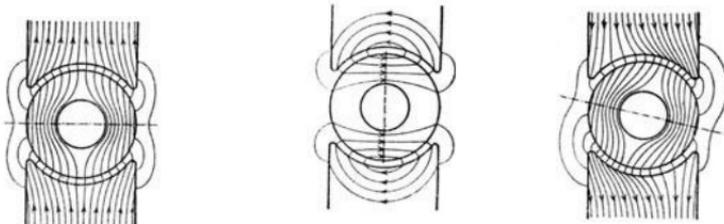


Abb. 186. Verlauf der magnetischen Linien.

a. Feldmagnete allein erregt (Hauptfeld).

b. Anker allein erregt (Querfeld).

c. Feldmagnete und Anker erregt (resultierendes verzerrtes Feld).

endlich den Verlauf der Linien bei Belastung. Das magnetische Feld im Luft-raum ist unter der einen Polkante verstärkt, unter der anderen abgeschwächt. Bei Generatoren wird es unter der ablaufenden Polkante verstärkt, unter der auflaufenden geschwächt, bei Motoren verhält es sich umgekehrt, weil sich der Motor bei gleicher Richtung des magnetischen Feldes und bei gleicher Richtung der Ankerströme umgekehrt dreht wie der Generator.

Nach Abb. 187 kann man die Ankerwindungen in zwei Gruppen zerlegen, nämlich eine, die in dem Winkel $\alpha\alpha$ liegt und entmagnetisierend wirkt, und eine Gruppe, die in dem Winkel $\beta\beta$ liegt und quermagnetisierend wirkt. Die

Größe der Winkel hängt von der Bürstenverstellung ab; die Gegenkomponente verschwindet im allgemeinen, wenn die Bürsten in der Mitte zwischen den Polen aufliegen. Näherungsweise zerlegt man wohl die gesamte Ankerdurchflutung nach dem Parallelogramm der Kräfte. Um die Bürsten auf funkenfreien Gang einzustellen, muß man sie bei einem Generator in der Drehrichtung verschieben, die Gegenkomponente wird dadurch vergrößert und schwächt den ursprünglich vorhandenen Magnetismus ab. Bei Motoren werden die Bürsten durch Verdrehung gegen die Drehrichtung auf funkenfreien Gang eingestellt, weil bei gleichen Richtungen des Magnetismus und der Ankerstromstärke der Motor mit seinem eigenen, der Stromerzeuger gegen sein eigenes Drehmoment läuft. Der ursprünglich vorhandene Magnetismus wird dadurch wieder abgeschwächt.

Bei den synchronen Wechselstrommaschinen wirkt die Phasenverschiebung ähnlich wie die Bürstenverschiebung bei den Kommutatormaschinen, vgl. (463).

(389) Die magnetischen Felder. An jeder Stelle des Ankerumfanges können wir ein von den Feldmagneten, ein von den Ankerströmen herrührendes und ein aus beiden resultierendes Feld unterscheiden. Bei geringer Sättigung des Eisens ist die von den Feldmagneten herrührende Feldstärke bei der radialen Dicke δ cm des Luftspaltes unter den Polen

$$\mathfrak{H}_f = \frac{0,4 \pi w_f I_f}{2 \delta},$$

wenn w_f die Windungszahl eines Polpaares ist. Zwischen den Polen ist das Feld weit schwächer, vgl. Kurve $P_0, P_1 \dots P_8$, Abb. 188.

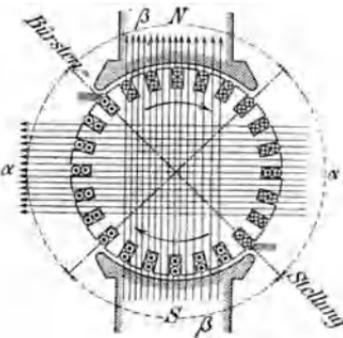


Abb. 187. Querfeld und Gegenfeld des Ankers bei Bürstenverschiebung.

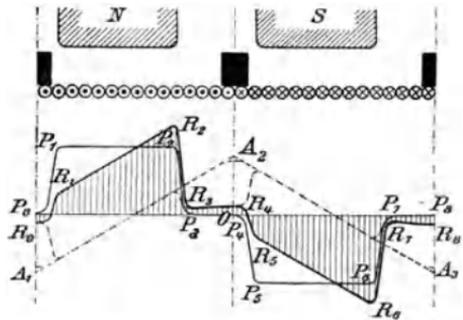


Abb. 188. Aus Erregerfeld und Ankerfeld resultierendes Feld.

Setzt man einen Kommutatoranker in einen ihn gleichmäßig umschließenden Eisenring, so daß der Luftspalt überall dieselbe radiale Dicke δ hat, so ist bei geringer Eisensättigung die Stärke des Ankerfeldes in der Mitte zwischen zwei ungleichnamigen Stromabnahmestellen gleich Null und wächst linear bis zu diesen Stellen, Linie $A_1 A_2 A_3$, Abb. 188. Die Spitzen sind aber wegen der magnetisierenden Wirkung der durch die Bürsten kurzgeschlossenen Windungen parabolisch abgerundet und unter Umständen verschoben. Setzt man die Ströme in diesen Windungen gleich Null, so sind die Spitzen abgeflacht, und die magnetomotorische Kraft ist gleich $0,4 \pi w_a I_a$, wenn w_a die Zahl der Windungen eines Polpaares (die kurzgeschlossenen nicht mitgerechnet) auf dem Anker und I_a die Stärke des in ihnen fließenden Stromes ist. Der höchste Wert der Ankerfeldstärke ist daher

$$\mathfrak{S}_a \max = \frac{0,4 \pi w_a I_a}{2 \delta} = \frac{0,1 \pi \cdot w_a I_B}{\delta},$$

wenn I_B der gesamte Strom an einer Abnahmestelle ist. $\mathfrak{S}_a \max$ darf auf keinen Fall größer als \mathfrak{S}_y sein, weil sich sonst die Richtung des resultierenden Feldes unter der auflaufenden Polkante umkehren könnte. Bei ausgeprägten Polen bildet sich dies Ankerfeld wieder nur unter den Polen in voller Stärke aus, zwischen ihnen nimmt es geringe Werte an.

Das aus beiden Feldern resultierende Feld ist durch die Kurve $R_0, R_1 \dots R_8$ (Abb. 188) dargestellt. Bei geringer Sättigung des Eisens, besonders auch in den Zähnen, wird durch diesen Linienzug auch die magnetische Induktion dargestellt. Man erhält dann in der Fläche, die sie mit der Abszissenachse einschließt, ein Maß für den Induktionsfluß Φ im Luftspalt. Wegen der starken Sättigung in den Zähnen kann dieser Wert aber nur als erste Annäherung gelten. Auch kann deswegen wohl die Abschwächung des Feldes auf der einen Seite unter dem Pole — unter der auflaufenden Kante — voll eintreten, nicht aber die Verstärkung unter der anderen Seite. Näheres hierüber in (390).

Die Folge davon ist eine Verminderung des Induktionsflusses auch dann, wenn die Bürsten genau in der neutralen Zone stehen, also die Gegenkomponente des Ankerfeldes verschwindet. Die EMK im Anker sinkt daher mit wachsender Belastung und kann nur durch Verstärkung der Erregung wieder auf die alte Höhe gebracht werden. Dadurch wächst aber auch die Streuung zwischen den Polen und insbesondere zwischen den Polschuhen. Die Streuung trägt aber wesentlich zur Sättigung der Feldmagnete bei. Es ist daher wichtig, darauf zu achten, daß die magnetische Induktion in den Feldmagneten nicht den Sättigungsgrad erreicht, oberhalb dessen es nur durch große Verstärkung der Erregung möglich ist, den für die Erzeugung der verlangten Spannung erforderlichen Induktionsfluß herzustellen. Unter Umständen ist es nachträglich möglich, durch Einlegen von Blechen zwischen Schenkel und Joch den Luftspalt zu verkleinern und dadurch Abhilfe zu schaffen. Abgesehen von der Sättigung läßt Abb. 187 deutlich erkennen, daß eine Verschiebung der Bürsten — bei den Generatoren im Sinne der Drehung, bei den Motoren im entgegengesetzten — den resultierenden Induktionsfluß verkleinert, und zwar um so mehr, je stärker der Ankerstrom ist.

(390) Genauere Bestimmung des Induktionsflusses. Wir nehmen an, daß alle Nord- und Südpole ganz gleich ausgebildet seien, so daß wir nur den halben magnetischen Kreis zu betrachten brauchen. Eine von Mitte Joch der Feldmagnete bis Mitte Joch des Ankers verlaufende Induktionslinie wird bei Leerlauf durch die Durchflutung $(w I)_f/2$ eines Poles erregt. Bei Belastung der Maschine tritt noch ein Teil der Ankerdurchflutung hinzu. Wir können ihn durch die Ordinate der Kurve $A_1 A_2 A_3$, Abb. 188, an der betreffenden Stelle ausdrücken, wenn der Höchstwert der Ordinate $w_a I_a$ ist. Nach H o p k i n s o n gilt dann für eine Induktionslinie, die um den Bogen x von der Mitte des Nordpoles entfernt den Luftraum durchsetzt, die Gleichung

$$\frac{1}{2} (w I)_f + (w_a I_a)_x = \frac{1}{0,4 \pi} \mathfrak{B}_L \delta + \Sigma \left(\frac{\mathfrak{B}_E}{0,4 \pi \cdot \mu_E} \cdot l_E \right) \quad (1)$$

δ ist die Dicke des Luftspaltes in cm, die Summe bezieht sich auf den Pfad im Eisen von Jochmitte zu Jochmitte. \mathfrak{B}_L in der Luft und \mathfrak{B}_Z in den Zähnen hängen von x ab, die übrigen Größen \mathfrak{B}_E und μ_E sind dagegen als unabhängig von x anzusehen, weil sich der Induktionsfluß in dem Polschaft und den Jochen sofort gleichförmig verteilt, vgl. Abb. 186c. Die linke Seite kann man durch einen Linienzug $R_0 R_1 \dots R_a$, Abb. 188, angeben. Man könnte daher \mathfrak{B}_L und \mathfrak{B}_Z in den Zähnen berechnen, wenn die übrigen \mathfrak{B}_E bekannt wären. Da dies nicht der Fall ist, muß man ein Näherungsverfahren anwenden. Man berechne Φ_L angenähert nach dem in (389) angegebenen Verfahren. Indem man Φ_L mit dem Schaft-

querschnitt und den doppelten Jochquerschnitten dividiert, findet man die zugehörigen Induktionen. Man kann nunmehr aus Gl. (1) \mathfrak{B}_L und \mathfrak{B}_Z für jeden Wert von α bestimmen, hiermit aufs neue Φ_L berechnen und damit den Rechnungsgang noch ein- oder zweimal wiederholen. Im allgemeinen wird die Bestimmung von \mathfrak{B}_L und \mathfrak{B}_Z an drei Stellen der Polschuhfläche genügen, um danach die Kurve $R_0 R_1 \dots R_n$ korrigieren zu können. Für die Sättigung in den Schenkeln und dem Joch der Magnete ist zu beachten, daß der Fluß Φ_L um die Streuung zwischen den Polen vergrößert wird, die nach (310) zu berechnen ist. Man erhält auf diese Weise den Induktionsfluß Φ_L im Luftspalt und seine Verteilung längs der Oberfläche in Abhängigkeit von der Erreger- und der Ankerstromstärke. Ist der Induktionsfluß gegeben, so hat man die Rechnung für verschiedene — etwa 3 — Erregerstromstärken durchzuführen, um daraus durch Interpolation die richtige Erregerstromstärke zu ermitteln.

(391) Ankerstreuung. Für die Induktion der EMK kommt nur der Teil von Φ_L in Betracht, der von den Ankerwindungen umschlungen wird. Wir nennen ihn Φ_a . Ein Teil des in einen Zahn eintretenden Flusses läuft durch den ganzen Zahn, ein Teil Φ_s aber wird, in Abb. 189 nach links, abgelenkt, tritt, ohne die in der Nut liegenden Drähte zu umschlingen, in den nächsten Zahn und läuft nun diesen Zahn entlang. Dieser letztere Teil ist also im ersten Zahn Streuung, im zweiten Zahn nützlicher Fluß. Die zwischen je zwei benachbarten Zähnen übergehende Streuung Φ_s ist der magnetischen Potentialdifferenz zwischen ihnen proportional. Diese aber kann nach (310) Satz 2 der mit $0,4\pi$ multiplizierten Durchflutung $z_z I_a$ der Nut zwischen den beiden Zähnen gleich gesetzt werden. Ist der magnetische Widerstand des Streuflusses \mathfrak{R}_s , so ist demnach

$$\Phi_s = \frac{0,4 \pi z_z I_a}{\mathfrak{R}_s}$$

Da alle Nuten unter einem Pol dieselbe Durchflutung haben, so kann man sich vorstellen, daß zwei Flüsse einander kreuzten, der nützliche Fluß und der Streufluß. Im allgemeinen wird der Fluß durch die Zähne nicht geändert, es geht nur ein Fluß, der an der einen Polkante eintritt, quer von Zahn zu Zahn unter dem Pol entlang zum benachbarten Pol. Demnach ist einfach

$$\Phi_a = \Phi_L - \Phi_s$$

zu setzen.

Zur Berechnung von \mathfrak{R}_s ist der ganze Pfad in eine Anzahl paralleler Teile zu zerlegen, deren magnetische Leitwerte zunächst bestimmt werden. Der reziproke Wert ihrer Summe ist \mathfrak{R}_s . Es kommen besonders folgende Teile in Betracht:

Steg oder Nutenöffnung, Teil zwischen Nutenöffnung und Drähten, Nut selbst [von diesem Teil ist nur der dritte Teil der Leitfähigkeit einzusetzen, um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß diese Induktionslinien nur einen Teil der Windungen umschlingen], Luftspalt zum gegenüberliegenden Teil und zurück. Dieser letztere, auch Zickzackstreuung genannte Teil liefert im allgemeinen den größten Betrag und darf nicht vernachlässigt werden. Endlich kommt noch die sogenannte Flankenstreuung in Betracht, d. h. der Teil, der an den Stirnseiten des Ankers aus- und eintritt, und der den außerhalb des Eisens liegenden Teil der Wicklung umgibt. Nach (329) findet man ferner

$$\nu_1 = 1 + \tau_1, \quad \nu_2 = 1 + \tau_2, \quad \varepsilon = 1 - \frac{1}{\nu_1 \nu_2}$$

(392) Kompensierung des Ankerfeldes (Menges, Fischer-Hinnen). Bringt man an den Feldmagneten eine ruhende Wicklung von derselben Windungszahl wie die der Ankerwicklung an, die von denselben Strömen, aber in entgegen-

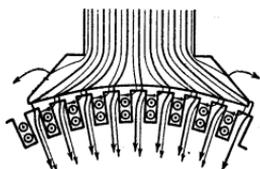


Abb. 189. Ankerfeld und Ankerstreuung.

gesetzter Richtung durchflossen wird, wie die konzentrisch innerhalb ihrer liegende Ankerwicklung, so kann die Wirkung der Ankerwicklung ganz oder — der Streuung wegen — angenähert aufgehoben werden. Die Stromstärke in der Kompensationswicklung kann durch einen zu dieser parallel geschalteten Widerstand eingestellt werden. Versieht man nach D é r i (vgl. ETZ 1902, S. 817) den Feldmagnet nicht mit ausgeprägten Polen, sondern stellt man ihn aus einem Ring mit inneren Nuten her, so liegen die Haupterregewicklung und die Kompensationswicklung zueinander wie die zwei Wicklungen einer Zweiphasenmaschine.

Hat die Maschine ausgeprägte Pole, so wird die Kompensationswicklung ebenfalls in Nuten an der Oberfläche der Pole untergebracht, aber zwischen den Polen weggelassen. Abb. 190 zeigt die Anordnung der Erregewicklung E und der Kompensationswicklung K bei einer Dérmaschine, Abb. 191 bei einer Maschine mit ausgeprägten Polen¹⁾.

(393) Wendepole¹⁾ (S w i n b u r n e). Will man das Ankerfeld nur in einem kleinen Bereich, in der Gegend der neutralen Zone kompensieren, so genügen dazu besondere kleine Pole WP , Abb. 191, die an das Joch der Feldmagnete angeschraubt sind und vom Ankerstrom erregt werden, oder Wendezähne Z , Abb. 190.

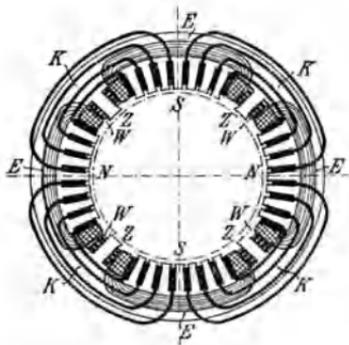


Abb. 190. Feldmagnete, den Anker möglichst gleichmäßig umschließend, mit Erregewicklung, Kompensations- und Wendepolwicklung.

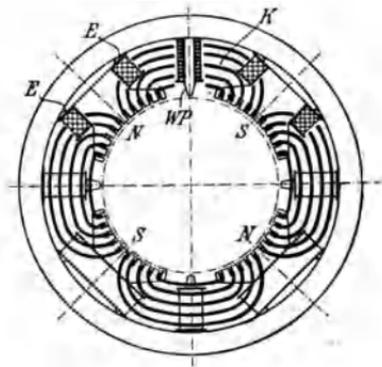


Abb. 191. Feldmagnet mit ausgeprägten Polen, mit Erregewicklung, Kompensations- und Wendepolwicklung.

Häufig findet man sowohl die Kompensationswicklung als auch Wendepole bei derselben Maschine angebracht. Bei der Dér'schen Anordnung bilden einzelne starke Zähne Z , Abb. 190, die Wendepole. Beide Anordnungen dienen besonders zur Erzielung einer guten Kommutierung. Durch die Kompensationswicklung wird im wesentlichen das Ankerfeld vernichtet, durch die Wendepole, deren Erregung durch einen zu ihrer Wicklung parallel geschalteten Regulierwiderstand eingestellt werden kann, wird ein für die Kommutierung geeignetes Wendefeld geschaffen, die Wendepole dienen also zur Feinregulierung.

(394) Die Kommutierung.¹⁾ Während sich die Kommutatorteile, Abb. 192 von links nach rechts unter der Bürste fortbewegen, werden beständig Wicklungselemente $A_1 A_2, A_2 A_3, \dots$ vom linken Teile der Ankerwicklung ab- und dem rechten Teile zugeschaltet. Dabei schließt die Bürste eine oder mehrere Ankerspulen während der Zeit des Vorüberganges vor der Bürste kurz und es tritt eine einfache oder mehrfache Stromverzweigung ein, denn der Strom, der links von A_1 die Stärke I_a hat, teilt sich im Punkte A_1 in die Teile i_1 und i_{12} , der Strom i_{12} teilt

¹⁾ Literatur siehe S 277.

sich im Punkte A_2 in i_2 und i_{23} usw. Die Ströme i_{12} , i_{23} , i_{34} , ... müssen dabei an Stärke abnehmen, ihre Richtung umkehren und wieder zunehmen, und die Kommutierung besteht darin, daß der Strom in einem Element während der Dauer T des Kurzschlusses von der Stärke $-I_a$ auf die Stärke $+I_a$ gebracht

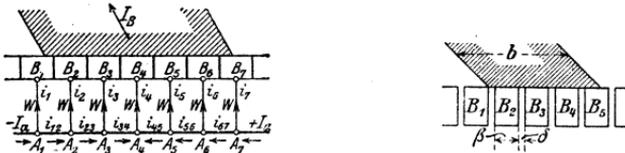


Abb. 192. Stromverlauf bei der Kommutierung. Abb. 193. Kommutorteile und Bürste.

wird, wenn I_a die Stärke der in zwei einander benachbarten durch die kurzgeschlossenen Ankerspulen voneinander getrennten Ankerzweigen ist. Aus der Bürste fließt der Strom $I_B = 2I_a$.

(395) Die Kurzschlußdauer. Es bedeute b die Bürstenbreite, β die Breite eines Kommutorteiles, δ die Dicke der Isolationsschicht zwischen zwei Kommutorteilen, τ die Zeit, die verstreicht, während der Kommutator um die Kommutorteilung $(\beta + \delta)$ weiter gelangt, T die Dauer des Kurzschlusses einer Ankerspule, v_k die lineare Kommutatorgeschwindigkeit, m die Zahl der Kommutorteile, n die Drehzahl in U/min. Dann ist

$$v_k = m(\beta + \delta) \frac{n}{60} = \frac{\beta + \delta}{\tau} \tag{1}$$

Der Kurzschluß zwischen B_1 und B_2 , Abb. 193, beginnt, wenn die linke Bürstenkante die rechte Kante von B_1 berührt, und endet, wenn die rechte Bürstenkante die linke Kante von B_2 verläßt. Die Bürste legt dabei den Weg $(b - \delta)$ zurück und braucht dazu die Zeit T . Daher ist

$$v_k = \frac{b - \delta}{T} \tag{2}$$

Aus (1) und (2) folgt

$$\tau = \frac{60}{mn} \quad \text{und} \quad T = \frac{60(b - \delta)}{mn(\beta + \delta)} = \frac{b - \delta}{\beta + \delta} \cdot \tau \tag{3}$$

Vernachlässigt man δ , so ist

$$T = \frac{60b}{mn\beta} = \frac{b}{\beta} \tau \tag{4}$$

Es ist zu empfehlen, für $b/(\beta + \delta)$ eine ganze Zahl zu wählen. τ ist im Mittel 0,00075 s, bei langsam laufenden Maschinen größer, bei schnelllaufenden geringer, bei Turbodynamos etwa 0,00033 s. Die Zahl m der Kommutorteile beträgt für ein Polpaar etwa 70, bei Schleifenwicklung ist m etwas geringer, bei Wellenwicklung etwas größer.

(396) Lineare Kommutierung. Die Kommutierung ist gut, wenn die Stromdichte unter der Bürste nirgends den zulässigen Wert überschreitet, vgl. (382). Am besten ist es, wenn sie überall gleich groß ist. Es müssen dazu von allen Kommutarteilen, die ganz von der Bürste bedeckt sind, gleich starke Ströme abgegeben werden, von dem auflaufenden und dem ablaufenden Teile dagegen Ströme, deren Stärken den von der Bürste bedeckten Teilen proportional sind. Der Strom i_1 muß demnach linear wachsen, i_{12} also linear abnehmen. Wenn i_2 konstant sein soll, muß i_{23} ebenfalls linear abnehmen. Während der Zeitdauer τ stellt daher zur Zeit t in Abb. 194a DA den Strom $-I_a$, DB den Strom i_{12} , DC den Strom i_{23} usw. dar, während AB den Strom i_1 , BC den Strom i_2 usw. darstellt. DG stellt

den Strom $+I_n$ dar. Nach der Zeit τ wird aber der Strom i_{12} zum Strom i_{23} , der Strom i_{23} zum Strom i_{34} usw., ferner der Strom i_1 zum Strom i_2 , der Strom i_2 zum Strom i_3 usw. Betrachtet man daher die Zeitdauer $T = g\tau$, so erhält man, Abb. 194b, in der schrägen Geraden die Darstellung des linearen Verlaufes des Stromes eines Wicklungselementes, weil sich die einzelnen geraden Strecken A_1B_2, B_1C_2, \dots zu einer einzigen Geraden zusammenschließen. Ferner zeigt Abb. 194c den Verlauf des Stromes i_1 oder i_2 oder ... in einer der Verbindungsleitungen zum Kommutator. In ihnen dauert der Strom, wenn die Bürstenbreite ein genaues Vielfaches der Kommutatorteilung ist, die Zeit $(g+1)\tau = (T+\tau)$. An der Konstruktion der Abb. 194 ändert sich nichts, wenn die Bürstenbreite nicht ein genaues Vielfaches der Kommutatorteilung ist.

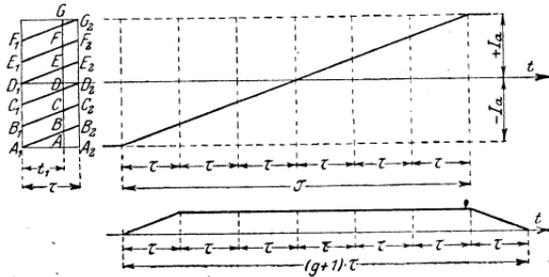


Abb. 194. Stromverlauf bei linearer Kommutierung.

(397) Verfrühte und verspätete Kommutierung. Steigt der Strom in einer Ankerspule zuerst schneller an, als der linearen Kommutierung entspricht, so daß der Verlauf durch die unterste Kurve der Abb. 196a dargestellt wird, so spricht man von verfrühter, im entgegengesetzten Falle, Abb. 196c, von verspäteter Kommutierung. Man kann aus der Kurve für den Kurzschlußstrom leicht die Kurve für

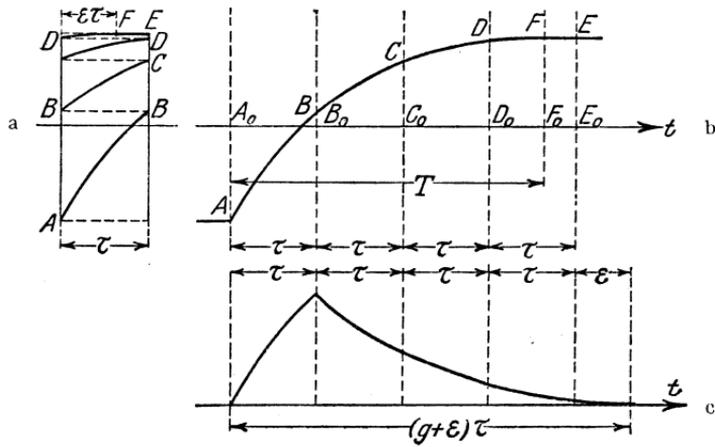


Abb. 195a bis c. a) Verfrühte Kommutierung, b) Kurzschlußstrom, c) Strom in den Verbindungsleitungen.

den Strom in den Verbindungsleitungen konstruieren. Man trägt von dem Punkte A_0 (Abb. 195b) in dem der Kurzschluß beginnt, so oft die Strecke τ auf der Abszissenachse ab, bis der Punkt F_0 erreicht oder überschritten ist, in dem die Kommutierung beendet ist, zieht durch die so gewonnenen Punkte $B_0C_0 \dots$ Senkrechte zu der Abszissenachse und schneidet die Abbildung längs dieser Linien auf. Legt man dann die Streifen (aus Pauspapier) übereinander, Abb. 195a, so erhält

man in den Abschnitten zwischen den Kurvenstücken die Ströme in den Verbindungsleitungen, Abb. 195c. Abb. 196a und 196c zeigen in den oberen, stärker ausgezogenen Kurven die Ströme i_α in den Verbindungsleitungen. Man erkennt aus den Abbildungen, daß bei verfrühter Kommutierung die hinteren Verbindungsleitungen sehr schwache, unter Umständen sogar negative Ströme führen. In dem ersten Fall ist die Bürstenbreite b unnötig groß, im zweiten sogar schädlich. Dasselbe gilt bei der verspäteten Kommutierung für die vorderen Verbindungsleitungen.

Die Verbindungsleitungen können fehlen, indem Anfang und Ende der Ankerspulen unmittelbar an die Kommutatorteile angeschlossen werden; die Ströme, die wir in den Verbindungsleitungen gefunden haben, gelten aber auch für die zugehörigen Kommutatorteile. Die verfrühte Kommutierung hat daher eine größere Stromwärme an der auflaufenden, die verspätete eine solche an der ablaufenden Kante zur Folge, was zum Glühendwerden der Kanten führen kann. Auch bei Leerlauf können die Ströme sehr stark werden und große Verluste erzeugen.

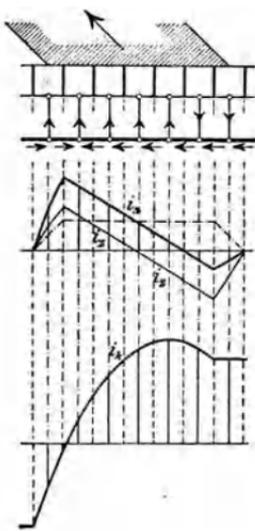


Abb. 196a. Verfrühte Kommutierung.

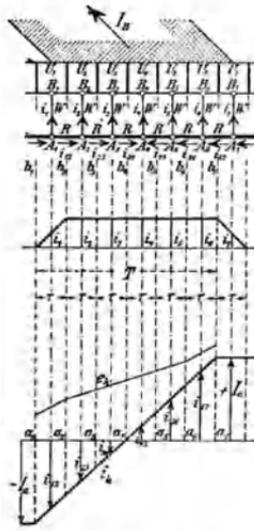


Abb. 196b. Lineare (beste) Kommutierung.

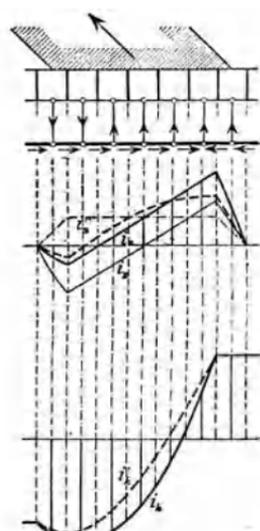


Abb. 196c. Verspätete Kommutierung.

(398) Der zusätzliche Strom. Verläuft der Kurzschlußstrom i_k nicht linear, so kann man ihn in zwei Teile zerlegen, von denen der erste den Kurzschlußstrom bei linearer Kommutierung, der andere den zusätzlichen Strom darstellt. Die Summe beider gibt den wahren Kurzschlußstrom. Die magnetisierende Wirkung der ersten Komponente beschränkt sich darauf, daß die Ankerfeldkurve, die ohne Berücksichtigung der Kurzschlußströme an den Spitzen abgeflacht erscheint, parabolisch abgerundet wird. Die zusätzlichen Kurzschlußströme verschieben dagegen die Ankerfeldkurve, erzeugen also eine Querkomponente des Ankerfeldes. Bei Generatoren ist diese Querkomponente bei verfrühter Kommutierung ebenso wie das Hauptfeld gerichtet und wirkt daher magnetisierend, bei verspäteter Kommutierung ist sie gegen das Hauptfeld gerichtet und wirkt entmagnetisierend. Bei Motoren ist die Wirkung umgekehrt. Ebenso kann man den Strom in den Verbindungsleitungen in die bei linearer Kommutierung vorhandene und die zusätzliche Komponente i_z , Abb. 196a u. c zerlegen.

(399) **Die Strom- und die Spannungsgleichungen.** Nach dem ersten Kirchhoffschen Gesetz hat man, Abb. 196b oben, wenn man die Richtung der Ströme $i_{12}, i_{23}, i_{34} \dots$ nach links als die positive ansieht,

$$\begin{aligned} i_{12} - i_1 + I_a &= 0 \\ i_{23} - i_{12} - i_2 &= 0 \\ i_{34} - i_{23} - i_3 &= 0 \\ &\dots \dots \dots \\ I_a - i_{g, g+1} - i_{g+1} &= 0 \end{aligned}$$

Durch Addition folgt hieraus der Gesamtstrom I_B einer Stromabnahmestelle

$$i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_{g+1} = 2I_a = I_B$$

Nach dem zweiten Kirchhoffschen Gesetz erhält man für jede Masche eine Gleichung, für die erste z. B.

$$Wi_1 - Wi_2 + Ri_{12} + u_1 - u_2 = e_{12}$$

wenn u_1 und u_2 die Übergangsspannungen zwischen den Kommutatorteilen und der Bürste, positiv nach der Bürste hin gerechnet, sind, e_{12} die gesamte in der Ankerspule induzierte EMK ist. Bei linearer Kommutierung ist $i_1 = i_2, u_1 = u_2$, also $Ri_{12} = e_{12}$. Es muß daher in den Ankerspulen während der Kommutierung eine EMK auftreten, die mit negativen Werten beginnt, linear wächst und im Mittel gleich Null ist. Sie ist aber nur niedrig, weil R ein sehr kleiner Widerstand ist. Bei den verwickelten Verhältnissen wird man kaum jemals erreichen können, daß die wirklich vorhandene EMK dem einfachen linearen Gesetz folgt, man muß daher in erster Linie danach streben, daß ihr Mittelwert während der Kommutierung gleich Null ist und daß sie zu keiner Zeit beträchtliche Werte erreicht. Dies läßt sich in hohem Maße durch Kompensationswicklungen (392) und Wendepole (393) erreichen.

Setzt man die EMK gleich Null, so darf sich der gesamte durch eine kurzgeschlossene Spule tretende Induktionsfluß nicht ändern, wenn sie nacheinander die Lage der benachbarten kurzgeschlossenen Spulen einnimmt. Mithin dürfen — Gleichheit der magnetischen Verhältnisse an beiden Spulenseiten vorausgesetzt — die Spulenseiten keinen Induktionsfluß schneiden; es darf also an den Stellen, wo sich jene Spulenseiten befinden, kein Induktionsfluß in den Anker eintreten oder aus ihm austreten. In dem Grenzfall, daß die Widerstände verschwindend gering sind, muß der gesamte Induktionsfluß in den Zähnen der Kommutierungszone verschwinden (vgl. Menges, ETZ 1907, S. 1058); nimmt man darauf Rücksicht, daß die Ankerspulen Widerstand besitzen, so muß der Induktionsfluß in den Zähnen, wenn sie die Kommutierungszone durchlaufen, von sehr geringen negativen zu sehr geringen positiven Werten anwachsen.

(400) **Die Kommutierungstheorie.** Der veränderliche Kurzschlußstrom erzeugt in unmittelbarer Nachbarschaft der Leiter ein veränderliches magnetisches Feld. Um dessen Wirkung aufzuheben, muß von außen ein zweites Feld, das kommutierende Feld, erzeugt werden. Man kann sich die Linien des ersten Feldes im Innern der Nut um die Leiter, aber auch noch im Eisen um die Nut herum in dem einen Sinne, die Linien des zweiten Feldes in den Zähnen entgegengesetzt gerichtet denken. Es bildet sich daher in den Zähnen ein resultierendes Feld aus, dem die magnetische Induktion entspricht. Es ist dabei durchaus nicht ausgeschlossen, daß in demselben Zahne zwischen zwei Leitern die Induktionslinien teils in dem einen, teils in dem anderen Sinne verlaufen. Die übliche Theorie teilt jedoch jedem der beiden Felder einen fiktiven Induktionsfluß zu. Dem ersten Induktionsfluß Φ_s entspricht eine EMK e_s der Selbstinduktion und der gegenseitigen Induktion (auch Reaktanzspannung genannt), dem zweiten kommutierenden Induktionsfluß Φ_k die

kommutierende EMK e_k . Sind mehrere Spulen gleichzeitig kurzgeschlossen, so folgen die Kurzschlußströme in den verschiedenen Spulen alle genau oder annähernd demselben Gesetze, besitzen aber Phasenverschiebungen gegeneinander. Die EMK e_s widerstrebt der Änderung des Kurzschlußstromes, die kommutierende EMK e_k ist erforderlich, um den Übergang des Stromes i_k von $-I_a$ auf $+I_a$ in der Zeit T des Kurzschlusses zu erzwingen.

Das kommutierende Feld. Die Kurzschlußströme erzeugen demnach für sich ein mitumlaufendes magnetisches Feld, das den mitumlaufenden veränderlichen Induktionsfluß Φ_s zur Folge haben würde, wenn es allein vorhanden wäre. Die Linien dieses Feldes umschlingen die Drähte der betrachteten kurzgeschlossenen Spule. Die zeitliche Änderung von Φ_s erzeugt e_s . Nun ist

$$e_s = L \frac{di_k}{dt} + \Sigma M \frac{di}{dt},$$

worin das erste Glied die Wirkung der kurzgeschlossenen Spule auf sich selbst, das zweite Glied die Wirkung der benachbarten kurzgeschlossenen Spulen auf die betrachtete Spule darstellt. Bei linearer Kommutierung ist $di_k/dt = di/dt = \text{const}$, man kann daher $e_s = S \cdot di/dt$ schreiben. Der Mittelwert von e_s ist dann

$$e_{s \text{ mittel}} = \frac{1}{T} \int_0^T S \frac{di}{dt} dt = S \int_{-I_a}^{+I_a} \frac{di}{T} = \frac{2SI_a}{T}.$$

Um diese EMK aufzuheben, ist nun eine kommutierende EMK e_k erforderlich, deren Mittelwert während des Kurzschlusses ebenso groß wie e_s und entgegengesetzt gerichtet ist. Diese EMK denkt man sich dadurch erzeugt, daß die Drähte der kurzgeschlossenen Spule die Linien eines feststehenden Induktionsflusses Φ_k schneiden, der von dem kommutierenden Felde herrührt. Das kommutierende Feld muß eine solche Richtung haben, wie sie für die Induktion des Stromes $+I_a$ nach der Kommutierung erforderlich ist. Man hat also

$$e_{k \text{ mittel}} = \frac{2SI_a}{T} = e_s$$

Die mittlere kommutierende EMK e_k muß also um so größer sein, je stärker der Strom I_a , je größer die Induktivität S der kurzgeschlossenen Spulen und je kleiner die Kurzschlußdauer T ist. Eine Vergrößerung der Bürstenbreite b vergrößert die Kurzschlußdauer T , aber auch die Induktivität. Häufig findet man, daß die Kohlenbürsten etwa drei Teile gleichzeitig bedecken. T wird um so kleiner, je größer die Kommutatorgeschwindigkeit wird. Die Schwierigkeiten der Kommutierung sind daher bei schnelllaufenden Maschinen, z. B. bei Turbodynamos, größer als bei langsam laufenden und nur durch Kompensationswicklungen oder Wendepole zu überwinden.

(401) Die Berechnung von S . Die Induktivität S ist von dem magnetischen Widerstande, den der mit der Spule verschlungene Induktionsfluß findet, abhängig und wird daher wesentlich von der Form der Maschine, von der Größe des Luftraumes und von der Höhe der Eisensättigung beeinflusst. Starke Sättigung der Zähne verkleinert die Induktivität der Spule, weil nach (309) die Beiträge zu S von allen Teilen des magnetischen Kreises wegfallen, für die $d\Phi/di$ verschwindet. Es bleibt daher nur der magnetische Pfad durch die Zähne des Ankers, die schwach gesättigt sind, die also zwischen den Polen und in der Nähe der kurzgeschlossenen Spulen liegen, zu berücksichtigen. Liegen außerhalb des Ankers Eisenmassen, z. B. Wendepole, so wird dadurch der magnetische Widerstand verringert, die Induktivität also vergrößert. Zur Erzielung kleiner Induktivität sind glatte Anker günstiger als Nutenanker, flache Nuten günstiger als tiefe und offene günstiger als halb oder ganz geschlossene Nuten. Hat man den von I_a in der

Spule selbst und in den übrigen kurzgeschlossenen auf sie einwirkenden Spulen herrührenden sie durchdringenden Induktionsfluß Φ_s berechnet, so ist $SI_a = w\Phi_s \cdot 10^{-8}$ Volt, wenn w die Windungszahl der Spule bedeutet. S wird also um so kleiner, je weniger Windungen die einzelnen Ankerspulen enthalten, und zwar nimmt es etwa in quadratischem Verhältnis mit w ab, weil man auch Φ_s proportional mit w setzen kann. Es wird also bei gegebener Ankerkonstruktion am kleinsten, wenn man jedes Wicklungselement nur aus einer Windung bestehen läßt, was besonders bei Wechselstrom-Kommutatormotoren üblich ist. Dies ist nur bei der Schleifenwicklung möglich und erfordert vierteilige und große Kommutatoren. Die Gegeninduktivität ΣM ist um so größer, je mehr Spulen gleichzeitig kurzgeschlossen sind. Die benachbarten Spulen wirken um so weniger stark auf die betrachtete Spule ein, je weiter sie von ihr entfernt sind; es kommt also wesentlich darauf an, ob sie in derselben Nut oder in den benachbarten Nuten liegen. Man kann ihre Wirkung im Durchschnitt nach P i c h e l m a y e r (ETZ 1901, S. 967) zu 0,4 bis 0,6 der Wirkung der Spule auf sich selbst annehmen. In der Praxis wird vielfach nach einer einfachen empirischen Regel von P a r s h a l l und H o b a r t (Electric Generators S. 159) gerechnet, die im wesentlichen auch P i c h e l m a y e r (Dynamobau S. 99 ff.) bestätigt gefunden hat, und die wenigstens für den ersten Entwurf von Maschinen normaler Bauart gute Dienste leistet. Danach findet man die Selbstinduktivität einer Spule, indem man bei 1 A Stromstärke für je 1 cm Länge des ins Eisen gebetteten Ankerdrahtes 4 und für je 1 cm Länge des in der Luft liegenden Ankerdrahtes 0,8 Induktionslinien rechnet. Daraus folgt, daß

$$\Phi_s = w_{ges} I_a (4l_E + 0,8l_L),$$

wenn w_{ges} die Windungszahl aller zu dem Induktionsflusse beitragenden kurzgeschlossenen Windungen, auch solcher, die durch eine andere Bürste kurzgeschlossen sind, l_E die Länge des in das Eisen eingebetteten und l_L die Länge des in der Luft liegenden Drahtes einer Windung in cm bedeutet. Wenn dann die betrachtete Spule w Windungen besitzt, so ist die Induktivität

$$S = \frac{w \Phi_s 10^{-8}}{I_a} = w w_{ges} (4l_E + 0,8l_L) 10^{-8} \text{ Henry}$$

(402) Kommutierung mit Bürstenverschlebung. Je nach der Art, wie das kommutierende Feld hergestellt wird und beschaffen ist, unterscheidet man verschiedene Arten der Kommutierung. Die älteste Art ist die durch B ü r s t e n v e r s c h i e b u n g. Die Bürsten werden so weit aus der neutralen Zone verschoben, bis die kurzgeschlossenen Spulen sich in einem schwachen, von den Polen der Maschine herrührenden Felde befinden. Die Spulenseiten liegen dann in der Nähe der „auflaufenden Polkante“. Wächst hier längs der Peripherie des Ankers die Feldstärke zu plötzlich, so ist die Bürsteneinstellung sehr empfindlich. Man gibt daher den Polschuhen gern eine solche Form, daß das Feld allmählich stärker wird, indem man an den Polkanten den magnetischen Widerstand größer macht. Ein einfaches Mittel dazu besteht darin, den Luftspalt nach den Polkanten hin allmählich wachsen zu lassen. Werden die Pole aus Blechen hergestellt, so kann man auch an den Polkanten jedes zweite Blech wegschneiden, so daß infolge der größeren Sättigung der magnetische Widerstand in den Polkanten größer wird. Bei Generatoren müssen die Bürsten in der Drehrichtung des Ankers, bei Motoren, weil sie bei derselben Richtung des magnetischen Feldes und der Ankerströme umgekehrt wie die Generatoren laufen, entgegen der Richtung des Ankers verschoben werden. Das Feld muß ferner um so stärker sein, je stärker der Ankerstrom ist. Da aber das Feld in der Nähe der auflaufenden Polkante um so mehr geschwächt wird, je stärker der Ankerstrom ist, so wird das kommutierende Feld schwächer, wenn es stärker sein müßte. Die Bürsten müssen daher um so weiter verstellt werden, je größer die Belastung wird. In der Regel wird aber verlangt, daß die Maschinen bei jeder Belastung ohne Bürstenverstellung laufen. Man erreicht dies angenähert, indem man die Bürsten für die halbe Belastung richtig

einstellt. Bei Leerlauf und bei Vollbelastung ist die Kommutierung dann weniger vollkommen. Die EMK e_s darf dann bei den üblichen Konstruktionen unter Verwendung von Kohlenbürsten nicht mehr als 2 bis höchstens 3 V betragen. Widerstandsverbindungen W zwischen der Wicklung und den Kommutatorteilen und besonders ein nicht zu geringer Übergangswiderstand U von dem Kommutator zu den Bürsten wirken günstig, weil sie bei „zusätzlichen EMKen“ ein allzustarkes Anwachsen der „zusätzlichen Ströme“ verhindern. Die Übergangswiderstände U sind besonders wirksam, weil sie mit der Größe der Berührungsfläche zwischen einem Kommutatorsteil und der Bürste von selbst zu- und abnehmen, während der Widerstand W der Verbindungsleitungen konstant bleibt. Die Übergangswiderstände sollen aber auch nicht zu groß sein, damit nicht zu viel Stromwärme an ihnen auftritt. Die Stromdichte beträgt bei Kohlenbürsten 5—15 A/cm², der Spannungsverlust p an den Übergangsstellen etwa 1,2—1,8 V für eine Bürste. Weiche Kohlen verursachen einen geringeren, harte einen größeren Spannungsverlust. Dickere Kohlen gestatten, den Kommutator kürzer zu bauen, vorausgesetzt, daß die Stromdichte unter ihnen einigermaßen gleichförmig, die Kommutierung also linear ist. Jedoch soll das „kommutierte Bündel“, d. h. die Zahl der durch eine Bürste gleichzeitig kurzgeschlossenen Spulen, bei kleinen Maschinen nicht mehr als $\frac{1}{6}$, bei mittleren nicht mehr als $\frac{1}{12}$ der auf die Polteilung entfallenden Spulen betragen. Bei großen Maschinen kann man $\frac{1}{18}$ erreichen. (Pichelmayr, Dynamobau.) Für das Verhältnis $b/(\beta + \delta)$ der Bürstenbreite zur Kommutatorteilung ist möglichst eine ganze Zahl zu wählen. Häufig findet man bei normalen Maschinen hierfür die Zahl 3.

(403) Kommutierung ohne Bürstenverschiebung. Die Kommutierung ist besonders schwierig, wenn die Maschinen ohne Bürstenverschiebung in beiden Richtungen laufen sollen. Man muß die Bürsten dann in die neutrale Zone stellen. Das kommutierende Feld besteht dann in dem Ankerfelde und hat die verkehrte Richtung. Man ist in diesem Falle auf die reine „Widerstandskommutierung“ angewiesen, die in der Zu- und Abnahme der Übergangswiderstände an dem auf- und dem ablaufenden Kommutatorsteil begründet ist, und muß die EMK e_s besonders niedrig, etwa zu 1,5 V wählen. Walsemann empfiehlt für diesen Fall die Anwendung von Kohlen mit dreieckigem oder trapezförmigem Querschnitt mit der Spitze oder geringeren Seitenlänge an der ablaufenden Seite (ETZ 1922, S. 1333). In diesem Fall wendet man daher mit Vorteil eine erzwungene Kommutierung unter Anordnung einer Kompensationswicklung (392) oder von Wendepolen (393) an, die vom Ankerstrom oder einem ihm proportionalen Strom durchflossen oder erregt werden. Das Feld dieser Vorrichtungen muß dem des Ankers entgegengesetzt gerichtet sein und es um eine bestimmte Größe übertreffen; zur Abgleichung kann man parallel zur Wicklung einen Regulierwiderstand schalten. Bei Reihenschaltung der Ankerwicklung ist es nicht nötig, überall zwischen je zwei Hauptpolen einen Wendepol anzuordnen; auch ist es nicht nötig, ihnen axial dieselbe Länge wie dem Anker zu geben. Besondere Aufmerksamkeit ist der richtigen Schaltung der Kompensationswicklung und der Wicklung der Wendepole zu schenken. Bei der Anwendung von Wendepolen kann der Magnetismus der Maschinen unter Umständen ins Schwingen kommen (vgl. K. W. Wagner, ETZ 1907, S. 286 ff.).

Wendepole oder Kompensationswicklungen werden auch bei den Schnellläufern, insbesondere bei den Turbodynamos, allgemein angewendet, ferner bei Maschinen mit geschwächter Erregung und solchen für sehr starke Ströme bei niedrigen Spannungen. Die EMK der Induktion e_s kann dann bis zu 15 V und mehr betragen. Beide Anordnungen ermöglichen eine einwandfreie Kommutierung auch unter den schwersten Bedingungen, nämlich Entnahme des vollen Ankerstromes bei schwach oder gar nicht erregten Feldmagneten.

(404) Kommutierung bei Wechselstrom. Fließt in den Ankerabteilungen zwischen je zwei Bürsten Wechselstrom, so ist dessen Schwingungsdauer im all-

gemeinen, jedenfalls bis zu einer Frequenz von 50 Per/s im Vergleich mit der Kurzschlußdauer der Kommutierung so groß, daß man während dieser Dauer den Ankerstrom als konstant ansehen kann. Es ändert sich daher prinzipiell nichts an der Kommutierung. Doch ist zunächst zu beachten, daß bei gleichen effektiven Mittelwerten der Maximalwert der Stromstärke bei Wechselstrom — sinusartiger Verlauf vorausgesetzt — um etwa 41 % höher ist als bei Gleichstrom, so daß hierdurch die Kommutierung schwieriger wird. Außerdem entsteht dadurch, daß das magnetische Hauptfeld wechselt, eine neue EMK, nämlich die der Transformation, in den kurzgeschlossenen Windungen, die man durch geeignete Vorkehrungen unschädlich zu machen sucht. Dies gelingt indessen nur, wenn der Motor läuft. Die neueren Motoren zeigen daher bei normaler Geschwindigkeit kein Feuer an den Bürsten; doch ist es bisher noch nicht gelungen, das Feuer beim Anlauf völlig zu beseitigen. Näheres hierüber siehe (565).

(405) Mechanische Bedingungen für gute Kommutierung. Der Kommutator muß vollkommen rund laufen, die Bürsten müssen mit mäßigem Druck aufliegen und dürfen nicht zittern. Es kommt vor, daß sich das Kupfer der Lamellen stärker abnutzt als die Glimmerzwischenlagen; der Glimmer tritt dann hervor und verhindert die innige Berührung zwischen den Kupferlamellen und den Bürsten. Es tritt daher Feuer auf, das zu einer unzulässigen Erwärmung des Kommutators führt. Harte Kohlen schleifen den Glimmer besser ab als weiche. Es ist ferner nötig, daß die Kommutatorteilung und die Polschuhform mit mathematischer Genauigkeit ausgeführt sind, und der Anker zentrisch läuft. Die Dicke der Isolation zwischen zwei Lamellen soll gegenüber der Breite der Lamellen selbst klein (etwa 0,7—0,9 mm), der Übergangswiderstand zwischen Bürsten und Kommutator auf der ganzen Auflagefläche konstant sein. Die Ankerspulen sollen möglichst gleichartig in die Ankernten eingebettet sein.

Literatur. Kommutierung, Äquipotentialverbindungen, Kohlenbürsten:

1. Aufsätze (in der ETZ u. anderen Zeitschr.) von Arnold, Fischer-Hinnen, Lisca, Menges, Mie, Niethammer, Pichelmayer, Punga, Riebesell, Rotherth, Rüdénberg, Sumec.

2. Lehrbücher: Arnold, Die Gleichstrommaschine. — Pichelmayer, Dynamobau (Handbuch d. Elektrotechnik) 1908.

3. Monographien: Kahn, Der Übergangswiderstand der Kohlenbürsten. Voitsche Samml. 1902. — Pohl, Über die Wirkungen der Kurzschlußströme in Gleichstrom-Ankern. Voitsche Samml. 1905. — Punga, Das Funken der Kommutatormotoren. Hannover 1905. — Railing, Über Kommutierungsvorgänge und zusätzliche Bürstenverluste. Voitsche Samml. 1903. — Rüdénberg, Theorie der Kommutation der Gleichstrommaschinen. Voitsche Samml. 1907 (ausführlicher Literaturnachweis). — Waldmann, Beiträge zum Kommutierungsproblem. Diss. München 1907.

Wendepole und Kompensationswicklungen.

Aufsätze (in der ETZ und andern Zeitschr.) von Arnold, Breslauer, Dettmar, Eichberg, Jonas, Menges, Oelschläger, Pelikan, Pfiffner, Pohl, Richter, Rotherth, Schulz, Siebert. — Monographie von Rüdénberg, Theorie der Kommutation der Gleichstrommaschinen. Voitsche Samml. 1907.

(406) Elektromotorische Kraft der Kommutatormaschinen. In einer in einem magnetischen Felde von veränderlicher Stärke umlaufenden Schleife wird die EMK

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{\partial\Phi}{\partial t} - \frac{\partial\Phi}{\partial\vartheta} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad \text{CGS} \quad (1)$$

induziert, wenn ϑ den Winkel in elektrischem Maß bedeutet, den die Normale der Windung mit einer festen Anfangsrichtung einschließt. Der erste Summand ist die EMK der Ruhe, der zweite die EMK der Bewegung. Wenn $d\omega$ Windungen auf den Winkel $d\vartheta$ entfallen, ist angenähert für einen zwischen ϑ_1 und ϑ_2 liegenden Wicklungsteil die EMK der Ruhe

$$e' = - \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{\partial\Phi}{\partial t} \frac{d\omega}{d\vartheta} d\vartheta \quad \text{CGS} \quad (2)$$

und die EMK der Bewegung

$$e'' = - \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{\partial \Phi}{\partial \vartheta} \frac{d \vartheta}{dt} \frac{d w}{d \vartheta} d \vartheta \quad \text{CGS} \quad (3)$$

Mit

$$\frac{d \vartheta}{dt} = p \frac{2 \pi n}{60} \quad \text{und} \quad \frac{d w}{d \vartheta} = \frac{w_{\tau}}{\tau} = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{w_{ges}}{2 a}$$

worin p die Zahl der Polpaare, τ die Polteilung, w_{τ} die Zahl der Windungen, die durchlaufen werden müssen, um von einem Umkehrpunkt der EMK zum nächsten, d. h. von einer Bürste zur nächsten zu gelangen, w_{ges} die gesamte Windungszahl auf dem Anker und $2a$ die Zahl der parallel geschalteten Zweige der Wicklung (375) bedeutet, erhält man, da τ in elektrischem Maß gleich π zu setzen ist,

$$e' = - \frac{w_{ges}}{2 \pi a} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{\partial \Phi}{\partial t} d \vartheta \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad (4)$$

und

$$e'' = - \frac{n}{60} \frac{p}{a} w_{ges} (\Phi'' - \Phi') \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad (5)$$

In Gl. (4) muß die Verteilung des Induktionsflusses über den Ankerumfang bekannt sein, wenn man das Integral auswerten will. Aus Gl. (5) geht hervor, daß e'' nur von den Induktionsflüssen abhängt, die von den zu den beiden Winkeln ϑ_1 und ϑ_2 gehörenden Endwindungen umschlossen werden. Aus (5) folgt unmittelbar, daß e'' dieselbe Frequenz wie Φ' und Φ'' haben muß, und in (4) wird die Frequenz weder durch die Differentiation nach t noch durch die Integration nach ϑ geändert. Daraus folgt:

1. Die EMK der Ruhe ist von der Verteilung des Induktionsflusses über den Ankerumfang abhängig, die EMK der Bewegung von dieser Verteilung unabhängig.

2. Der Kommutator macht die Frequenz der in einem zwischen festen Bürsten eingeschlossenen Wicklungsteile induzierten EMKe von der Drehgeschwindigkeit unabhängig.

Führt man die Stabzahl auf dem Anker $z_{ges} = 2w_{ges}$ ein und nimmt man an, daß $\Phi'' = -\Phi' = -\Phi$ sei, so geht Gl. (5) in die meist benutzte Gleichung

$$e'' = \frac{n}{60} \frac{p}{a} z_{ges} \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad (6)$$

über.

(407) Drehmoment der Kommutatormaschinen. Nimmt man an, die Bürstenständen um eine Polteilung τ voneinander entfernt, so ist die Leistungsbilanz, wenn M das Drehmoment in $\text{kg}^* \text{m}$ bedeutet,

$$9,81 \cdot \frac{2 \pi n}{60} M + e'' i_{ges} = 0 \quad (7)$$

Setzt man den Wert für e'' aus (6) ein, so erhält man für das negative Drehmoment

$$M = \frac{1}{\pi} \frac{10^{-8}}{9,81} \cdot \frac{p}{a} w_{ges} i_{ges} \Phi = \frac{1}{2 \pi} \frac{10^{-8}}{9,81} \cdot \frac{p}{a} z_{ges} i_{ges} \Phi \text{ kg}^* \text{m} \quad (8)$$

Bei Wechselstrommaschinen sind unter M , i_{ges} und Φ die Augenblickswerte zu verstehen. i_{ges} ist in A auszudrücken, Φ ist der Induktionsfluß eines Poles.

(408) Verluste und Wirkungsgrad. Beim Betrieb einer Dynamomaschine entstehen folgende Verluste:

- A. Reibungsverluste.
 1. durch Lagerreibung¹⁾,
 2. durch Luftreibung und beabsichtigte Ventilation,
 3. durch Reibung der Bürsten auf dem Kommutator oder den Schleifringen, vgl. (382).
 4. durch schnelle Schwingungen.
- B. Verluste in den Feldmagneten.
 5. durch Wirbelströme im Eisen der Polschuhe,
 6. durch Stromwärme in der Erregerwicklung,
 7. durch Stromwärme im Regulierwiderstand.
- C. Verluste im Anker.
 8. durch Hysterese und Wirbelströme im Ankereisen,
 9. durch Stromwärme des Ankerstromes,
 10. durch Stromverdrängung²⁾ in der Kupferwicklung.
- D. Verluste an den Stromabnahmestellen.
 11. durch den Übergangswiderstand zwischen den Bürsten und dem Kommutator oder den Schleifringen,
 12. durch Stromwärme des Nutzstromes,
 13. durch Wirbelströme in den Lamellen.

Die unter A. genannten Verluste sind von der Belastung der Maschine wenig abhängig, ebenso bei konstanter Spannung die unter B und C 8 genannten; will man daher auch bei geringer Last guten Wirkungsgrad erzielen, so hat man diese Verluste auf ein Mindestmaß herabzudrücken. Dies ist namentlich für Dauerbetriebe mit geringer oder schwankender Belastung wichtig. Bei aussetzenden Betrieben kommt es meist mehr auf Billigkeit und geringes Trägheitsmoment der Maschinen an; dabei sind größere „Leerlaufverluste“ zulässig.

Der Reibungskoeffizient des Zapfens ist nach Dettmar proportional mit der Quadratwurzel aus der Umfangsgeschwindigkeit, umgekehrt proportional mit dem Druck, wenn dieser kleiner als etwa 40 kg/cm² ist, und mit der Temperatur des Zapfens.

Die Verluste durch Hysterese und Wirbelströme im Anker wachsen mit der Belastung, weil die Ankerrückwirkung die maximale magnetische Induktion in den Zähnen vergrößert, vgl. Abb. 188, (389). Es entstehen daher bei Belastung zusätzliche Verluste, die schwer zu bestimmen sind. Bei konstanter Spannung sind sie in derselben Maschine geringer, wenn sie als Motor, größer, wenn sie als Generator arbeitet, weil die EMK im Motor um den Spannungsverlust geringer, im Generator größer ist, als die Spannung. Die Maschinenregeln d. VDE (§ 63) nehmen sie zu 1/2 bis 1 % an.

Stromverdrängung. Bei ungleichförmiger Verteilung des Stromes über den Leiterquerschnitt ist die Stromwärmeleistung größer als bei gleichförmiger Verteilung. Bei großen Querschnitten können dadurch sehr bedeutende zusätzliche Verluste entstehen. Wenn die Wicklung in Nuten untergebracht ist, sind die Verluste durch Stromverdrängung geringer, als wenn sie auf einem glatten Anker liegt. Bei starker Zahnsättigung ist aber auch in den Nuten ein nicht unbedeutendes magnetisches Feld vorhanden, durch das Stromverdrängung

¹⁾ Tower, Zeitschr. d. V. D. I. 1885, S. 839. — Dettmar, ETZ 1899, S. 380. — Stribeck, Zeitschr. d. V. D. I. 1902, S. 1341. — Lasche, Zeitschr. d. V. D. I. 1902, S. 1881.

²⁾ Literatur: Field, Proc. Am. Inst. El. Eng. 1905, S. 659; ETZ 1905, S. 1038. — Sommerfeld, Ann. d. Physik, 1904, Bd. 15, S. 673. — Emde, El. u. M. 1908, S. 703. — Rogowski, Arch. El. Bd. 2, S. 81, 703. — Richter, Arch. El. Bd. 2, S. 518; Bd. 3, S. 175; Bd. 4, S. 1; Bd. 5, S. 1, 335. — Hillebrand, Arch. El. Bd. 3, S. 111. — Dreyfus, El. u. Maschb. 1914, S. 281; Arch. El. Bd. 3, S. 273; Bd. 4, S. 42. — Niethammer, El. u. Maschb. 1916, S. 113; 1917, S. 17. — Fischer-Hinnen, Bull. Schw. El. Ver. 1917, S. 101; ETZ 1917, S. 488. — Rickli, El. u. Maschb. 1917, S. 249.

entsteht. Mittel zur Verhütung sind Wahl geeigneter Nutenabmessungen, Anwendung von Kupferlitze anstatt massiver Leiter und Verschränkung der innerhalb einer und derselben Nut liegenden parallelgeschalteten Einzelleiter, z. B. durch Verschränkung zweier paralleler Litzen im Wickelkopf. Vgl. El. u. Maschb. 1921, S. 475; ETZ 1922, S. 315.

Mit Hilfe der Verlustbestimmung ergibt sich die Bilanz der Dynamomaschine

$$\text{Verbrauch} = \text{Leistung} + \text{Verluste}$$

und der Wirkungsgrad für irgendeinen Arbeitszustand

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{wiedergewonnene Leistung}}{\text{aufgewendete Leistung}} = \frac{\text{Abgabe}}{\text{Aufnahme}}$$

wobei natürlich Zähler und Nenner in demselben Maß, z. B. beide in kW, auszu-drücken sind.

Der Wirkungsgrad bezieht sich nach der Definition auf die Leistung, d. h. auf einen momentanen Arbeitszustand; im Betrieb interessiert oft mehr das Verhältnis des in einer bestimmten Zeit eingetretenen Arbeitsverbrauches in kWh zu der in der gleichen Zeit abgegebenen Arbeit in kWh. Vgl. hierüber (337).

Der Wirkungsgrad ist bei großen Maschinen höher als bei kleinen, bei großer Umfangsgeschwindigkeit höher als bei geringer; bei ganz kleinen Maschinen von etwa 0,1 kW beträgt er etwa 60%, bei ganz großen bis zu 94%. Weitere Anhaltspunkte für mittelgroße Gleichstrommaschinen gibt folgende Tabelle:

Leistung in kW	Umdrehungen in der Minute			
	1800	1200	600	300
1	76	74	70	64
5	82	81	79	68
10	86	85	84	80
50	89	89	89	87
100	91	91	91	90

Wegen Bestimmung des Wirkungsgrades siehe Maschinenregel d. VDE § 53 ff und (267).

Entwurf der Maschinen.

(409) **Ausnutzungsgrad.**¹⁾ Die Leistung der Maschinen kann angenähert aus der Formel von Snell und Esson

$$N = C \cdot d^2 l n \cdot 10^{-6} \text{ kW} \quad (1)$$

bestimmt werden, worin C den „Ausnutzungsgrad“, d den Durchmesser in cm, l die „wirksame Länge“ des Ankers, d. h. die Länge des Eisenblechkerns nach Abzug der von den Lüftungsschlitz beanspruchten Teile in cm, n die Drehzahl in U/min bedeutet. Die Formel geht aus der Überlegung hervor, daß die Leistung der wirksamen Oberfläche und der Umfangsgeschwindigkeit des Ankers proportional gesetzt werden kann. Der Ausnutzungsgrad C liegt bei Kupferwicklung im allgemeinen zwischen 1 und 4, bei sehr kleinen Maschinen unter 1 kW sowie bei geringer Lüftung unter 1 und erreicht bei sehr großen Werte bis 6,5. Er ist um so höher, je größer die Leistung, je stärker die Lüftung und im Zusammenhange damit, je geringer das Verhältnis der Länge des Ankers zu seinem Durchmesser, ferner je größer die zugelassene Ankerrückwirkung und je besser die Kommutierung ist. Mittlere Zahlen für C sind bei Kupferwicklung 1,5,

¹⁾ Behn-Eschenburg, Charak. u. mech. Eigenschaften mod. Gen. ETZ 1912, S. 592. — Závada, Die Leistungskonstante elektr. Masch. E. u. M. 1916. S. 125. — Reichel, Vorläufige Grenzen im Elektromaschinenbau, Z. d. V. d. I. 1920. S. 543, 1921. S. 911. — Emdé, Leistungsparameter, Größenparameter u. mittl. Dreh Schub bei elektr. Masch. ETZ 1922. S. 1430.

wenn l/d groß ist, bis 2,5, wenn l/d klein ist. Bei mittelgroßen Turbodynamos ($d \approx l$) liegt C zwischen 1,25 und 1,75, bei Drehstromturbodynamos findet man Werte bis 2,5. Bei Aluminium, dessen Widerstand etwa das $\sqrt{3}$ -fache von dem des Kupfers ist, verringert sich der Ausnutzungsgrad bei gleichem Wickelraum und gleicher Stromwärmeleistung, vgl. (306, Gl. 7), im Verhältnis $1:\sqrt{1/\sqrt{3}}=1:0,76$. Da dann aber auch die Ankerrückwirkung zurückgeht und die Kommutierung günstiger wird, kann man die Leistung darüber hinaus bis auf etwa 0,85 von der bei Kupferwicklung steigern. Die linearen Abmessungen der Aluminiummaschinen sind um etwa 6 Hundertstel größer zu wählen, die Maschinen werden daher etwas schwerer.

Schreibt man Gl. (1) in der Form

$$N = C \cdot d^2 l n \cdot 10^{-3} \text{ Watt}$$

und führt man für N den Wert

$$N = 9,81 \cdot \frac{2\pi n}{60} \cdot P \frac{d}{2} \cdot 10^{-2} \text{ Watt}$$

ein, worin P die an der Ankeroberfläche tangential angreifende Kraft in kg^* ist, so erhält man, wenn man noch die Ankeroberfläche $F = d\pi l$ einführt

$$\sigma = \frac{P}{F} = \frac{6}{9,81 \pi^2} \cdot C = 0,0620 \cdot C \cdot \frac{\text{kg}^*}{\text{cm}^2}$$

Der Ausnutzungsgrad C ist also der mittleren Drehschubspannung σ proportional (E m d e, ETZ 1922, S. 1430).

(410) Strombelag. Man kann auch den Strombelag α einführen. Er ist bei Gleichstrom

$$\alpha = \frac{z_{ges} I_a}{\pi d} \frac{\text{Amp.-Stäbe}}{\text{cm}} = \frac{z_{ges} I_a}{10 \pi d} \text{ CGS}$$

worin z_{ges} die gesamte Zahl der Ankerdrähte auf dem Anker, I_a die in ihnen fließende Stromstärke in Ampere ist. Die aus Drehmoment M und Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi n/60$ berechnete Leistung ist dann

$$N = \omega M = \frac{2\pi n}{60} \cdot 2p\beta \frac{\alpha}{10} \cdot \mathfrak{B} l \cdot \frac{d}{2} = \frac{2\pi}{60} p\beta \alpha \mathfrak{B} l d n 10^{-1} \text{ Erg/s}$$

worin p die Zahl der Polpaare, β den Polschubbogen in cm bedeutet, M in Dyn cm und α in Amp.-Stäben/cm gemessen wird. Man kann β etwa gleich zwei Drittel der Polteilung $\tau = \pi d/2p$ setzen und erhält damit

$$N = \frac{2\pi^2}{3 \cdot 60} \alpha \mathfrak{B} \cdot d^2 l n \cdot 10^{-11} \text{ Kilowatt} = 1,1 \alpha \mathfrak{B} \cdot d^2 l n \cdot 10^{-12} \text{ Kilowatt} \quad (2)$$

Der Vergleich von (1) mit (2) ergibt

$$C = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \mathfrak{B} \quad \text{oder} \quad \alpha = 9,1 \cdot 10^5 \cdot C/\mathfrak{B}$$

Bei Drehstrommaschinen ergibt dieselbe Überlegung einen um 5% geringeren Wert für α . Man kann also rund $\alpha = 9 \cdot 10^5 C/\mathfrak{B}$ annehmen.

Der Strombelag liegt demnach bei Kupferwicklung zwischen 113 und 450 Ampere-Stäben/cm, wenn man $\mathfrak{B} = 8000$ Gauß annimmt. Bei Turbodynamos ist $C \approx 1,5$, \mathfrak{B} aber nur etwa gleich 5000 Gauß, für den Strombelag ergibt sich daraus etwa die Zahl 275. Bei Aluminiumwicklung ist der Strombelag um etwa 15 Hundertstel geringer als bei Kupferwicklung.

Ist die Leistung gegeben, so hat man daher noch zwischen Durchmesser, Länge und Drehzahl abzuwägen. In vielen Fällen wird auch die Drehzahl vorgeschrieben sein. Eine Maschine von gegebener Leistung muß bei direkter Kupplung mit einer Kolbenmaschine langsam, bei direkter Kupplung mit einer Dampfturbine

sehr schnell laufen, während man bei Riemen- und Seiltrieb eine mittlere Drehzahl wählen wird. Je höher die Drehzahl gewählt wird, um so kleiner fallen die Abmessungen der Maschine aus, allerdings nur solange, wie die Stromabnahme nicht besonders große Abmessungen des Kommutators bedingt. Die wirksame Ankerlänge l wird am besten so gewählt, daß der Querschnitt der Feldmagnete etwa quadratisch oder kreisförmig wird.

(411) Umfangsgeschwindigkeit. Der Anker normaler Maschinen besitzt eine Umfangsgeschwindigkeit von 10—30 m/s. Bei ganz kleinen Maschinen (unter 1 kW) und bei sehr langsam laufenden großen liegt die Umfangsgeschwindigkeit unter 10, bei Gleichstrommaschinen ohne Wendepole zwischen 12 und 18 m/s. Bei Wechselstrommaschinen fällt im allgemeinen die Rücksicht auf die Kommutierung weg, ihre mittlere Geschwindigkeit liegt daher höher, nämlich zwischen 15 und 30 m/s.

Als Schnellläufer kommen besonders Maschinen für große Leistungen von etwa 500—20 000 kW und Drehzahlen von 3000 bis 300 in Betracht. Die größte Leistung einer einzigen Maschine ist zurzeit etwa 50 000 kW. Die Umfangsgeschwindigkeit des Läufers beträgt 30—120 m/s, bei Wechselstrom liegt sie wieder höher als bei Gleichstrom. Häufig findet man 60—80 m/s. Mit Rücksicht auf die Fliehkraft sind Eisenkörper und Wicklung des Läufers besonders sorgfältig zu konstruieren. Die Maschinen erhalten eine bedeutende Länge, daher ist die Lüftung und die Abkühlung erschwert. Gleichstromturbomaschinen werden nur mit Wendepolen oder Kompensationswicklung oder mit beiden zugleich gebaut.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Kommutatoren liegt bei normalen Maschinen ohne Wendepole zwischen 5 und 14 m/s, im Mittel bei 8—9 m/s, bei Bahnmotoren, auch wenn sie Wendepole haben, ebenso hoch, bei normalen Maschinen mit Wendepolen zwischen 15 und 22 m/s, im Mittel bei 17—19 m/s; bei Umformern steigt sie bis zu 30 m/s ohne Wendepole, bei Turbodynamos mit Wendepolen bis zu 35 m/s, bei Wechselstromkommutatormaschinen liegt sie zwischen 8 und 15 m/s.

Schleifringe macht man, wenn keine Kurzschliebung vorhanden ist, so klein wie möglich, sonst ist ihr Durchmesser ziemlich beliebig. Bei kleinen Durchmessern beträgt die Umfangsgeschwindigkeit 5 bis 15 m/s. Starke Wellen machen großen Durchmesser nötig, die Geschwindigkeit steigt dann bis auf 35 m/s. Bei Unipolarmaschinen geht man noch höher.

(412) Polzahl und Frequenz. Die Polzahl $2p$ ist bei Wechselstrommaschinen durch die Frequenz und die Drehzahl bestimmt. Bei Synchronmaschinen besteht die Beziehung $p = 60f/n$, wenn f die Frequenz in Per/s ist. Bei Gleichstrom bleibt für die Wahl der Polzahl noch ein gewisser Spielraum, weil für die Ankerströme keine bestimmte Frequenz vorgeschrieben ist; sie wird daher verschieden ausfallen je nach der Polzahl der Maschine. Bei Wahl einer zu geringen Polzahl wird die Maschine schwer (schweres Joch), die Ankerrückwirkung groß und die Kommutierung schwierig. Wechselstrommaschinen werden bei 25 Per/s schwerer als bei 50 Per/s. Bei Gleichstrommaschinen ist zu beachten, daß, je größer die Polzahl, um so höher auch die Frequenz ist, und um so größer die Eisenverluste in den Zähnen werden. Bei Wahl einer größeren Zahl von Polen ist darauf zu sehen, daß der Abstand der Bürstenbolzen voneinander und die Zahl der Kommutator-teile nicht zu klein werden. Die neuere Praxis arbeitet mit größeren Polzahlen, als es früher üblich war; man wählt bei den üblichen Drehzahlen vierpolige Maschinen bereits bei Leistungen von etwa 5 kW, sechspolige bei etwa 20 kW usw. Sehr schnell laufende Maschinen für große Leistungen (Turbogeneratoren) werden mit einer geringen Zahl Pole ausgeführt.

Die Frequenz der Ankerströme von Gleichstrommaschinen kann, wenn nicht besondere Verhältnisse vorliegen, etwa zu 25 Per/s angenommen werden, sie schwankt aber in weiten Grenzen, etwa zwischen 10 und 80 Per/s. In einer Typen-

reihe muß bei fortschreitenden Größen entweder in den Drehzahlen oder in den Frequenzen ein Sprung eintreten.

(413) Magnetische Induktion. Die Ankerzähne werden so bemessen, daß in den jeweilig unter den Polen stehenden Zähnen eine magnetische Induktion von 20 bis 24 000 Gauß entsteht. In der Luft beträgt die Induktion dann je nach dem Verhältnis von Zahnbreite zu Nutenbreite etwa 8 bis 9000 Gauß. In den Feldmagneten geht man bei Schmiedeeisen und Stahlguß unter Berücksichtigung der Streuung nicht über 14 000 bis 16 000 Gauß, während endlich Gußeisen im allgemeinen mit höchstens 8 bis 9000 Gauß belastet wird.

Turbodynamos haben etwa 5000 Gauß im Luftspalt, Gleichstromturbodynamos erhalten daher Fremderregung, vgl. (425). Der Anker der Erregermaschine sitzt in der Regel unmittelbar auf der verlängerten Welle der Hauptmaschine.

Da Gleichstrommaschinen in der Regel als Außenpolmaschinen ausgeführt werden, so ergibt sich bei kleinen Ankerdurchmessern eine beträchtliche Abnahme des Zahnquerschnittes nach dem Kranz zu. Man muß dann, da die Induktion meist sehr hoch ist, bei der Berechnung der Durchflutung der Veränderlichkeit des Querschnittes Rechnung tragen, was am besten durch Zerlegung der Zähne in Schichten und Bestimmung der mittleren Dichte für jede Schicht geschehen kann.

Sobald die Induktion in den Zähnen über 20 000 getrieben wird, kann der Teil des Induktionsflusses, der durch die Nuten und Ventilationschlitzte geht, nicht mehr vernachlässigt werden.

(414) Spannungen. Man wählt bei Anlagen mit Primärtransformatoren die Spannung der Wechselstromgeneratoren möglichst so, daß man Stabwicklung anwenden kann. Dies führt bei großen Maschinen zu Spannungen von 5 bis 8 kV.

Bei Kommutatormaschinen darf die mittlere Spannung zwischen zwei einander benachbarten Kommutatorteilchen, wenn keine Kompensationswicklung vorhanden ist, bis zu 15 Volt, wenn eine solche vorhanden ist, bis zu 24 Volt betragen. Über 3000 Volt sind Gleichstrommaschinen selten gebaut worden, einzeln für 5, 10 und sogar 20 kV. Vgl. Linke, ETZ 1915, S. 549. Kade, ETZ 1922, S. 104.

(415) Normalform der Dynamomaschine. Als Normalform ist die Form anzusehen, bei der die Polschäfte kreisrunden oder quadratischen Querschnitt und daher auch die Polschuhe angenähert quadratischen Querschnitt besitzen. Es wird dann die Polschuhbreite β gleich der Ankerlänge l und aus

$$l = \beta \approx \frac{2}{3} \frac{\pi d}{2p} \quad \text{erhält man} \quad l \approx \frac{d}{p}$$

Führt man diesen Wert für l in (409) Gl. (1) ein, und ersetzt man d und n aus den Gleichungen $f = pn/60$ und $v = \pi dn/60$ cm/s, so erhält man

$$N = C \cdot \frac{60 \cdot v_1^3}{\pi^3 f^2} p \approx 2C \frac{v_1^3}{f^2} p \quad \text{Kilowatt,} \quad (v_1 \text{ in m/s})$$

woraus

$$p = \frac{1}{2C} \frac{N f^2}{v_1^3}$$

folgt. Hieraus kann man die Polpaarzahl der Gleichstrommaschine angenähert bestimmen. Setzt man z. B. $C=1$, $f=25$ Per/s, $v_1=10$ m/s, $p=1$, so ergibt sich $N=3,2$ kW. Über diese Leistung hinaus werden meistens schon vier Pole ($p=2$) gewählt. Ist bei der Umfangsgeschwindigkeit, bis zu der man gehen will, die vorgeschriebene Leistung mit der Normalform nicht zu erreichen, so muß man zu größeren Ankerlängen schreiten. Häufig führt man bei einer Typenreihe mit Rücksicht auf die Fabrikation die Maschinen mit mehreren Ankerlängen bei gleichem Durchmesser aus, um an Blechschnitten und Modellen für die Gußteile zu sparen.

(416) **Lüftung.** Zur Kühlung der Maschinen werden häufig Flügel oder Ventilatoren eingebaut, die die Kühlluft auf genau vorgeschriebenen Wegen durch die Maschine treiben (vgl. Abb. 300, 301, 310, 313, 316, 338). Sie sind besonders dann erforderlich, wenn die Luft parallel zur Achse der Maschine durch Anker und Feldmagnete strömen soll, ferner bei geschlossenen Maschinen. Die Luft wird meistens durch Luftfilter gereinigt, bevor sie in die Maschine eintritt. Die Filter bestehen entweder aus hin- und hergespanntem Baumwolltuch oder aus kleinen mit einer öligen Flüssigkeit überzogenen Hohlzylindern (Raschigs Ringen), die regellos zwischen zwei 80 bis 100 mm voneinander entfernte Gitterwände geschüttet werden, oder aus mehreren hintereinander gestellten wasserberieselten Jalousien aus senkrecht gestellten Holzlatten. Die warme Luft kann im Winter zur Heizung des Maschinenraumes dienen, während sie im Sommer am besten durch einen besonderen Kanal ins Freie geführt wird. (Über Luftfilter vgl. ETZ 1914, S. 533, Prospekte d. Deutschen Luftfilter-Baugesellschaft m. b. H. Berlin und Dr. F. Raschig, Ludwigshafen a. Rh. Helios, Exportzeitschr. f. Elektrotechnik 1921. S. 227f.)

Gleichstromdynamos.

(417) **Unipolarmaschinen** (W. Siemens)¹⁾. Vollkommenen Gleichstrom liefern die Unipolarmaschinen. Dies sind Induktoren, bei denen sich die Stromleiter dauernd in einem homogenen Felde, gleichsam nur der Wirkung eines Poles ausgesetzt, bewegen (113,3). Damit hierbei Ströme auftreten können, müssen Anfang und Ende jedes Leiters an Schleifringe angeschlossen sein; denn es tritt nur dann eine Änderung des den gesamten Stromkreis durchsetzenden Induktionsflusses ein, wenn ein Teil des Stromkreises fest, der andere beweglich ist. Eine dauernde Bewegung eines Teiles des Stromkreises ist aber nur bei Verwendung von Schleifringen möglich. Aus demselben Grunde ist eine Hintereinanderschaltung der Stromleiter nur durch Vermittlung von Schleifringen möglich (Kirchhoff).

Jede Unipolarmaschine muß daher mindestens zwei Schleifringe haben. Zwischen diesen können beliebig viele, gleichmäßig über die Peripherie eines Eisenzylinders verteilte, stabförmige Leiter oder auch ein Kupferzylinder geschaltet werden.

Abb. 197 zeigt die einfachste Anordnung einer solchen Maschine. Konzentrisch zu dem ruhenden Stabmagnet NS sind zwei Schleifringe R_1, R_2 , der eine am Ende, der andere um die Mitte des Magnets angebracht.

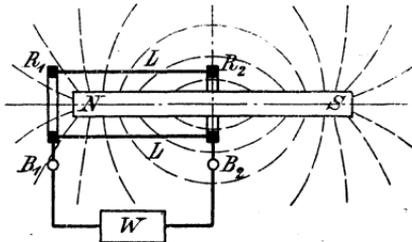


Abb. 197. Unipolare Induktion.

Die Ringe sind durch die Leiter LL miteinander verbunden. Sie bilden den beweglichen, der äußere Stromkreis B_1WB_2 den ruhenden Teil des ganzen Stromkreises.

Solche Maschinen sind bei Anwendung einer genügenden Anzahl Bürsten für sehr starke Ströme bei niedrigen Spannungen geeignet. Sollen mehrere Gruppen von Leitern, die untereinander parallel geschaltet sind, hintereinander geschaltet werden, so ist für jede Gruppe ein Paar Schleifringe erforderlich. Bei hohen Drehzahlen sind solche Maschinen auch zur Erzeugung höherer Spannungen geeignet. So hat die Gen. E. I. Co. nach dem Entwurf von Noeggerath Turbodynamos von 50 bis 5000 kW bei Spannungen von 6 bis 600 V, Stromstärken von 800 bis

¹⁾ Ugrimoff, Die unipolare Gleichstrommaschine. Diss. Karlsruhe 1910. — Feldmann — Azyklische Maschine von Noeggerath, ETZ 1905, S. 807; ETZ 1914, S. 718; Journ. Inst. El. Eng. Bd. 49, S. 804.

8000 A und Geschwindigkeiten von 900 bis 3000 U/min gebaut, und zwar die Maschinen für höhere Spannungen mit 12 Paar Schleifringen aus Bronze oder Stahl, die mit Umfangsgeschwindigkeiten bis zu 45 m/s laufen. Die Bürsten bestehen aus dünnen Metallblättern und werden mit Graphit geschmiert. Die Anordnung ist schematisch durch Abb. 198 dargestellt (vgl. auch El. Bahn. u. Betr. 1905, S. 233 und ETZ 1905, S. 831). Bei *AA* sind Öffnungen zur Anordnung der Bürsten und zur Herausführung der Zu- und Ableitungen zu der festen Wicklung *B* vorgesehen. Die Maschine wird durch zwei konzentrisch zur Welle gelagerte Spulen *SS* so erregt, daß der Induktionsfluß auf der ganzen zylindrischen Oberfläche des Läufers dieselbe radiale Richtung und Dichte besitzt. Die Wicklung besteht aus Flachkupferstäben auf der Oberfläche des Läufers, die in regelmäßiger Verteilung an die Schleifringe angeschlossen sind, nämlich Stab 1 an Schleifringe I, I, Stab 2 an Schleifringe II, II, Stab 3 an Schleifringe III, III usw. in mehrfacher Wiederholung. Auch die Zahl und die Verteilung der Bürsten ist wichtig, da die starken Ströme, die in den Schleifringen fließen, beträchtliche magnetische Felder erzeugen.

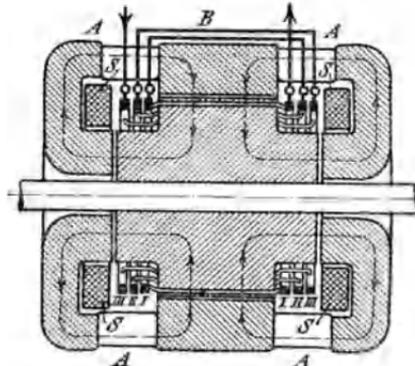


Abb. 198. Unipolarmaschine.

Der Wirkungsgrad und die Ankerrückwirkung sind annähernd ebenso groß wie bei Kommutatormaschinen. Der Vorzug der Unipolarmaschinen besteht in ihrer einfachen Konstruktion, ihr Nachteil in der großen Reibung und der starken Abnutzung der Bürsten.

Der Wirkungsgrad und die Ankerrückwirkung sind annähernd ebenso groß wie bei Kommutatormaschinen. Der Vorzug der Unipolarmaschinen besteht in ihrer einfachen Konstruktion, ihr Nachteil in der großen Reibung und der starken Abnutzung der Bürsten.

(418) Kommutatormaschinen. Die übliche Ankerwicklung ist die geschlossene Wicklung mit Kommutator. Bei einem konstanten, sonst aber beliebigen Felde unter den Polen ist die Summe der EMKe in den Drähten, die sich unter den Polen befinden, wesentlich konstant. Schwankungen der EMK werden daher besonders durch die Drähte oder bei Nutenankern durch die Zähne hervorgerufen, die in den Bereich der Pole eintreten oder aus ihm austreten. Sie werden daher um so geringer sein, je mehr Drähte unter den Polen liegen, und je weniger Windungen eine Spule enthält. Um bei Nutenankern die Konstanz des Feldes zu sichern, vermeide man Nutenzahlen, die durch die Polzahl teilbar sind.

(419) Hauptgleichungen. Die elektromotorische Kraft ist nach (406) bei einer mehrpoligen Maschine gleich

$$E = \frac{n}{60} \cdot \frac{p}{a} \cdot z_{ges} \Phi_a \cdot 10^{-8} \text{ Volt,} \quad (1)$$

worin p die Polpaarzahl, $2a$ die Zahl der parallel geschalteten Ankerzweige (vgl. 375) z_{ges} die gesamte Stabzahl, Φ_a der Induktionsfluß eines Poles ist. Bei einer zweipoligen Maschine ist $p = 1$ und a im allgemeinen $= 1$, daher

$$E = \frac{n}{60} \cdot z_{ges} \Phi_a \cdot 10^{-8} \text{ Volt.} \quad (2)$$

Die EMK ist unabhängig von der Verteilung des Induktionsflusses über die Polfläche. Schwankungen in der Höhe der EMK entstehen dadurch, daß bald mehr, bald weniger Stäbe unter einem Pole liegen, ferner dann, wenn sich infolge

der Nutung der Widerstand des magnetischen Kreises periodisch ändert. Zur Abhilfe vergrößert man den Abstand zwischen Polfläche und Ankerfläche allmählich nach den Polkanten hin oder stellt die Polkanten oder die Nuten schräg mit einer Steigung gleich der Nutenteilung auf die Ankerlänge.

Bei Belastung der Maschine sinkt die EMK etwas, weil die Ankerrückwirkung das Feld schwächt, besonders wenn die Bürsten aus der neutralen Zone verdreht sind.

Die Spannung U_a des Ankers zwischen den Bürsten ist um den Spannungsverlust $I_a R_a$ kleiner als die EMK entsprechend der Gleichung

$$U_a = E - I_a R_a \quad (3)$$

Das Drehmoment ist nach (407) für eine mehrpolige Maschine

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{10^{-8}}{9,81} \cdot \frac{p}{a} z_{ges} I_a \Phi_a \text{ kg*m} \quad (4)$$

worin der Gesamtstrom I_a in Ampere auszudrücken ist. Mit $p = 1$, $a = 1$ erhält man

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{10^{-8}}{9,81} \cdot z_{ges} I_a \Phi_a \text{ kg*m} \quad (5)$$

Durch Division der Gleichung (1) durch Gleichung (4) erhält man die Leistung

$$E I_a = 9,81 \cdot \frac{2\pi n}{60} \cdot M \text{ Watt} \quad (6)$$

oder in Worten: Die im Anker erzeugte oder verbrauchte elektrische Leistung ist der verbrauchten oder erzeugten mechanischen Leistung äquivalent. Die mechanische Leistung ist

$$N_m = \frac{2\pi n}{60} \cdot M \frac{\text{kg*m}}{\text{sec}} = 9,81 \frac{2\pi n}{60} M \text{ Watt} = \frac{2\pi n}{75 \cdot 60} M \text{ PS} \quad (7)$$

Man kann die drei Gleichungen (3), (1) und (4), die für Generatoren und Motoren gültig sind, vereinfacht folgendermaßen schreiben

$$E = U + R I \quad (8a)$$

$$E = c_1 \Phi_a n \quad (8b)$$

$$M = c_2 \Phi_a I_a \quad (8c)$$

(420) Schaltungen der Maschinen. Man unterscheidet Maschinen mit Selbsterregung, Eigenerröpfung und Fremderregung. Bei den selbsterregenden Maschinen wird entweder die volle Ankerstromstärke oder ein Teil von ihr oder eine Kombination der ganzen Ankerstromstärke und eines Teils davon für die Erregung der Feldmagnete nutzbar gemacht. Demnach sind drei Schaltungen möglich.

Bei der Reihenschlussmaschine (auch Hauptschluß-, Hauptstrom-, Serienmaschine, Maschine mit direkter Wicklung genannt) durchfließt der ganze Ankerstrom die Feldmagnetwicklung, Abb. 199. Da die Erreger-Durchflutung eine bestimmte Größe haben muß, so erhält die Erregerwicklung in diesem Falle wenig Windungen, und zwar mit Rücksicht auf Leistungs- und Spannungsverlust (etwa 2—5%) von starkem Querschnitt.

Bei der Nebenschlussmaschine (Abb. 200) liegt die Erregerwicklung unmittelbar zwischen den Ankerbürsten. Sie erhält jetzt also die volle Ankerspannung und muß daher, und zwar wiederum mit Rücksicht auf den Leistungsverlust, einen entsprechend großen Widerstand besitzen, was durch die Wahl vieler Windungen verhältnismäßig dünnen Drahtes erreicht wird. In diesem Falle beträgt die Erregerstromstärke wenige Hundertstel der Ankerstromstärke.

Bei der Doppelschlußmaschine (auch Compoundmaschine oder Maschine mit gemischter Wicklung genannt) sind beide Schaltungen vereinigt, Abb. 201 u. 202; es überwiegt hierbei in der Regel der Einfluß der Nebenschluß-

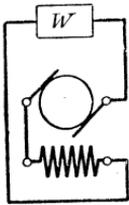


Abb. 199. Reihenschlußschaltung.



Abb. 200. Nebenschlußschaltung.

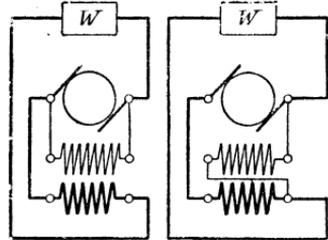


Abb. 201. Abb. 202. Doppelschlußschaltung.

wicklung. Man kann zwei Anordnungen unterscheiden. Die Nebenschlußwicklung liegt entweder direkt zwischen den Ankerbürsten, Abb. 201, oder zwischen der einen Ankerbürste und der freien Klemme der Reihenschlußwicklung, Abb. 202. Die Doppelschlußmaschine ist nur wenig im Gebrauch.

Bei der Eigenerrögenung wird die Maschine durch eine unmittelbar oder mittelbar mit ihr gekuppelte Maschine, bei der Fremderregung durch eine völlig unabhängige Stromquelle erregt.

Stromerzeuger.

(421) Das Angehen der Maschine erfolgt nach dem dynamoelektrischen Prinzip von Werner Siemens mit Hilfe des remanenten Magnetismus. Bei der Reihenschlußmaschine muß dazu der äußere Stromkreis geschlossen sein, damit ein Strom in der Erregerwicklung auftreten kann. Ferner muß die Erregerwicklung so geschaltet sein, daß der entstehende Strom den remanenten Magnetismus verstärkt. Spricht daher eine Reihenschlußmaschine auch bei voller Drehzahl nicht an, so kann der Grund in einem zu großen Widerstand des Stromkreises — Abhilfe: Verringerung des äußeren Widerstandes —, in einer falschen Schaltung der Erregerwicklung — Abhilfe: Vertauschen der Anschlüsse — oder in einem zu geringen remanenten Magnetismus — Abhilfe: Erregung von einer besonderen Stromquelle aus während einiger Sekunden — liegen.

Es muß im übrigen auf richtige Bürstenstellung geachtet werden, die je nach der Art der Verbindung der Ankerdrähte mit dem Kommutator verschieden sein kann. Die richtige Stellung wird von der Fabrik durch irgendeine Marke bezeichnet, auf die zu achten ist.

Bei den modernen Maschinen sind in der Regel die Stirnverbindungen so hergestellt, daß die Kommutatorteile, an die eine Ankerspule angeschlossen ist, zu beiden Seiten an der Mittellinie dieser Spule liegen. In diesem Falle müssen die Bürsten vor der Mitte der Pole stehen.

Die Nebenschlußmaschine spricht am besten an, wenn der äußere Stromkreis offen und der Nebenschluß-Regulierwiderstand kurz geschlossen ist. Im übrigen gelten dieselben Bedingungen für das Angehen wie bei der Reihenschlußmaschine. Bei schnellem Abstellen der Maschine oder bei Kurzschlüssen können die Feldmagnete umpolarisiert werden, so daß nun beim Wiederanlassen die im Anker induzierte EMK und der Strom entgegengesetzt gerichtet sind. Falsche Stromrichtung ist für Bogenlicht, Parallelbetrieb mit anderen Maschinen und mit Akkumulatoren und für chemische Betriebe unzulässig; es muß daher durch Fremderregung während kurzer Zeit Abhilfe geschaffen werden. Der Grund dieser Er-

scheinung liegt im Überwiegen der magnetomotorischen Kraft des Ankers über den zu geringen remanenten Magnetismus.

(422) Charakteristiken der Maschinen. Charakteristiken werden bestimmte Kurven in einem rechtwinkligen Koordinatensystem genannt, die über das Verhalten der Maschinen Aufschluß geben. Die Geschwindigkeit wird dabei überall als konstant angenommen.

Die magnetische Charakteristik (Abb. 203) zeigt die Abhängigkeit der EMK von der Erregung bei Leerlauf. Bei Aufnahme dieser Kurve wird

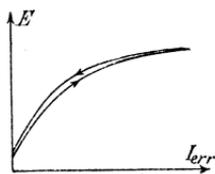


Abb. 203. Magnetische Charakteristik.

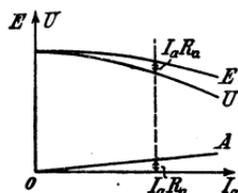


Abb. 204. Belastungscharakteristik bei Fremderregung.

die Maschine fremd erregt. Diese Charakteristik hat die Form der Magnetisierungskurven und liegt etwas tiefer oder höher, je nachdem man sie mit steigenden oder fallenden Werten der Erregung aufnimmt. Sie hat bei allen Arten von Schaltungen dasselbe Aussehen, weil die Maschine fremd erregt ist.

Die Belastungscharakteristik kann man entweder bei Fremderregung, die dann konstant zu halten ist, oder bei Selbsterregung aufnehmen. Als Abszissen wählt man die Ankerstromstärken, als Ordinaten entweder die EMKe — innere Charakteristik — oder die Klemmenspannungen der Maschine — äußere Charakteristik. Die Belastungscharakteristik bei Fremderregung zeigt Abb. 204. Die EMK verläuft anfangs horizontal, fällt jedoch bei größeren Stromstärken infolge der Ankerrückwirkung. Die Klemmenspannung liegt um den Spannungsverlust $I_a R_a$, der durch die annähernd gerade Linie OA dargestellt ist, tiefer als die innere Charakteristik.

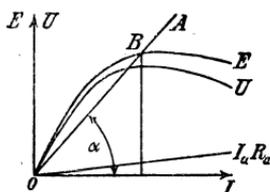


Abb. 205. Charakteristiken der Reihenschlußmaschine.

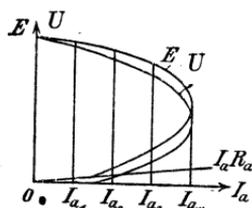


Abb. 206. Charakteristiken der Nebenschlußmaschine.

Die Charakteristik der Reihenschlußmaschine (Abb. 205) zeigt annähernd die Form der magnetischen Charakteristik, liegt jedoch etwas tiefer und fällt wegen der Ankerrückwirkung nach Überschreitung einer bestimmten Stromstärke wieder. Die Charakteristik der Nebenschlußmaschine (Abb. 206) fällt erst langsam, mit zunehmender Stromstärke schneller, kehrt bei einem maximalen Wert der Stromstärke um und zur Abszissenachse zurück. Es gehören daher im allgemeinen zu jeder Ankerstromstärke zwei Werte der EMK und der Klemmenspannung, ein größerer und ein kleinerer.

Praktisch benutzt wird bei der Reihenschlußmaschine der Teil oberhalb des Knies, bei der Nebenschlußmaschine der höchste Teil der Kurve, längs dessen die Spannung wenig sinkt. Die Nebenschlußmaschine hat innerhalb dieses Bereiches die Eigenschaft, daß sie unabhängig von der Belastung die Klemmenspannung nahezu konstant hält. Sie ist daher die gegebene Maschine für alle Anlagen, die mit konstanter Spannung arbeiten.

Die Charakteristik der Reihenschlußmaschine schneidet auf der Ordinatenachse, die Charakteristik der Nebenschlußmaschine auf der Abszissenachse eine Strecke ab, die um so größer ist, je stärker der remanente Magnetismus ist.

(423) Der Beharrungszustand der Maschinen ist mit Hilfe der Charakteristik leicht zu finden. Da $I = E/R_{ges}$, so kann bei konstantem R_{ges} die Beziehung zwischen I und E durch eine Gerade OA (Abb. 205) dargestellt werden; OA schneidet die innere Charakteristik der Reihenschlußmaschine in B . Links von B liegt die Charakteristik über der Geraden OA , d. h. die EMK ist größer, als zur Erzeugung der vorhandenen Stromstärke erforderlich ist; rechts von B liegt die Charakteristik unterhalb der Geraden OA , d. h. die EMK ist kleiner, als zur Erzeugung der vorhandenen Stromstärke erforderlich ist. Die Stromstärke muß daher links von B steigen, rechts von B fallen. Gleichgewicht ist nur im Punkte B vorhanden. Für den Winkel α aber gilt die Beziehung

$$\operatorname{tg} \alpha = c \cdot E / I = c \cdot R_{ges}$$

Ist der Widerstand des gesamten Stromkreises R_{ges} zu groß, so kann der Fall eintreten, daß α zu groß wird, und OA die Kurve OE nicht schneidet. Dabei ist angenommen, daß die Charakteristik durch O geht, d. h. die Remanenz verschwindend gering ist. Die Maschine kann dann keinen Strom liefern, sie geht nicht an. Fällt die Gerade OA mit dem geradlinig ansteigenden Teil der Charakteristik zusammen, so ist die Stromstärke labil. Ein richtiges Arbeiten der Maschine ist also nur möglich, wenn man hinter dem Knie arbeitet. R_{ges} darf um so größer sein, je größer die Drehzahl ist, und wenn umgekehrt R_{ges} konstant ist, darf die Drehzahl nicht unter einen bestimmten Wert sinken. Diesen Wert nennt man die *t o t e G e s c h w i n d i g k e i t* für den betreffenden Widerstand.

Ist der äußere Stromkreis offen, so erregt sich die Nebenschlußmaschine ebenso wie die Hauptschlußmaschine, weil der ganze Ankerstrom durch die Erregerwicklung fließt.

Ist die Maschine belastet, so kann man (Abb. 207) eine Schar von Kurven zeichnen, die U über I_{err} bei verschiedenen konstanten Werten der Ankerstromstärke darstellen. Da I_{err} und U_{err} einander proportional sind, so werden die Werte von U_{err} durch die Ordinaten einer durch den Nullpunkt gehenden Geraden OA dargestellt. Bei Selbsterregung muß $U_{err} = U$ sein. Dies trifft für die Schnittpunkte der Geraden mit den U -Kurven zu. Es kann daher im allgemeinen dieselbe Ankerstromstärke I_a für zwei Werte von U eintreten, wobei natürlich der Widerstand des äußeren Kreises verschieden groß sein muß, nämlich

$$R_{a1} = \frac{U_1}{I_a} \quad \text{und} \quad R_{a2} = \frac{U_2}{I_a}$$

Trägt man die Werte der aus Abb. 207 für die verschiedenen Stromstärken I_a entnommenen Spannungen über I_a als Abszissen auf, so erhält man die Belastungscharakteristik Abb. 206.

(424) Die **Doppelschlußwicklung** läßt erreichen, daß die äußere Belastungscharakteristik annähernd horizontal verläuft — die Maschine ist dann „kompoundiert“ — oder sogar bei Belastung ansteigt — die Maschine ist dann „überkompoundiert“.

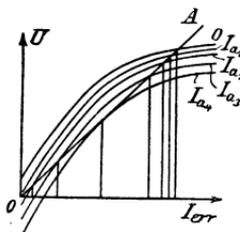


Abb. 207. Magnetische Charakteristiken bei verschiedenen Ankerstromstärken.

(425) Die **Stabilität** der Maschinen ist nach (423) nur vorhanden, wenn man mit starkem Magnetismus oberhalb des Knies arbeitet. Bei kompensierten Maschinen, besonders bei Turbodynamos, ist aber vielfach im Gebiete der Erregung die Charakteristik geradlinig; in diesem Falle muß man mit Eigen- oder Fremderregung arbeiten.

(426) **Regulierwiderstände für Generatoren.** [Vgl. (581) u. f.] Zur Einstellung der Spannung ist bei Nebenschluß- und Doppelschlußmaschinen ein Regulierwiderstand im Nebenschlußkreise erforderlich. Da die Maschinen sich durch den Betrieb erwärmen, und mithin der Widerstand des Nebenschlußkreises mit der Zeit zunimmt, so muß zu Anfang ein größerer Teil des Regulierwiderstandes eingeschaltet sein, der bei zunehmender Erwärmung ausgeschaltet wird. Außerdem aber muß bei Nebenschlußmaschinen die Erregung bei stärkerer Belastung erhöht werden. Es muß also auch in warmem Zustande der Maschine bei Leerlauf ein Teil des Widerstandes eingeschaltet sein. Die Größe des Widerstandes ist daher so zu berechnen, daß bei höchster Temperatur und größter Belastung sicherheitshalber noch etwas Widerstand eingeschaltet bleiben kann, und daß der Widerstand anderseits ausreicht, um die Spannung der kalten, leerlaufenden Maschine bis auf den normalen Betrag herunterzubringen. Die einzelnen Stufen der Regulierwiderstände werden vielfach gleich groß gemacht; richtiger ist es, sie so zu bemessen, daß überall dem Abschalten einer Stufe bei konstanter Belastung möglichst die gleiche Spannungserhöhung entspricht. Die Stufenzahl ist so groß zu wählen, daß die Sprünge nicht größer als etwa 1 % werden. Vgl. Krause, ETZ 1902, S. 66, 383, 556.

(427) **Kurzschlußkontakt.** Die Widerstände werden zweckmäßig mit einem besonderen Kontakt versehen, um die Erregerwicklung ohne Spannungserhöhung stromlos zu machen. Die Schaltung ist durch Abb. 208 gegeben. Durch Bewegung

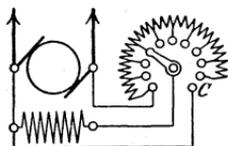


Abb. 208. Nebenschlußregulierwiderstand mit Kurzschlußkontakt.

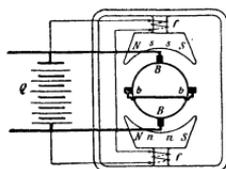


Abb. 209. Querfeldmaschine von Rosenberg.

der Kurbel im Sinne des Uhrzeigers wird erst der ganze Widerstand vor die Wicklung geschaltet, sodann wird bei Berührung des Kurzschlußkontaktes *C* die Erregerwicklung kurz geschlossen und endlich der äußere Erregerkreis unterbrochen. Die durch das Verschwinden des Magnetismus hervorgerufene EMK kann nun keine hohe Spannung erzeugen, da die Wicklung kurz geschlossen ist. Der durch sie hervorgerufene Strom läuft sich nach einiger Zeit — einigen Sekunden bis 1 Minute — tot, ohne Schaden anzurichten. Der Kurzschlußkontakt muß eine Verriegelung besitzen, damit die Erregung nicht aus Versehen während des Betriebes stromlos gemacht werden kann. Die Verriegelung muß selbsttätig wirken, vorgesteckte Stöpsel sind unzulässig.

(428) **Querfeldmaschine von Rosenberg.** Vgl. ETZ 1905, S. 393; 1907, S. 1207 (Abb. 209). Bringt man bei einer fremderregten Maschine auf dem Kommutator für jedes Polpaar einen zweiten Bürstensatz *BB* an, so daß einmal Bürsten *bb* in der üblichen Stellung und außerdem Bürsten *BB* in der Mitte zwischen den ersteren vorhanden sind, und schließt man die Bürsten *bb* kurz, so erzeugt der im kurzgeschlossenen Kreise fließende Strom ein Querfeld, dem ein starker Induktionsfluß entspricht, weil die Pole sehr große Abmessungen besitzen. Es entsteht daher am Bürstenpaar *BB* eine Spannung. Legt man an diese Bürsten irgend-

einen Stromkreis, so kann von ihnen Strom abgenommen werden. Dieser eigentliche Nutzstrom erzeugt aber seinerseits ein neues Querfeld, das gegen das erste Querfeld um 90 Grad, gegen das Feld der Feldmagnete also um 180 Grad räumlich verschoben ist und daher den Magnetismus der Feldmagnete schwächt. Der aus dem Felde der Erregerspulen und dem vom Nutzstrom erzeugten Querfelde resultierende Induktionsfluß in senkrechter Richtung darf nur sehr gering sein, weil die Bürsten bb kurz geschlossen sind. Die beiden Felder sind daher nahezu entgegengesetzt gleich groß. Die Schenkel sind daher von geringem Querschnitt, die Polschuhe aber groß, damit sich der erste Querfluß gut ausbilden kann. Das Erregerfeld ist nur etwa 10% größer als das Feld des Nutzstromes; folglich kann der Nutzstrom bei konstanter Erregung durch die Spulen ff höchstens um 10% steigen, weil dann das resultierende Feld in senkrechter Richtung zu Null wird. Die Kurzschlußstromstärke zwischen den Bürsten bb beträgt etwa 40% des Nutzstromes. Bei veränderlicher Geschwindigkeit bleibt demnach die Stromstärke bei konstantem Widerstande nahezu konstant, nachdem eine gewisse Drehzahl überschritten ist. Die Stärke des Nutzstromes wird durch die Erregung eingestellt.

Da die Stromrichtung in dem kurzgeschlossenen Kreise von der Drehrichtung der Maschine abhängt, so werden mit der Umkehrung der Drehrichtung auch die Quermagnetisierungen umgekehrt. Die Maschine liefert also trotz der Fremderregung bei beliebiger Drehrichtung einen Strom von gleichbleibender Richtung. Die Maschine wird u. a. für den Betrieb elektrischer Eisenbahnwagenbeleuchtung verwendet. Parallel zu den Bürsten BB ist dann wie in Abb. 209 eine Akkumulatorenbatterie geschaltet, die Spannung ist daher durch diese gegeben. Die Maschine liefert bereits bei sehr geringen Geschwindigkeiten Strom, wenn der Widerstand nicht zu groß ist.

Ist die Drehzahl konstant, dagegen der Widerstand des äußeren Kreises veränderlich, so ist der Kurzschlußstrom nur wenig größer als der normale, dagegen wird die Spannung bei großem Widerstand sehr groß. Man kann die Maschine dann durch Schmelzsicherungen im Kurzschlußkreise bb sichern. Die Maschine eignet sich dann gut zum Betrieb von Scheinwerfern und zum elektrischen Schweißen.

(429) **Dreileitermaschinen**¹⁾ sind Maschinen, an die auch der Mittelleiter eines Dreileitersystems angeschlossen werden kann. Anordnungen, bei denen der Hilfsleiter direkt an eine auf dem Kommutator schleifende Bürste angeschlossen wird, sind von Kingdon und Dettmar angegeben worden, vgl. ETZ 97, S. 230. Es wechselt immer ein Paar Nordpole mit einem Paar Südpole ab, während der Anker für die halbe Polzahl gewickelt ist. Nach Dettmar werden die Spulen der ungeraden und die der geraden Pole zu je einem Erregerkreise zusammengefaßt, die durch getrennte Regulierwiderstände einzeln reguliert werden können. Dem gleichen Zwecke dient der Spannungsteiler von Dolivo-Dobrowolsky. Er besteht aus einer meistens außerhalb der Maschine angebrachten Drosselspule (Abb. 210), die (durch Schleifringe) mit zwei Punkten C und D der Ankerwicklung verbunden ist, die bei einer zweipoligen Maschine um 180° auseinander liegen. Der Nulleiter wird an den Mittelpunkt O der Drosselspule angeschlossen. In der Drosselspule fließt dauernd ein Wechselstrom, dessen Stärke wegen der hohen Selbstinduktion nur sehr gering ist. Da in jedem Augenblicke die Spannung zwischen A und C gleich der zwischen B und D ist, und Punkt O die Spannung zwischen C und D in zwei gleiche Teile teilt, so muß auch stets die Spannung zwischen A und O gleich der zwischen B und O sein. Bei Belastungs-

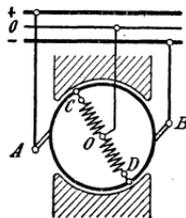


Abb. 210. Spannungsteilung nach Dobrowolsky.

¹⁾ A. Buch, Über Spannungsteilung bei Gleichstrommaschinen. Diss. Braunschweig 1912. — Dobrowolsky, ETZ 1894, S. 323. — Sengel, ETZ 1898, S. 544; 1900, S. 387.

verschiedenheiten in den beiden Hälften des Dreileitersystems fließt die Differenz der Ströme über O zum Anker zurück. Dabei können Wechselströme von der dreifachen Frequenz auftreten, die sich im äußeren Stromkreise über den Gleichstrom lagern und z. B. ein Singen der Bogenlampen verursachen; man kann sie durch eine kleine Spule abtönen. Vgl. ETZ 1901, S. 357. Läßt man den Anschluß D und die Spule OD weg, so wirkt OC wie eine Drosselspule und man erhält die Dreileiteranordnung von Sengel, die nur einen Schleifring benötigt.

Bei der Dreileitermaschine von Ossanna ist auf dem Anker außer der Kommutatorwicklung noch eine Drehstromwicklung, etwa eine aufgeschnittene (462), in Sternschaltung angebracht. Die Enden dieser Wicklung sind an drei Punkte der Gleichstromwicklung angeschlossen, die bei einer zweipoligen Maschine um je 120° auseinander liegen; der Nullpunkt wird über einen Schleifring mit dem Nullleiter verbunden. Die Wirkungsweise ist ähnlich wie im vorigen Fall.

Ein Nachteil dieser Spannungsteilungen ist, daß man die Spannungen der beiden Netzhälften nicht unabhängig voneinander regulieren kann. Sie eignen sich daher nur für Anlagen mit geringen Spannungsverlusten in den Leitungen und nicht allzu großen Verschiedenheiten in der Belastung der Netzhälften (bei Dobrowsky 15%, bei Osanna 25% der Maschinenleistung).

(430) Parallel- und Reihenschaltung der Maschinen. In größeren Anlagen werden in der Regel mehrere Maschinen aufgestellt, die durch Parallel- oder Reihenschaltung miteinander verbunden werden. Am bequemsten und häufigsten ist die Parallelschaltung der Nebenschlußmaschinen. Es ist nur darauf zu achten, daß die Maschinen gleiche Spannung und gleiche Polarität besitzen. Die Polarität ist gewährleistet bei der Netzerregung (Abb. 211 a). Man schließe

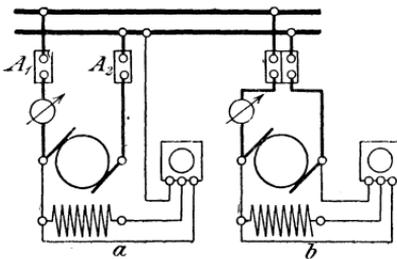


Abb. 211. Parallelschaltung zweier Nebenschlußmaschinen.

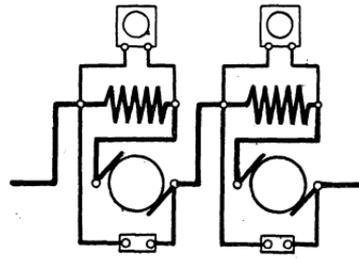


Abb. 212. Reihenschaltung zweier Reihenschlußmaschinen.

bei der zuzuschaltenden Maschine den Erregerkreis durch den linken Schalter A_1 und den Regulierwiderstand, stelle die richtige Spannung ein und schließe dann den rechten Schalter A_2 . Die Maschine läuft nunmehr auch nach dem Parallelschalten leer und wird erst dadurch belastet, daß man sie stärker erregt. Der Ankerstrom ist nämlich $I_a = (E - U)/R_a$, d. h. gleich dem Überschuss der EMK E über die Sammelschienenspannung U dividiert durch den Ankerwiderstand R_a . Bei der Selbsterregung (Abb. 211 b) ist auf richtige Polarität zu achten, man verwendet daher polarisierte Spannungszeiger, z. B. Drehspulensinstrumente. In diesem jetzt üblichen Falle versieht man die Ankerkreise zweckmäßig mit doppelpoligem Schalter.

Bei Doppelschlußmaschinen müssen nicht bloß die Maschinen im ganzen, sondern auch die Anker und die Hauptschlußwicklungen für sich parallel geschaltet werden. Man schaltet zunächst durch einen doppelpoligen Schalter die Hauptschlußwicklung an die eine Netzschiene und eine dritte Schiene. Dadurch erhalten zwar die bereits laufenden Maschinen einen Spannungstoß, weil ihre Hauptschlußwicklungen plötzlich von einem schwächeren Strom durchflossen

werden, doch wird dabei die Leistung der Maschinen kaum geändert. Hierauf erteilt man dem Anker dieselbe Spannung, die die anderen Anker haben, und schließt ihn durch einen einpoligen Schalter an die Ankersammelschienen an.

Bekommt eine Doppelschlußmaschine Rückstrom, so wirkt die Reihenschlußwicklung entmagnetisierend und somit verstärkend auf den Rückstrom ein. Hierdurch entsteht die Gefahr der Umpolarisierung der Maschinen. Der Parallelbetrieb der Doppelschlußmaschine erfordert daher größte Aufmerksamkeit, und man vermeidet diese Art von Maschinen besonders bei allen Akkumulatorenanlagen.

Reihenschlußmaschinen sind mehrfach in großen Anlagen, die dann mit konstanter Stromstärke arbeiten, **hintereinander geschaltet** worden (Abb. 212), System *Thury*. Zur Regulierung der Spannung erhalten sie einen Regulierwiderstand, der parallel zur Erregerwicklung geschaltet ist. Wird der Widerstand kurz geschlossen, so verliert die Maschine ihre Spannung; je mehr Widerstand eingeschaltet wird, um so stärker wird der Strom, der durch die Erregung geht, und um so höher die Spannung der Maschine. Zum Einschalten einer Maschine wird zunächst der Ausschalter, der sie kurzschließt, geöffnet. Die Maschine wird sodann bei kurzgeschlossener Erregerwicklung in Gang gesetzt. Sodann wird der Regulierwiderstand so weit verstellt oder auch die Drehzahl so weit erhöht, bis die gewünschte Spannung erreicht ist. Vgl. ETZ 1902, S. 1001.

Gleichstrommotoren.

(431) Generator und Motor. Sinkt an einer Gleichstrom-Dynamo, die an ein Netz von konstanter Spannung angeschlossen ist, die EMK so weit, daß E in der Gleichung $I_a = (E - U) / R_a$ kleiner als U wird, so kehrt sich die Richtung des Stromes um, und der Generator wird zum Motor. Während beim Generator EMK und Strom gleichen Richtungssinn hatten, fließt nun der Strom entgegengesetzt der EMK; man spricht daher wohl von „gegenelektromotorischer Kraft“. Es gelten ebenso wie für den Generator die Gleichungen (1) bis (8) in (419). Für das Verhalten der Motoren sind besonders die einfachen Gleichungen (8) sehr nützlich, die wir, da jetzt $U > E$ ist, folgendermaßen schreiben

$$U = E + RI \quad (8a)$$

$$E = c_1 \Phi_a n \quad (8b)$$

$$M = c_2 \Phi_a I_a \quad (8c)$$

Beim Reihenschlußmotor ist $I_a = I$ und unter R die Summe der Widerstände des Ankers und der Erregerwicklung zu verstehen, beim fremderregten und beim Nebenschlußmotor sind R und I auf den Anker zu beziehen und durch R_a und I_a zu ersetzen.

(432) Einteilung. Die Gleichstrommotoren werden nach der Art, wie die Erregung geschaltet ist, eingeteilt in

- | | |
|---|---|
| 1. fremderregte Motoren | } (wesentlichste Eigenschaft: angenähert gleichbleibende Geschwindigkeit bei allen Bremsbelastungen), |
| 2. Nebenschlußmotoren | |
| 3. Reihenschlußmotoren | } (wesentlichste Eigenschaft: Abfall d. Geschwindigkeit bei zunehmender Bremsbelastung, Drehmoment nur von der Stromstärke abhängig), |
| 4. Doppelschlußmotoren | |
| a) mit gegensinnig geschalteten Erregerwicklungen (wesentlichste Eigenschaft: konstante Geschwindigkeit), | |
| b) mit gleichsinnig geschalteten Erregerwicklungen (Eigenschaften zwischen denen der Nebenschluß- und der Reihenschlußmotoren). | |

Gleichstrommotoren werden normal ausgeführt für 110, 220, 440 und 500 V. Bei größeren Motoren liegt die durch den Kommutator gegebene Spannungsgrenze im allgemeinen bei 1000 V, in Ausnahmefällen bei 2000 bis 3000 V.

(433) Umsteuerung der Motoren. Soll die Drehrichtung eines Gleichstrommotors geändert werden, so muß die Stromrichtung entweder in der Erregerwicklung oder im Anker umgekehrt werden, während die Umkehrung der Richtung des dem Motor zugeführten Gesamtstromes auf die Drehrichtung ohne Einfluß ist.

(434) Der fremderregte Motor. Hält man die Erregung konstant, so ist, solange die Ankerrückwirkung keinen Einfluß gewinnt, das Drehmoment proportional mit I_a . Die Kurve der Stromstärke über dem Drehmoment steigt daher geradlinig vom Nullpunkt aus an und geht später in eine konkav nach oben gekrümmte Kurve über, sobald der Einfluß der Ankerrückwirkung bemerkbar wird. Ändert man die Erregung, so nimmt bei schwach gesättigtem Eisen das Drehmoment proportional mit der Erregung zu oder ab, die Ankerstromstärke bei gleichbleibender Bremsbelastung daher entsprechend ab oder zu, bei gesättigtem Eisen erweist sich die Veränderung der Erregung innerhalb der Sättigungsgrenze natürlich als wirkungslos. Unerrechte Motoren haben ein sehr kleines Drehmoment, falls nicht durch extreme Verstellung der Bürsten die Maschine vom Anker aus erregt wird, oder nennenswerte Remanenz vorhanden ist.

Bei Leerlauf kann, da dann die Stromstärke entsprechend der lediglich zur Überwindung der Reibung aufzuwendenden Leistung sehr klein ist, $E = U_a$ gesetzt werden. Die Geschwindigkeit ist daher bei Leerlauf, und wenn die Bürsten in der neutralen Zone stehen, praktisch gleich der Geschwindigkeit, bei der der leerlaufende Generator die Spannung U_a erzeugt. Wird der Motor belastet, so sinkt bei konstantem U_a die Geschwindigkeit und die Gegen-EMK E so weit, bis der Strom genügend stark geworden ist, um das erforderliche Drehmoment zu erzeugen. Dieser Abfall ist bei großen Motoren sehr gering, bei kleinen Motoren mit verhältnismäßig hohem Ankerwiderstand bemerkbarer.

(435) Geschwindigkeitsregelung in weiten Grenzen. Aus den Gleichungen (8a) und (8b) folgt

$$n = \frac{1}{c_1 \Phi_a} (U_a - R_a I_a) \quad (9)$$

Bei konstantem Drehmoment M und konstanter Erregung ($\Phi_a = \text{const}$) ist nach (8c) auch I_a konstant und daher nach (9) die Drehzahl eine lineare Funktion der Spannung, Abb. 213. Die Gerade, die n über U_a darstellt, schneidet auf der Abszissenachse das Stück $R_a I_a$ ab. Die Stromstärke bleibt bis $n = 0$ konstant und fällt dann linear mit der Spannung. Diese

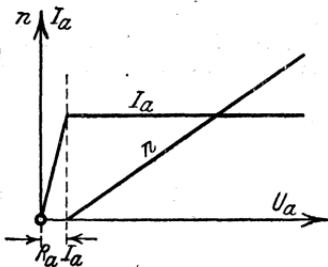


Abb. 213. Drehzahl und Stromstärke bei konstanter Erregung und veränderlicher Ankerspannung.

kann durch Vorschalten von Widerstand vor den Anker verringert werden, allein nur auf Kosten des Wirkungsgrades, der ungefähr in demselben Maße wie die Geschwindigkeit kleiner wird. Wenn das Drehmoment nicht konstant ist, so ist auch die Drehzahl nicht konstant, weil der Spannungsabfall im Vorschaltewiderstand dann veränderlich ist. Es tritt dann also bei stark belastetem Motor ein großer, bei schwach belastetem ein geringer Abfall der Geschwindigkeit ein. Man wendet daher diese Schaltung nur dann an, wenn

die Geschwindigkeit nur ganz vorübergehend auf einen geringen Wert ermäßigt werden soll, und bedient sich in allen anderen Fällen der folgenden Methode.

(436) Leonard-Schaltung. Die Anker eines Generators G (Steuerdynamo) und des Motors M , Abb. 214, sind ohne Zwischenschaltung von Schaltern, Sicherungen oder Regulierwiderständen in Reihe geschaltet. Der Generator, der auf irgendeine Weise, häufig als Teil eines mit großer Schwungradscheibe S versehenen

Motor-Generators (Ilgner-Umformers) von einem Drehstrom- oder Gleichstrom-Motor M_o mit nur so weit veränderlicher Geschwindigkeit angetrieben wird, daß das Schwungrad genügend Arbeit aufnehmen oder abgeben kann, läuft mit wechselnder Erregung, die von dem positiven Maximum über Null bis zum negativen Maximum verändert werden kann. Dann gilt für die Geschwindigkeit die Gl. (9) in der Abänderung (Φ_a = Ankerfluß des Motors).

$$n = \frac{1}{c_1 \Phi_a} (E_g - R I_a) \quad (10)$$

vgl. Abb. 214, in der U durch die EMK E_g und R_a durch den Gesamtwiderstand R in dem Ankerkreise GM zu ersetzen ist. Die Geschwindigkeit des Motors ist daher durch die Erregung des Generators völlig bestimmt und in der bequemsten Weise einzustellen. Wird die Erregung des Generators verstärkt, so wächst der Strom im Ankerkreise, und der Motor wird beschleunigt; wird die Erregung des Generators abgeschwächt, so sinkt die Stromstärke, ja sie kann sich leicht umkehren. In diesem Falle läuft der Motor als Generator, er wird stark gebremst und nimmt daher sehr schnell eine geringere Geschwindigkeit an, bei der er wieder als Motor läuft.

Diese Schaltung wird besonders bei großen Motoren (Förder- und Walzwerksmotoren) angewendet, vgl. Abb. 322 u. 325.

(437) Geschwindigkeitsregelung in mäßigen Grenzen. Läßt man beim fremd-erregten Motor die Ankerspannung unverändert, und ändert man die Erregung, so folgt aus $E = c_1 \Phi n$, daß die Geschwindigkeit um so größer wird, je geringer der Induktionsfluß wird. Das Verfahren ist in zweifacher Hinsicht vorteilhaft. Der Leistungsverlust im Regulierwiderstände ist gering, weil im ganzen Erregerkreis nur einige Hundertstel der Leistung verbraucht werden; und die Einstellung der Geschwindigkeit ist von der Belastung unabhängig. Andererseits ist zu beachten, daß infolge der Abschwächung des Induktionsflusses das Drehmoment für gleich starken Ankerstrom geringer wird, die gleiche Bremsbelastung also nur mit stärkerem Strom durchgezogen werden kann. Daß der Strom stärker werden muß, ergibt sich übrigens auch daraus, daß ja durch die höhere Geschwindigkeit eine höhere Leistung bedingt wird. Wird in sehr weitgehendem Maße im Nebenschluß reguliert, so macht sich die infolge der Ankerrückwirkung auftretende Feldverzerrung durch starkes Feuern des Kommutators sehr störend bemerkbar. Will man daher in weiten Grenzen regulieren, so ist der Feldverzerrung durch Kompensationswicklungen, Wendepole oder dgl. zu begegnen (392 u. 393). Wird die Ankerstromstärke künstlich konstant gehalten (Reihenschaltung mehrerer Motoren), so hat die Abschwächung des Feldes eine Verringerung der Geschwindigkeit bei gleichzeitigem Sinken der Ankerspannung zur Folge.

(438) Durchgehen des Motors. Bei allzusehr geschwächter Erregung, z. B. bei Unterbrechung des Erregerkreises, kann der einmal laufende Motor bei geringer Bremsbelastung eine sehr hohe Geschwindigkeit annehmen („er geht durch“), weil dann nur der remanente Magnetismus vorhanden ist, und es tritt eine Gefährdung des Ankers durch die Zentrifugalkraft ein. Es ist daher der Konstruktion und Ausführung der Erregerkreise besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden; Sicherungen dürfen im Erregerkreise nicht angebracht werden, und etwaige Schalter sind so anzuordnen, daß sie ihn nicht öffnen oder kurzschließen können, ohne daß zugleich der Ankerkreis geöffnet wird.

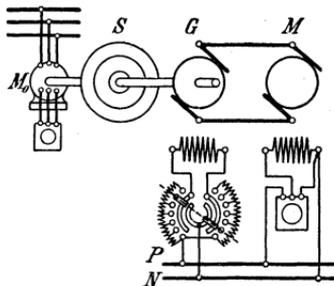


Abb. 214. Ilgner-Motor-Generator mit Leonard-Schaltung.

(439) Kritische Geschwindigkeit. Bei einer bestimmten Geschwindigkeit, die nur infolge Antriebs des Motors von einer anderen Kraftquelle aus eintreten kann, wird die EMK gleich der Ankerspannung. Der Anker wird dann stromlos und nimmt weder elektrische Leistung auf, noch gibt er solche ab. Unterhalb dieser kritischen Geschwindigkeit, deren Höhe durch die Erregung eingestellt werden kann, ist $U > E$; der Anker nimmt daher elektrische Leistung auf, und die Maschine läuft als Motor. Oberhalb der kritischen Geschwindigkeit ist $E > U$; der Strom fließt jetzt im Anker umgekehrt, während der Erregerstrom seine Richtung beibehält. Das Drehmoment hat sich daher auch umgekehrt. Der Motor nimmt jetzt mechanische Leistung auf und gibt elektrische Leistung ab, er läuft als Generator.

Kuppelt man daher zwei gleiche fremderregte Maschinen und schaltet man ihre Anker bei gleicher Erregung auf dasselbe Netz, so laufen beide leer als Motoren. Erregt man nun die eine Maschine um ein geringes stärker, so wächst ihre EMK, und sie läuft als Generator, die andere Maschine als Motor. Durch stärkere Erregung der anderen Maschine kehrt sich der Vorgang um. Äußerlich kann man den Maschinen nicht ansehen, welche als Generator, welche als Motor läuft. Da eine absolut genaue Übereinstimmung zweier Motoren praktisch kaum zu erreichen ist, so verlangt die Anwendung mechanisch gekuppelter und parallel geschalteter fremderregter oder Nebenschlußmotoren (Fahrzeugantrieb) große Aufmerksamkeit.

(440) Der Nebenschlußmotor verhält sich, solange er mit konstanter Spannung gespeist wird, durchaus wie der fremderregte Motor. Er hat daher die Eigenschaft, seine Geschwindigkeit unabhängig von der Größe der Belastung im wesentlichen konstant zu halten. Bemerkenswert ist, daß bei dauerndem Betrieb die Erregerwicklung warm und ihr Widerstand daher größer wird. Der Erregerstrom selbst wird dann schwächer, und ein mit geringer Eisensättigung arbeitender Motor läuft, weniger erregt, schneller. Die Geschwindigkeit wird dann ebenso wie die des fremderregten Motors reguliert. Da bei sinkender Klemmenspannung die Erregung nachläßt, so ist das Drehmoment und die Anzugskraft des Nebenschlußmotors von der Spannung sehr stark abhängig. Wo also große Zugkräfte bei hohem Widerstand der Zuleitungen zum Motor gefordert werden (z. B. im Straßenbahnbetrieb) erweist sich der Nebenschlußmotor als ungünstig. Auch der Nebenschlußmotor kehrt seine Wirkung um, sobald er die kritische Geschwindigkeit überschreitet. Man macht hiervon z. B. Gebrauch bei der Talfahrt auf elektrischen Bahnen und beim Niederlassen von Aufzügen. Sind mehrere parallelgeschaltete Nebenschlußmotoren miteinander gekuppelt, so hängt das Arbeiten der einzelnen Maschinen als Motor oder als Generator von ihrer Erregung ab. Die stärker erregte Maschine arbeitet als Generator, die schwächer erregte als Motor. Beim Fahrzeugbetrieb verlangt die Verwendung parallelgeschalteter Nebenschlußmotoren daher große Vorsicht. Andererseits macht man von diesem Verhalten nützlichen Gebrauch zum Ausgleich der Belastungen der beiden Netzhälften von Dreileiteranlagen (Ausgleicher), ferner zur Belastung und Prüfung von Maschinen. Nebenschlußmotoren mit Wendepolen können ins Schwingen geraten und sogar völlig instabil werden, so daß sich die Schwingungen vergrößern, wenn das Hauptfeld durch die Ankerströme zu stark geschwächt wird¹⁾.

(441) Der Reihenschlußmotor (auch Hauptstrommotor oder Serienmotor genannt) wird durch den Ankerstrom erregt, daher ist sein Drehmoment lediglich von der Stromstärke abhängig. Das Sinken der Klemmenspannung hat keine Verminderung der Anzugskraft und des Drehmomentes, sondern nur eine Abnahme der Drehzahl zur Folge, bis Stillstand erreicht ist. Der Induktionsfluß Φ_a ist bei

¹⁾ Wagner, K. W., Unstabile Betriebszustände bei Gleichstrommaschinen. ETZ 1907, S. 286. — Rosenberg, Über das Pendeln von Gleichstrom-Wendepolmotoren. The Electrician, London, 4. Aug. 1911. — Humburg, Das Pendeln bei Gleichstrommotoren mit Wendepolen. Diss. München 1912. Julius Springer, Berlin.

geringer Stromstärke proportional mit I und das Drehmoment proportional mit I^2 . Bei größerer Sättigung wird Φ_a annähernd konstant, und M nimmt dann proportional mit I zu. Wird endlich die Ankerrückwirkung beträchtlich, so nimmt M langsamer zu, als dem linearen Gesetz entspricht. Daraus ergibt sich die Kurve des Drehmomentes über der Stromstärke und umgekehrt der Stromstärke über dem Drehmoment, Abb. 215.

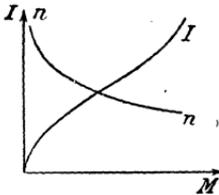


Abb. 215. Verhalten des Reihenschlußmotors.

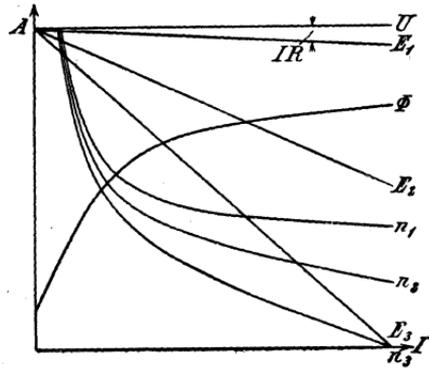


Abb. 216. Geschwindigkeiten des Reihenschlußmotors bei verschiedenen Widerständen.

(442) Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Belastung. Da sich beim Reihenschlußmotor die Erregung mit der Belastung ändert, so läuft der stark belastete Motor langsamer, der schwach belastete schneller. Man übersieht die Verhältnisse leicht bei Betrachtung von Abb. 216. Es ist stets

$$U = E + IR \quad \text{und} \quad n = \frac{E}{c \cdot \kappa \Phi_a}$$

Kennt man die Magnetisierungskurve Φ_a über I und den Widerstand R des Motors, so findet man aus dieser Formel die Drehzahl n für einen beliebigen Belastungszustand I , indem man Φ_a und E aus den Kurven, Abb. 216, abgreift. Wird dem Anker Widerstand vorgeschaltet, so erhöht sich der Spannungsverlust IR ; im Diagramm nimmt die Gerade AE eine zur Abszissenachse stärker geneigte Lage ($AE_2, AE_3 \dots$) an. Aus dem neuen Werte der Gegen-EMK ermittelt man wie vorher den Verlauf von n . Abb. 216 zeigt die Drehzahlen für $R, 8R$ und $16R$.

Das Verhalten des Reihenschlußmotors bringt die Gefahr des Durchgehens bei schwacher Belastung mit sich, hat aber für viele Betriebe die Annehmlichkeit, daß die Geschwindigkeit von selbst um so geringer wird, je größer die Belastung wird. Es steigt daher die vom Motor aufgenommene elektrische Leistung nicht proportional mit dem Drehmoment, wie es angenähert beim Nebenschlußmotor der Fall ist, sondern in geringerem Maße.

(443) Geschwindigkeitsregulierung durch Feldveränderung (437) ist beim Reihenschlußmotor möglich, indem ein Regulierwiderstand parallel zur Erregerwicklung geschaltet wird. Für diesen Fall findet man die Drehzahlen aus Abb. 216, wenn man die Stromverzweigung im Erregerkreis berücksichtigend den Abszissenmaßstab so wählt, daß nur die wirklich zur Erregung dienende Stromstärke darin zum Ausdruck kommt.

(444) Sehr beliebt zur Geschwindigkeitsregulierung ist endlich bei Reihenschluß die Verwendung zweier mechanisch miteinander verbundener Motoren und deren Reihen- oder Parallelschaltung nach Wahl. Diese ergibt eine Geschwindigkeitsveränderung im Verhältnis 1:2. Parallelschaltung zweier Reihenschlußmotoren ist im Gegensatz zur Parallelschaltung gekuppelter Nebenschlußmotoren unbedenklich. Hier ist ja die Erregung eine Funktion der Leistung, und es ergibt sich daher eine praktisch ausreichende Selbstregulierung der Belastungsverteilung.

(445) Die Umkehrung der Motorwirkung in Generatorwirkung tritt beim Reihenschlußmotor ein, wenn seine Drehrichtung geändert wird.

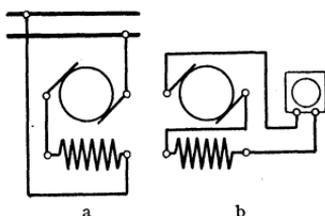


Abb. 217. Reihenschlußmotor in normaler und in Bremschaltung.

Eine sehr starke Generatorwirkung tritt ferner ein, wenn ein noch im Gang befindlicher Motor umgesteuert, d. i. auf entgegengesetzten Drehsinn geschaltet wird. Dies letztere Verfahren, das vielfach „Gegenstrom geben“ genannt wird, gefährdet infolge der auftretenden außerordentlichen Erhöhung der Stromstärke den Motor und ist daher im allgemeinen unzulässig. Eine Generatorwirkung kann endlich erzielt werden, wenn der Reihenschlußmotor vom Netz abgeschaltet und auf geeignete Widerstände geschlossen wird. Hierbei ist aber eine Umschaltung der Erregung

erforderlich (Abb. 217a und b), weil sonst der Motor den Magnetismus verliert. Von dieser dritten Möglichkeit wird vielfach Gebrauch gemacht, wo es gilt, die in bewegten Massen aufgespeicherte Energie schnell zu beseitigen; man nennt das Verfahren „Kurzschlußbremsung“.

(446) Die **Doppelschlußschaltung** der Erregung kann in zweierlei Weise Anwendung finden. Die Hauptschlußwicklung kann erstens so geschaltet werden, daß die Geschwindigkeit noch weniger von der Belastung abhängt als beim Nebenschlußmotor. Wenn nämlich bei letzterem infolge stärkerer Belastung die Geschwindigkeit sinkt, so kann man durch eine vom Ankerstrom durchflossene Wicklung, die magnetisch der Nebenschlußwicklung entgegenwirkt, das Feld schwächen und damit die Geschwindigkeit wieder erhöhen. Eine genaue Einstellung ist nur für solche Sättigungszustände möglich, bei denen die Zunahmen $\Delta\Phi$ und $\Delta(\omega I)$ einander proportional sind. Die Schaltung ist dann genau dieselbe wie die des Doppelschluß-Generators; da aber beim Motor der Ankerstrom umgekehrte Richtung hat, so wirken hier die beiden Erregerwicklungen einander entgegen, und es kann bei starker Belastung der Motor gänzlich entmagnetisiert werden. Derartig geschaltete Motoren sind daher mit Vorsicht zu benutzen und werden selten angewendet.

Schaltet man zweitens die Reihenschlußwicklung so, daß sie die Nebenschlußwicklung unterstützt, so erhält man einen Motor, dessen Verhalten in der Mitte zwischen dem eines Nebenschluß- und eines Reihenschlußmotors steht. Seine Geschwindigkeitsschwankungen sind bei Belastungsänderungen daher größer als die des Nebenschlußmotors, andererseits ist sein Drehmoment weniger von der Spannung abhängig. Motoren dieser Art gestatten eine ziemlich weitgehende Regulierung der Geschwindigkeit ohne Anwendung von Widerständen im Ankerkreis. Sie ermöglichen ferner eine Generatorwirkung bei Antrieb durch die Last sowie ein sicheres Durchziehen großer Überlasten und finden daher hin und wieder Verwendung bei Walzenzugmaschinen, Fahrzeugbetrieb und dgl. Vgl. Hobart, Motoren, S. 155, Elektr. Bahnen u. Betriebe 1905, S. 632.

(447) **Benutzung verschiedener Betriebsspannungen** für den Ankerstromkreis zur Geschwindigkeitsregulierung von Gleichstrommotoren. Beim Nebenschluß- und fremderregten Motor bleibt die Erregung ungeändert. Während daher die Erregerwicklung mit konstanter Spannung gespeist wird, werden dem Anker verschieden große Spannungen zugeführt, z. B. durch Anschluß an die Außenleiter oder an eine Hälfte eines Dreileitersystems oder durch Anschluß an mehr oder weniger Zellen einer Akkumulatorenbatterie oder endlich durch Einfügung einer z. B. durch eine Hilfsmaschine erzeugten elektromotorischen Kraft in den Ankerkreis, die entweder die Spannung unterstützt oder ihr entgegenwirkt. Vgl. auch die Leonard-Schaltung (436).

(448) **Anlassen der Gleichstrommotoren.** Bei Stillstand ist die Gegen-EMK gleich Null; daher hat die volle Ankerspannung einen sehr starken Strom durch

den Anker und bei Nebenschlußmotoren eine Verringerung der Anzugskraft wegen des großen Spannungsabfalls auf den Zuleitungen zur Folge. Die Stromstärke muß daher im allgemeinen durch einen Widerstand — Anlasser — in den zulässigen Grenzen gehalten werden. Der Anlasser wird genau wie der Regulierwiderstand für die Geschwindigkeitsregulierung beim Reihenschlußmotor in den Hauptkreis und beim Nebenschlußmotor (Abb. 218) in den Ankerkreis geschaltet, er kann aber kleiner bemessen werden als jener Regulierwiderstand, da er nur kurze Zeit vom Strom durchflossen wird. Der Widerstand des Anlassers wird bei größeren Motoren in der Regel so gewählt, daß beim Einschalten nur ein Bruchteil der vollen Stromstärke, etwa ein Drittel, auftreten kann. Durch Abschalten der ersten Stufen wächst die Stromstärke, bis der Motor anläuft. Bei vollem Drehmoment erfolgt dies bei etwas größerer Stromstärke als der normalen

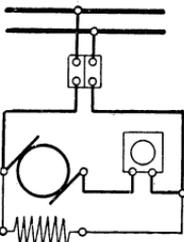


Abb. 218. Schaltung des Anlassers beim Nebenschlußmotor.

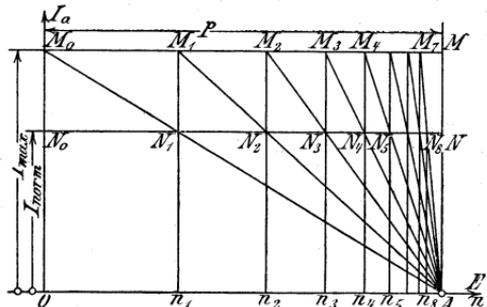


Abb. 219. Diagramm zum Anlassen des Nebenschlußmotors.

weil Beschleunigungsarbeit zu leisten und weil die Reibung der Ruhe erheblich ist; für geringere Drehmomente sind entsprechend geringere Stromstärken erforderlich. Sowie der Motor läuft, entsteht im Anker eine Gegen-EMK, die ein Sinken der Stromstärke veranlaßt. Die Geschwindigkeit steigt dabei so lange, bis die Ankerstromstärke den kleinsten Wert erreicht hat, bei dem das erforderliche Drehmoment noch vorhanden ist, während vorher das überschüssige Drehmoment zur Beschleunigung verwendet wurde.

Durch weiteres Ausschalten von Widerstand steigt I_a wieder, und so entsteht aufs neue ein überschüssiges Drehmoment, das wieder zur Beschleunigung verwendet wird. Der Motor nimmt daher fortgesetzt höhere Drehzahlen an, bis aller Widerstand ausgeschaltet ist.

Bei ganz kleinen Leistungen (Fächermotoren) kann man den Anlasser weglassen. Auch bei sehr großen Motoren, die dann zweckmäßig Fremderregung erhalten, kann der Anlasser unter Umständen wegleiben, wenn sie ohne Last anlaufen und nur geringe Trägheitsmomente vorhanden sind. Dies ist z. B. der Fall beim Antrieb von Schiffsschrauben (bei Unterseebooten). Die Selbstinduktivität verhindert ein allzu starkes Anwachsen der Stromstärke. Den Schalter kann man nach Linke mit Vorkontakt und Widerstandsstufe versehen. (Vgl. Trettin, ETZ 1912, S. 759. — Linke, ETZ 1918, S. 453.)

(449) Die Abstufung der Anlasser (Görges, ETZ 1894, S. 644; Elektr. Bahnen 1906, S. 249; Erens, ETZ 1899, S. 277) wird am besten so gewählt, daß jeder Stufe derselbe Sprung in der Stromstärke entspricht. Die Belastung möge die Ankerstromstärke I_{norm} verlangen, bei der der Beharrungszustand eintritt, die beim Abschalten auftretende größte Ankerstromstärke sei I_{max} . Letztere richtet sich nach der Stufenzahl und nach der gewünschten Beschleunigung des Ankers. Beim Nebenschlußmotor können wir Φ innerhalb der Grenzen I_{norm} und I_{max} als konstant ansehen. Mithin ist die EMK E einfach der Drehzahl n proportional.

Stellen daher die Abszissen einer Geraden AM , Abb. 219, z. B. AM_1 , die EMKE dar und OA die Betriebsspannung U , so ist bei normaler Stromstärke die EMK im Anker gleich N_0N_2 , der Spannungsverlust in dem den Anlaßwiderstand enthaltenden Ankerkreise N_2N , und die Drehzahl kann auch durch N_0N_2 dargestellt werden. Die Strecke OA entspricht dann der kritischen Drehzahl (439). Wird nun eine Stufe des Anlagers abgeschaltet, so steigt die Stromstärke auf $I_{max} = n_2M_2$. Das überschüssige Drehmoment vergrößert n und damit zugleich E , das längs der Geraden M_2A steigt, bis bei N_3 wieder der Beharrungszustand erreicht ist. Wie leicht zu sehen, ist

$$\frac{N_1N_2}{N_2N_3} = \frac{I_{max}}{I_{norm}} = \lambda.$$

Die Geschwindigkeitsstufen bilden daher eine geometrische Reihe. Die Widerstände des Ankerkreises einschließlich des Ankerwiderstandes selbst verhalten sich weiter wie die Spannungsverluste, also ist

$$\frac{R_a + R_1}{R_a + R_2} = \frac{N_1N}{N_2N} = \lambda,$$

wenn R_a der Ankerwiderstand, R_1, R_2, \dots die Anlaßwiderstände sind. Die Gesamtwiderstände und die Widerstandsstufen selbst wachsen also wie eine geometrische Reihe. Ist $NN_8 = R_a$, so ist $NN_7 = \lambda R_a$, $NN_6 = \lambda^2 R_a$ usw. Je mehr Stufen gewählt werden, um so geringer wird der Unterschied zwischen I_{max} und I_{norm} . Allgemein ist für m Stufen im ganzen, wenn zunächst beim Einschalten die Stromstärke I_{max} auftritt,

$$\lambda^m = \frac{U}{R_a I_{max}} \quad \text{oder} \quad \lambda = \sqrt[m]{\frac{U}{R_a I_{max}}},$$

woraus eine der beiden Größen λ und m zu berechnen ist, wenn die andere gegeben ist. Für 3% Spannungsverlust im Anker $\left(\frac{R_a I_{max}}{U} = 0,03\right)$ erhält man folgende Tabelle:

$m = 5$	10	15	20	25	30	40	60
$\lambda = 2,02$	1,42	1,26	1,18	1,15	1,12	1,092	1,060

Die letzten Stufen müssen kleiner als der Ankerwiderstand werden, eine Regel, gegen die sehr oft gefehlt worden ist.

(450) Abstufung des Anlagers beim Reihenschlußmotor. Es ist zu beachten, daß Φ_a mit I wächst. Es ist jetzt

$$E = c \cdot n \Phi_a$$

Für I_{norm} sei der Induktionsfluß Φ_{norm} . Hierbei ist

$$E_{norm} = c \cdot n \Phi_{norm} = c_1 \cdot n$$

Man kann daher wie vorher, wenn OA (Abb. 220) die Spannung U darstellt, E_{norm} und n durch die Abszissen einer Geraden AM , z. B. AM_1 , darstellen.

Bei I_{norm} stellt daher z. B. N_0N_2 die EMK und die Drehzahl, N_2N' den Spannungsverlust RI_{norm} in der Wicklung der Maschine und dem Anlaser dar. Wird nun eine Stufe des Anlagers abgeschaltet, so steigt die Stromstärke auf I_{max} und der Induktionsfluß auf Φ_{max} . Bei derselben Geschwindigkeit muß die EMK im Verhältnis Φ_{max}/Φ_{norm} steigen. Bestimmt man daher den Punkt P , für den

$$\frac{PM_0}{PN_0} = \frac{\Phi_{max}}{\Phi_{norm}}$$

zieht PN_2 und verlängert es bis zum Schnittpunkt M_2 mit M_0M' , so ist M_0M_2

die neue EMK. Nunmehr steigt aber die Geschwindigkeit, und die EMK wächst weiter bis N_0N_3 , wo bei der Stromstärke I_{norm} ein neuer Beharrungszustand eintritt.

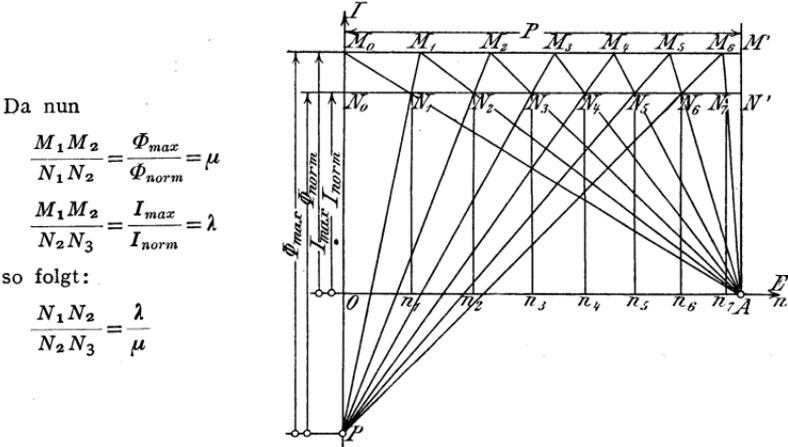


Abb. 220. Diagramm zum Anlassen des Reihenschlußmotors.

Demnach bilden die Geschwindigkeitsstufen wie in (449) eine geometrische Reihe. Bei geringer Sättigung fallen P und O zusammen, und μ wird gleich λ . Dann werden alle Stufen gleich groß. Bei großer Sättigung rückt P ins Unendliche, und Abb. 220 geht in Abb. 219 über. Die Abstufung ist dann genau wie beim Nebenschlußmotor.

Der dem Punkte N in Abb. 219 entsprechende Konvergenzpunkt der Abb. 220 fällt in die Verbindungslinie PA . Deshalb bilden die gesamten Widerstände hier keine geometrische Reihe, sondern nur die einzelnen Stufen. Aus einem Vergleich der Abb. 219 u. 220 erkennt man, daß bei einem Reihenschlußmotor bei Zulassung derselben Schwankungen in der Stromstärke viel weniger Stufen erforderlich sind, und ihre Abnahme viel geringer ist als beim Nebenschlußmotor.

Die bisher betrachteten Widerstände sind nur so groß, daß beim Einschalten sofort die maximale Stromstärke I_{max} auftritt. Dies ist aber in der Regel mit Rücksicht auf die Netzspannung unzulässig. Man muß daher noch eine Anzahl Stufen hinzufügen, so daß nur $1/5$ bis $1/3$ der vollen Stromstärke auftritt. Diese Stufen sind so zu bemessen, daß der Strom um gleiche Sprünge wächst.

(451) Bei Nebenschlußmotoren ist es wichtig, daß die Erregerwicklung beim Abstellen nicht unterbrochen wird, man wähle daher eine solche Schaltung, daß der Erregerkreis stets durch den Anker geschlossen bleibt, wie z. B. in Abb. 221. Eine Schleifkurbel verbindet den Zapfen Z und zwei auf einem Kreis einander gegenüberliegende Kontakte miteinander. In der Stellung AA ist der Motor ausgeschaltet, die Erregerwicklung durch W und den Ankerkreis geschlossen. In Stellung BB ist der Motor eingeschaltet und voll erregt, der Anker aber durch W vor zu starkem Strom geschützt. In Stellung CC sind die Feldmagnete voll erregt und W ganz abgeschaltet; dies entspricht der Stellung bei normalem Lauf. Statt des Zapfens wird besser eine besondere Kreisschiene für die Verbindung mit der Erregerwicklung ge-

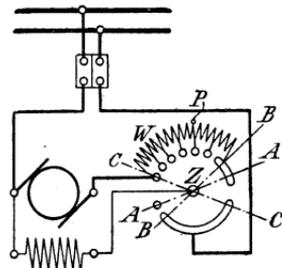


Abb. 221. Schaltung des Anlassers des Nebenschlußmotors.

Statt des Zapfens wird besser eine besondere Kreisschiene für die Verbindung mit der Erregerwicklung ge-

wählt. Einfacher, aber weniger gut ist es, die Erregerwicklung an einen Punkt P anzuschließen, der etwa der vollen Stromstärke im Anker bei Stillstand entspricht. Sowohl in der Stellung BB wie in der CC erhält dann die Erregerwicklung nicht ganz die volle Spannung, doch ist der Verlust im letzten Fall nicht erheblich, da der Anlaßwiderstand viel geringer ist als der Widerstand der Erregung.

Ausführliches über Anlasser und Regulierwiderstände (581) u. f.

Wechselstrommaschinen.

(452) Synchroner und asynchroner Generatoren. Die synchronen Generatoren überwiegen in der heutigen Praxis bei weitem. Sie bestehen in der Regel aus einem feststehend angeordneten Anker mit offenen, halboffenen oder geschlossenen Nuten und dementsprechend umlaufendem Feldmagnet. Als asynchrone Generatoren können Induktions- und auch Kommutatormotoren benutzt werden (543, 553, 561). Maßgebend für den Bau eines Synchrongenerators ist die Stromart, die Leistung, die Spannung, die Frequenz, der durch die Belastung bestimmte Leistungsfaktor und die Geschwindigkeit. Die Bauart der Einphasenstrom-, Zweiphasen-, Drehstrom-, usw. Maschinen ist äußerlich dieselbe, der Unterschied liegt nur in der Wicklung und deren Schaltung.

(453) Drehzahl und Polzahl. Die Drehzahl ist bei synchronen Wechselstrommaschinen nicht beliebig, vielmehr bei gegebener Frequenz durch die Polzahl festgelegt, die stets gerade sein muß. Aus der Gleichung für die Frequenz

$$f = p \cdot \frac{n}{60}$$

folgt für die Drehzahlen bei gegebener Frequenz

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

und bei gegebener Frequenz und Drehzahl die Polzahl

$$p = \frac{60 \cdot f}{n}$$

Als normale Umdrehungszahlen hat der VDE die in den Normalien angegebenen empfohlen. Abweichungen sind aber infolge der Verschiedenartigkeit der Antriebsmaschinen unvermeidlich.

Bei großen Maschinen ist es der Zerlegbarkeit wegen zu empfehlen, daß die Polpaarzahl p durch 4 teilbar sei.

(454) Der Blechschnitt des Ankers wird einheitlicher Fabrikation wegen meist so entworfen, daß die Nutenzahl durch drei teilbar ist; solche Schnitte sind zugleich für Drehstrom- und Einphasenmaschinen geeignet. Für letztere stellt man auch besondere Schnitte her, bei denen, wenn es sich um vielpolige Maschinen handelt, zur bequemeren Einlegung der Ankerspulen die Nuten für je zwei Spulenseiten einer Spule parallel gestellt werden können.

Die Zahl der Nuten kann um so größer gewählt werden, je größer die Umfangsgeschwindigkeit und je geringer die Frequenz ist. Man nimmt bei Drehstrom mindestens 12 Nuten für je ein Polpaar, bei Turbodynamos 30 und mehr. Große Nutenzahl ist für Erzeugung einer möglichst sinusartigen Kurve der elektromotorischen Kraft und für geräuschlosen Gang der Maschine günstig; sie beeinträchtigt aber den für Isolation verfügbaren Raum und ist daher bei Maschinen für sehr hohe Spannung im allgemeinen um so weniger anwendbar, je höher die Frequenz ist.

Die Nutenformen, vgl. (365), Abb. 164 und 165 werden sehr verschieden gewählt. Die bei weitem bequemste und sauberste Fabrikation gestatten

ganz offene Nuten; sie bedingen aber lamellierte Polschuhe, weil andernfalls die Verschiedenheit der magnetischen Induktion, die unter den Zähnen größer und unter den Nuten geringer ist, starke Wirbelströme in den Polschuhen erzeugt. Offene Nuten vergrößern ferner den Widerstand für den Übergang des Induktionsflusses von den Polen zum Anker durch die Luft und begünstigen endlich die Bildung von unerwünschten Oberschwingungen in dem periodischen Verlauf von Strom und Spannung. Wenn die radiale Tiefe des Luftspaltes gering ist, zeigen sich alle diese Einflüsse in empfindlicherer Weise und sind dann nur durch Anordnung relativ sehr großer Nutenzahlen zu beheben. Ganz geschlossene und halb geschlossene Nuten sind in magnetischer Hinsicht und auch bezüglich der Fabrikation ziemlich gleichwertig, sie gestatten, den Induktionsfluß sehr gleichförmig im Luftspalt zu verteilen, schließen übermäßige Wirbelstrombildung in den Polschuhen aus, wenn sie sie auch nicht beseitigen, und erzeugen, solange die Zahnsättigung mäßig ist, Oberschwingungen in geringerem Maße. Der Eisenpfad, der an der der Bohrung zugekehrten Seite der ganz geschlossenen Nut stehen bleibt, erhöht die Ankerstreuung. Wird aber die Nut, wie bei halb geschlossener Ausführung, geschlitzt, wodurch zugleich vom Stanzen herrührende Materialspannungen beseitigt werden, so ist bei geeigneter Ausführung der Zahnköpfe, wie in

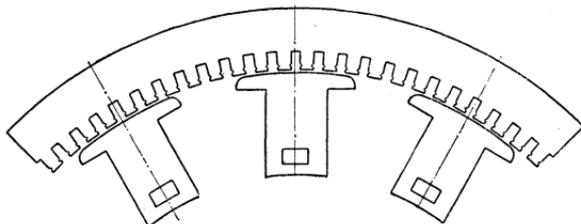


Abb. 222. Blechschnitt einer Wechselstrommaschine.

Abb. 164 c, die Ankerstreuung nicht bedenklich. Die halb geschlossenen Nuten sind daher sehr beliebt. Sie haben aber den namentlich bei vieldrätigen Wicklungen fühlbaren Nachteil, daß die Wicklung nur in umständlicher Weise in die Nuten gebracht („genäht“) werden kann (361).

Die Nutenbreite ergibt sich aus dem für Wicklung und Isolation erforderlichen Raum; sie darf nur so groß gewählt werden, daß die stehenbleibenden Zähne genügende mechanische Festigkeit für das Stanzen und etwaiges Ausdrehen des Ankers (wird meist nicht vorgenommen) und ausreichenden Querschnitt für den Durchgang des Induktionsflusses behalten. Die magnetische Induktion in den Zähnen ist dabei durch Rücksichten auf die Eisenverluste gegeben und wird bei Leerlauf und der für Beleuchtung üblichen Frequenz von 50 Per/s gegenwärtig zu 16 000 bis 18 000 Gauß ankommen; bei belasteter Maschine kann sie dann erheblich höher werden (463).

Das Verhältnis der Nutentiefe zur Nutenbreite darf ziemlich groß gewählt werden, doch wächst mit der Tiefe die Ankerstreuung. Zugleich wächst damit die Möglichkeit, daß sich bei größeren Drahtquerschnitten und besonders bei Stabwicklung die Stromstärke ungleichmäßig über den Querschnitt verteilt (Stromverdrängung), was eine Erhöhung der Stromwärmeleistung zur Folge hat. Um dem zu begegnen, wendet man die in (408) angegebenen Mittel an.

(455) Pole. Als Normalform für die Pole hat sich die der Abb. 160 a bis f herausgebildet, soweit nicht genutete Zylinder, wie bei Turbodynamos, Abb. 161 und 162 in Frage kommen. Nach Möglichkeit gibt man den Polschäften runden oder quadratischen Querschnitt, vgl. (415). Die Polschuhform ist in erster Linie für den Verlauf der EMK, der möglichst einem Sinusgesetz folgen soll, maßgebend.

Dazu werden die Polkanten zweckmäßig abgerundet, um plötzliches Anwachsen des Induktionsflusses in den einzelnen Zähnen zu verhüten. Von großer Bedeutung ist das Verhältnis des Polschuhbogens β zur Teilung τ , d. h. dem Abstand der Mittellinien zweier aufeinander folgender Pole. Ist β zu klein, so wird bei gegebenem Induktionsfluß die Sättigung in den Ankerzähnen zu groß; ist β zu groß, so ist die Streuung zwischen einander benachbarten Polhörnern sehr bedeutend. Aus diesen Erwägungen heraus wird das Verhältnis $\beta : \tau$ vielfach etwa gleich $2 : 3$ gewählt. Die Polschuhe werden fast stets, die Polschäfte häufig aus Blechen hergestellt. Es genügen dafür Bleche von 1 mm Stärke.

(456) Ankerwicklungen. Bei den üblichen Innenpolmaschinen liegt die Ankerwicklung als Hohlstrommelwicklung auf der Innenseite des ringförmigen Ankerkörpers, bei Außenpolmaschinen an der äußeren Oberfläche des Ankerkörpers. Man unterscheidet ein- und zweischichtige Wicklungen, Abb. 226 und 225. Letztere kommen besonders bei Stabwicklung vor. Bei den einschichtigen Wicklungen muß die Nutenzahl eine gerade sein. Meistens ist die Zahl der Nuten je Pol und Zweig eine ganze — ganzzahlige oder Ganzlochwicklungen — sie kann aber auch eine gebrochene sein — Bruch-, Bruchloch- oder Teillochwicklungen.

(457) Normale (Ganzloch-)Drehstromwicklungen. Das Schema zeigen Abb. 223 u. 224, erstere mit 1 Nut für 1 Zweig und 1 Pol — einfache Nutenzahl —, letztere mit 3 Nuten für 1 Zweig und 1 Pol — dreifache Nutenzahl. Allgemein sprechen wir bei i Nuten für 1 Zweig und 1 Pol von i -facher Nutenzahl. Setzt man die

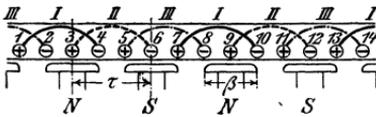


Abb. 223. Drehstromwicklung mit einfachen Nuten.

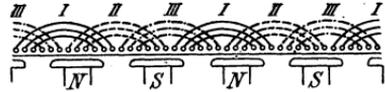


Abb. 224. Drehstromwicklung mit dreifachen Nuten.

Teilung gleich τ , so liegt der Anfang des Stromzweiges II um $\frac{2}{3} \tau$ hinter dem Stromzweig I und der Anfang des Stromzweiges III wieder um $\frac{2}{3} \tau$ hinter dem Stromzweig II. Laufen die Pole nach rechts um, so entsteht daher die eingeschriebene Zählung I II III I II III. Wird die Umlaufrichtung der Pole umgekehrt, so kehrt sich auch die Reihenfolge der Stromzweige um. Bezeichnet man die linken Seiten der Spulen mit dem Pluszeichen, die rechten Seiten mit dem Minuszeichen, so folgen in den Nuten aufeinander (Abb. 223), $+I - III + II - I + III - II + I - III$ usw. An den Stirnseiten liegt abwechselnd eine Spule oder Spulengruppe höher, d. h. weiter vom Ankereisen entfernt, die nächste tiefer, also z. B. I höher, II tiefer, III höher, I tiefer, II höher, III tiefer usw. Bei Ausführung der Wicklung als Phasenwicklung mit Spulen oder Stäben ergibt sich, wenn die Zahl der Polpaare ungerade ist, die Notwendigkeit, eine Spule unsymmetrisch auszuführen (verschränkte Spule), d. h. sie zum Teil höher, zum Teil tiefer zu legen.

Abb. 225 und 226 zeigen schematisch einige Stabwicklungen. Wenn zwei Stäbe in einer Nut liegen, so kann man die Wicklung in überaus regelmäßiger Form nach Abb. 225 ausführen, die der Abb. 177 entspricht. Man muß sich die stark ausgezogenen Stäbe z. B. jedesmal oben, die schwach ausgezogenen unten liegend denken. Ist die Zahl der Nuten für einen Stromzweig und Pol ungerade, so kann man die Wicklung mit einem Stab in der Nut nach Abb. 226 ausführen. Die geringste Nutenzahl ist demnach 6 für ein Polpaar, sie wird aber sehr selten gewählt, weil die Ankerstreuung dabei sehr groß wird und die Maschinen stark brummen. Man wählt, wie schon bemerkt, lieber 12 bis 30 Nuten auf ein Polpaar.

Bei großen Maschinen ist es wichtig, die Wickelköpfe, d. h. die aus dem Eisen herausragenden Teile der Spulen, durch starke Klammern in ihrer Lage festzuhalten, weil sie schon im normalen Betriebe, noch viel mehr aber bei Kurzschlüssen von sehr starken elektrodynamischen Kräften angegriffen werden (Abb. 299 bis 306).

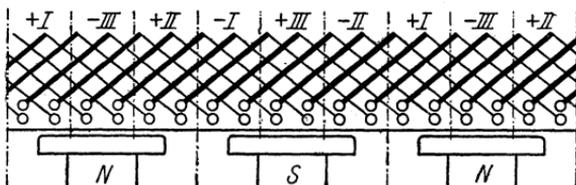


Abb. 225. Zweischichtige Drehstromstabwicklung, 2 Stäbe/Nute, zweifache Nuten.

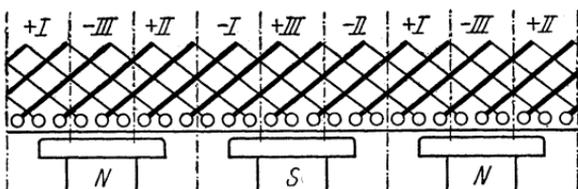


Abb. 226. Einschichtige Drehstromstabwicklung, 1 Stab/Nute, dreifache Nuten.

(458) Bruch- (Bruchloch-, Teilloch-) wicklungen. Bei ihnen ist die Zahl der Nuten je Pol und Zweig i keine ganze Zahl. Bei ihrem Entwurf bedient man sich zweckmäßig des Nutensternes (R. Richter, Arch. f. El., Bd. 8, 1919, S. 214 — R. Richter, Ankerwicklungen für Gleich- u. Wechselstrommasch. S. 211 ff.), zu dem wir durch folgende Überlegungen gelangen. Aus dem allgemeinen Induktionsgesetz $e = -d\Phi/dt$ folgt bei der Verschiebung eines Elementes, dessen Öffnung $y_1 = b$ ist, um dx mit $d\Phi = d\Phi_1 + d\Phi_2$ und $d\Phi_1 = -\mathfrak{B}_x l dx$, $d\Phi_2 = +\mathfrak{B}_{x+b} l dx$

$$e = (\mathfrak{B}_x - \mathfrak{B}_{x+b}) l \frac{dx}{dt} = \mathfrak{B}_x l v - \mathfrak{B}_{x+b} l v.$$

Man schreibt daher jeder Spulenseite eine EMK, $\mathfrak{B}_x l v$ und $\mathfrak{B}_{x+b} l v$ zu und stellt diese unter der Annahme, daß sich \mathfrak{B} längs des Ankerumfangs nach einem Sinusgesetz ändert, durch zwei Vektoren dar, deren geometrische Differenz die EMK des Elementes ergibt. Man erhält somit für jede Nute einen Vektor. Ihre Gesamtheit bildet einen regelmäßigen Stern, den Nutenstern. Sind Nutenzahl m und Polpaarzahl p teilerfremd, so kommen nirgends zwei Vektoren miteinander zur Deckung, haben sie dagegen t als größten Teiler gemein, so fallen je t Vektoren zusammen. Der Abstand zweier benachbarter Nuten voneinander ist räumlich gemessen gleich $360^\circ : (m/t) = t \cdot 360^\circ / m$, der Abstand der zugehörigen Vektoren voneinander elektrisch gemessen p mal so groß, also $pt \cdot 360^\circ / m$. Man bildet nun bei Drehstrom sechs (bei Zweiphasenstrom vier) gleiche Gruppen von Vektoren, deren Richtungen möglichst geringe Winkel miteinander einschließen — die Zahl der Nuten m muß dazu bei einschichtigen Wicklungen durch 6 (4), die der ungleichphasigen Vektoren durch 3 (4) teilbar sein — und kombiniert je zwei einander gegenüberliegende Gruppen derart miteinander, daß die der einen Gruppe zugehörigen Nuten die Hinführungen, die der anderen zugehörigen die Rückführungen der Wicklungselemente enthalten. Diese bildet man so, daß die Stirnverbindungen möglichst kurz ausfallen. Die Spulen jeder Gruppe können, wenn ihre EMKe gleiche Phasen haben, parallel, im anderen Falle müssen sie in Reihe geschaltet werden. Man kann auch einzelne Nuten — bei Drehstrom drei

oder ein Vielfaches davon — unbewickelt lassen, wodurch sich unter Umständen eine größere Regelmäßigkeit der Wicklung ergibt. B e i s p i e l: Nutenzahl $m = 30$, Polpaarzahl $p = 2$, Nutenzahl je Pol und Zweig bei Drehstrom $i = m/6p = 2,5$. Der Nutenstern, Abb. 227, hat 15 ungleichphasige Vektoren, weil m und p den

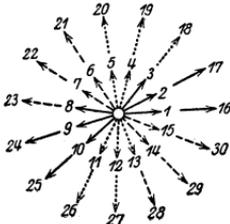


Abb. 227. Nutenstern.
 $m=30, p=2, i=2,5$.

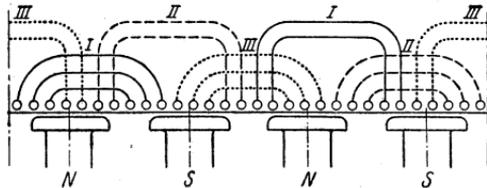


Abb. 228. Bruchwicklung.
 $m=30, p=2, i=2,5$.

gemeinsamen Teiler 2 haben. Wir teilen nun den einzelnen Zweigen, indem wir, um bei zweimaligem Umgang eine möglichst gleichmäßige Verteilung zu erzielen, jedesmal um zweimal 120° , d. h. um 10 Vektoren, weitergehen, um zum nächsten Zweige zu gelangen, folgende Vektoren zu:

Zweig	I	III	II
Hinführung	1, 2, 3, 16, 17	11, 12, 13, 26, 27	21, 22, 23, 6, 7
Rückführung	8, 9, 10, 24, 25	18, 19, 20, 4, 5	28, 29, 30, 14, 15

Hiermit ergibt sich die Abwicklung Abb. 228.

Der Vorteil der Bruchwicklungen besteht darin, daß die Oberschwingungen in der EMK weniger stark auftreten, ihr Nachteil darin, daß die Ankerrückwirkung unregelmäßiger ausfällt als bei den ganzzahligen Wicklungen (R a s c h, ETZ 1912, S. 7).

(459) Stern- und Dreieckschaltung. Zunächst sind genau die drei Anfänge und die drei Enden der Zweige festzustellen. Schaltet man z. B. die Spulen je eines Zweiges hintereinander, so kann man als die Anfänge die Zuführungen zu drei Nuten ansehen, die in Abständen von je $\frac{2}{3}\tau$ aufeinander folgen, z. B. in Abb. 223 in Abb. 224 die zu der ersten, siebenten und dreizehnten Nut. Die drei Enden ergeben sich dann von selbst. Bei der Sternschaltung werden nun die drei Enden zu einem Nullpunkt O, miteinander verbunden und die drei Anfänge A_1, A_2, A_3 zu den Klemmen geführt, Abb. 229. Bei der Dreieckschaltung wird E_1 mit A_2, E_2 mit A_3, E_3 mit A_1 verbunden, dabei werden die drei Verbindungspunkte zu den Klemmen geführt, Abb. 230. In den Schaltungen werden die drei Zweige in der Regel mit 120° Verstellung gegeneinander,

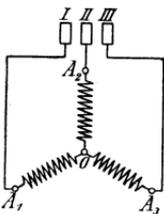


Abb. 229. Sternschaltung.

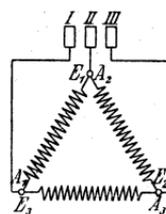


Abb. 230. Dreieckschaltung.

entsprechend den Phasenverschiebungen der EMKe in ihnen, gezeichnet; es ergibt sich dann in Abb. 229 ein Stern, in Abb. 230 ein Dreieck.

Die Größe der drei Spannungen zwischen den Klemmen A_1 und A_2, A_2 und A_3, A_3 und A_1 heißt schlechthin die Drehstromspannung; die Größe der

bei der Sternschaltung auftretenden Spannungen zwischen dem Nullpunkt 0 und je einer der Klemmen A_1, A_2, A_3 ist das $1/\sqrt{3}$ fache jener Spannungen und heißt die Sternspannung. Bei der Dreieckschaltung ist die Stromstärke schlechthin die Stärke der von den Klemmen nach außen führenden Ströme; in den drei Zweigen $A_1 E_1, A_2 E_2, A_3 E_3$ fließen Ströme, deren Stärke das $1/\sqrt{3}$ fache jener Stromstärken ist.

Die Leistung der Drehstrommaschine ist bei gleicher Belastung der drei Zweige $\sqrt{3} \cdot UI \cos \varphi$, wenn U die Klemmenspannung, I die äußere Stromstärke und φ die Phasenverschiebung zwischen der Spannung und der Stromstärke in jedem Zweige ist.

(460) Die **Wicklung der Zweiphasenmaschinen** besitzt zwei Spulengruppen, die um eine halbe Polteilung, d. h. um 90 elektrische Grade gegeneinander verschoben sind. Die **Wicklung der Einphasenmaschinen** wird wie die der Drehstrom- oder die der Zweiphasenmaschinen ausgeführt, indem man einen Zweig wegläßt — man kann dann die Wicklung immer wieder zu einer Mehrphasenwicklung ergänzen — oder die Stirnverbindungen werden so ausgeführt, daß die Überkreuzungen wegfallen. Im letzteren Falle, der weniger Wicklungsmaterial erfordert, erhält man kurze Spulen. Abb. 231 a zeigt die erste, Abb. 231 b die zweite Art der Wicklung.

Die Leistung der Zweiphasenmaschine ist $2 UI \cos \varphi$, wenn sich U und I auf je einen der Stromkreise beziehen; die der Einphasenmaschine $UI \cos \varphi$. Bei gleicher Größe und Drehzahl leistet die Einphasenmaschine etwa 70% von dem der Mehrphasenmaschine.

(461) **Geschlossene umlaufende Wicklungen.** Die zwischen zwei fest mit einer umlaufenden Kommutatorwicklung verbundenen Punkten induzierte EMK wird ebenfalls durch die in (406) entwickelten Gleichungen (3) und (5) dargestellt, in denen jetzt ϑ_1 und ϑ_2 sowie Φ' und Φ'' von der Zeit abhängig sind. Ist das Feld konstant, aber nach einem Sinusgesetz längs des Umfangs des Ankers verteilt, so kann man

$$\Phi' = \Phi_0 \sin \vartheta_1, \quad \Phi'' = \Phi_0 \sin \vartheta_2$$

und daher

$$e'' = - \frac{n}{60} \frac{p}{a} w_{ges} \Phi_0 (\sin \vartheta_2 - \sin \vartheta_1) 10^{-8} \text{ Volt}$$

setzen. Mit

$$\frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{2} = \frac{\vartheta_0}{2}, \quad \frac{\vartheta_2 + \vartheta_1}{2} = \frac{\vartheta_0}{2} + \vartheta_1$$

und

$$\vartheta_1 = p \frac{2\pi n}{60} \cdot t = 2\pi f \cdot t$$

wird

$$e'' = - \frac{n}{60} \frac{p}{a} w_{ges} \Phi_0 10^{-8} \cdot 2 \sin \frac{\vartheta_0}{2} \cos \left(2\pi f \cdot t + \frac{\vartheta_0}{2} \right)$$

$2 \sin \frac{\vartheta_0}{2}$ ist aber gleich der zu dem Winkel ϑ_0 in einem Kreise mit dem Radius 1 gehörenden Sehne. Man kann daher die in einem zwischen den räumlichen Winkeln ϑ_1/p und ϑ_2/p gelegenen Wicklungsteil induzierte EMK nach Größe und Phase durch die zu dem Winkel $\vartheta_0 = \vartheta_2 - \vartheta_1$ gehörende Sehne eines Kreises darstellen, dessen Durchmesser die größtmögliche Amplitude

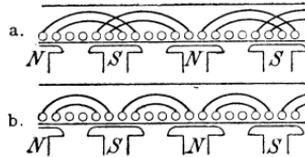


Abb. 231 a. Einphasenwicklung mit übergreifenden Spulen.

Abb. 231 b. Einphasenwicklung mit kurzen Spulen.

$$E''_0 = \frac{n}{60} \frac{p}{a} w_{ges} \Phi_0 10^{-8} \text{ Volt}$$

mißt.

Hieraus ergibt sich, daß man aus geschlossenen Kommutatorwicklungen ohne weiteres Einphasenstrom, Zweiphasenstrom, Drehstrom und allgemein n -Phasenstrom entnehmen kann. Man macht hiervon besonders bei den Einanker-Umformern (570) Gebrauch.

(462) Aufgeschnittene Wicklungen. (Vgl. Ossanna, Über Schaltungen mit aufgeschnittenen Gleichstromwicklungen. Z. f. E. 1899, S. 347.) Die geschlossenen Wicklungen lassen keine Hintereinanderschaltung von Wicklungsteilen mit EMKen gleicher Phase zu und ergeben auch ungünstige Drehstromwicklungen, da stets (Trommelwicklung vorausgesetzt) Drähte neben- oder übereinander liegen, die Ströme verschiedener Phase zu führen haben. Dies läßt sich durch Aufschneiden der Wicklung vermeiden, zugleich ist dann die Hintereinanderschaltung und die Sternschaltung möglich. Abb. 232 zeigt eine an zwei Schleifringe angeschlossene, aufgeschnittene Wicklung für Einphasenstrom mit zwei in Reihe geschalteten Teilen. Die geschlossene Wicklung gibt z. B. bei zwei Polen zwischen drei gleich weit von einander verteilten Punkten die Spannungen AB , BC und CA , Abb. 233; wird sie aber sechsmal aufgeschnitten und nach

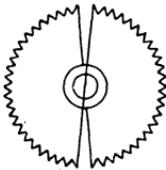


Abb. 232. Aufgeschnittene Einphasenwicklung.

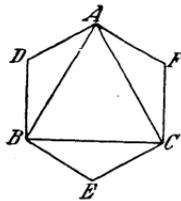


Abb. 233. Spannungsdiagramm der Drei- und der Sechsphasenwicklung.

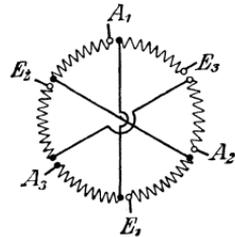


Abb. 234. Aufgeschnittene Dreiphasenwicklung.

Abb. 234 geschaltet, die drei Spannungen $(AD + CE)$, $(BE + AF)$, $(CF + BD)$. Die Leistungen der Maschine verhalten sich bei gleicher Stromstärke wie AB zu $(AD + CE)$. Die drei Zweige A_1E_1 , A_2E_2 und A_3E_3 können nach Belieben in Dreieck oder Stern geschaltet werden. Bei mehrpoligen Maschinen mit Reihenschaltung schneidet man die Wicklung ebenfalls an sechs Stellen auf (schleichende Wicklung); bei Parallelschaltung ist für jedes Polpaar eine Zerlegung in sechs Teile erforderlich, von denen die elektrisch gleichwertigen nach Belieben parallel oder hintereinander geschaltet werden können.

(463) Ankerrückwirkung. Die Ankerströme erzeugen bei Mehrphasenstrom ein Drehfeld, das synchron mit den Feldmagneten umläuft. Der Höchstwert der Anker-Durchflutung für zwei Pole schwankt bei Drehstrom (510) zwischen $\frac{2}{3} \sqrt{2} \cdot w_a I_a$ und dem $\frac{1}{2} \sqrt{3}$ fachen hiervon. w_a ist die Windungszahl für ein Polpaar. Der Mittelwert hieraus ist $0,88 w_a I_a$. Die entmagnetisierende Wirkung der Ankerströme hängt von der Phasenverschiebung $\vartheta = \varphi + \alpha$ (473) zwischen E_λ und I_a ab und ist am größten, wenn $\vartheta = 90^\circ$. Dabei ist φ die Phasenverschiebung zwischen der Klemmenspannung U und dem Strom, α die Voreilung der EMK E_λ , die bei Leerlauf bei unveränderter Erregung auftritt, vor der Klemmenspannung. Bei $\vartheta = 0^\circ$, ein Fall, der im allgemeinen nur bei einer Phasenvoreilung, also bei negativem φ auftritt, wirken die Ankerströme auf der voreilenden Hälfte des Poles schwächend, auf der anderen verstärkend, Abb. 235 (Quermagnetisierung). Nur

bei geringer Sättigung in den Zähnen wird dann auch die Induktion in demselben Maße geändert, der gesamte Induktionsfluß bleibt in diesem Falle unverändert. Es ändert sich jedoch der zeitliche Verlauf der EMK und ihr Mittelwert. Bei größerer Sättigung überwiegt die Abschwächung. Ebenso überwiegt die Abschwächung, wenn I eine nacheilende Phasenverschiebung gegen U besitzt. In Abb. 235 sind die Feldstärken unter der Annahme aufgetragen, daß die Sättigung gering ist. Man hat dann für einen Pol

$$\mathfrak{H}_f = \frac{0,4 \pi \cdot w_f I_f}{2 \delta} = 0,628 \frac{w_f I_f}{\delta} \quad \text{und} \quad \mathfrak{H}_{amax} = \frac{0,4 \pi \cdot 0,88 w_a I_a}{2 \delta} = 0,55 \frac{w_a I_a}{\delta}$$

und für den gesamten Induktionsfluß eines Poles

$$\Phi_{Lw/t} = \beta l \cdot \mathfrak{H}_f \cdot \left[1 - \frac{\mathfrak{H}_{amax}}{\mathfrak{H}_f} \cdot \frac{\sin \frac{\beta}{2\tau} \pi}{\frac{\beta}{2\tau} \pi} \cdot \sin \vartheta \right]$$

w_a und w_f sind die Windungszahlen für ein Polpaar auf dem Anker und auf den Feldmagneten, β der Polschuhbogen in cm, l die axiale Länge des Polschuhes in cm, δ die Dicke des Luftspaltes in cm, τ die Polteilung in cm.

Bei stärkerer Sättigung kann man diese Abbildung als erste Annäherung für die Verteilung des Induktionsflusses ansehen. Zu einer genaueren Bestimmung hat man nunmehr die Induktion der einzelnen Induktionsröhren in der Luft nach dem Hopkinsonschen Verfahren zu bestimmen (vgl. 390).

(464) Das Ankerfeld bei

Einphasenstrom ist pulsierend. Man kann es in zwei gegensinnig mit gleicher Geschwindigkeit umlaufende Drehfelder von je der halben Stärke zerlegen. Das mit den Feldmagneten umlaufende Feld wirkt genau so wie vorher beschrieben. Das gegensinnig laufende Feld ruft Pulsationen im Magnetismus hervor, deren Frequenz doppelt so groß wie die des erzeugten Wechselstromes ist. Die Pulsationen werden durch die Erregerwicklung und durch massives Eisen der Feldmagnete gedämpft, sind aber noch so stark, daß sie an den Pulsationen des Erregerstromes erkannt werden können, und wirken auch auf die Kurvenform der EMK im Anker zurück, indem sie Oberschwingungen erzeugen. Ihr Einfluß auf den Effektivwert der EMK verschwindet bei geringer Sättigung, während bei stärkerer Sättigung wieder die Abschwächung überwiegt. Die Gesamtwirkung des Ankerstromes auf den Spannungsabfall ist dann nahezu ebenso groß wie in dem Falle, daß aus der Maschine Drehstrom von derselben Stärke entnommen wird. Ist der Erregerkreis offen, so ruft das Ankerfeld bei Drehstrom bei Stillstand und geringer Geschwindigkeit, bei Einphasenstrom bei jeder Geschwindigkeit hohe Spannungen im Erregerkreise hervor, die schon bei sehr kleinen Maschinen eine lebensgefährliche Höhe erreichen und außerdem die Isolation stark gefährden.

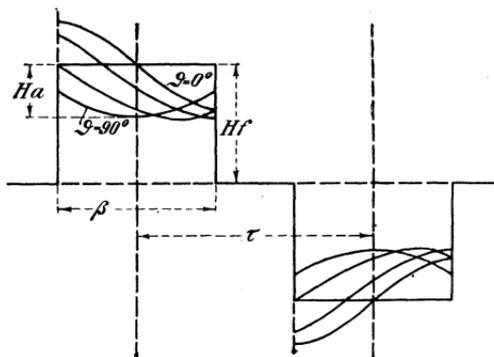


Abb. 235. Diagramm der Ankerückwirkung.

(465) Die **Dämpfungswicklung** nach *Leblanc* dient dazu, die durch das gegenläufige Ankerfeld hervorgerufenen Pulsationen zu dämpfen. Sie besteht aus starken Kupferbolzen, die nahe der Peripherie parallel zur Welle durch die Polschuhe gezogen und auf beiden Seiten am besten sämtlich oder, soweit sie einem und demselben Polschuh angehören, durch starke Kupferstücke gut leitend miteinander verbunden sind. Eine solche Dämpfungswicklung wirkt daher in dreifacher Hinsicht günstig: sie vermindert den Spannungsabfall bei Belastung, beseitigt die Oberschwingungen in der Kurve der EMK und verhütet endlich das Auftreten hoher Spannungen in dem Erregerkreise bei Kurzschlüssen des Ankerkreises, wie sie besonders heftig im Bahnbetriebe auftreten (vgl. *Punga*, ETZ 1906, S. 837). *Pichelmayer* (ETZ 1910, S. 161) schlägt vor, einen gleichmäßig bewickelten Zylinder mit einer in sich geschlossenen Wicklung als Feldmagnet zu nehmen. Der Erregerstrom wird durch Schleifringe an Stellen zugeführt, die um 2τ voneinander entfernt sind, während die mitten zwischen diesen liegenden Punkte durch einen Querkurzschluß miteinander verbunden werden.

(466) **Vorausberechnung der Kurve und des effektiven Mittelwertes der EMK bei ganzzahligen Wicklungen.** Es gilt wieder wie in (458) für den Augenblickswert der EMK einer Windung

$$\varepsilon = (\mathfrak{B}_x - \mathfrak{B}_{x+b})vl \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

\mathfrak{B}_x und \mathfrak{B}_{x+b} sind die Werte der magnetischen Induktion an den Stellen, wo sich augenblicklich die beiden Seiten der Windung befinden. Die Werte von \mathfrak{B} sind z. B. aus einer Kurve der Verteilung der magnet. Induktion im Luftraum zu entnehmen. Ist die magnet. Induktion von Zahn zu Zahn bekannt, so kann man als Wert von \mathfrak{B} für eine Nut den Mittelwert der magnet. Induktionen in den beiden sie einschließenden Zähnen ansehen. Haben w_1 Windungen immer die gleiche EMK ε_1 , w_2 Windungen die gleiche EMK ε_2 usw., so ist der Augenblickswert der EMK aller in Reihe geschalteten Windungen $e = w_1 \varepsilon_1 + w_2 \varepsilon_2 + w_3 \varepsilon_3 + \dots$ und der effektive Mittelwert

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}$$

Hiernach kann man für jede Verteilung der magnet. Induktion und jede Verteilung der Windungen die EMK berechnen.

(467) **Die EMK bei Leerlauf.** Bei Leerlauf kann man \mathfrak{B} über die ganze Polfläche als konstant ansehen. Sind alle Pole gleichmäßig erregt, so ist

$$\mathfrak{B}_{x+\tau} = -\mathfrak{B}_x$$

und für eine Windung einer langen Spule ($b = \tau$) daher

$$\varepsilon = 2\mathfrak{B}_x vl \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

Solange die Seiten der Windung unter den Polen liegen, hat die EMK den Wert

$$\varepsilon_0 = 2\mathfrak{B} vl \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

solange sie zwischen den Polen liegen, den Wert Null. Mit

$$\mathfrak{B}l = \frac{\Phi}{\beta} \quad v = \frac{2\pi r n}{60} = \frac{2\pi r f}{p} \quad \tau = \frac{\pi r}{p}$$

kann man auch schreiben

$$\varepsilon_0 = \frac{4f\Phi}{\beta/\tau} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

Bei gleichförmig verteilten Nuten kann man das Integral für E durch eine Summe ersetzen. Enthält z. B. eine Drehstromwicklung bei i -fachen Nuten auf die Polteilung $3i$ Nuten, so kann man

$$dt = \Delta t = \frac{T/2}{3i} = \frac{T}{6i}$$

und daher

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{T}{6i} \cdot \sum_0^T e^2} = \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \frac{T}{6i} \cdot \sum_0^{T/2} e^2} = \sqrt{\frac{1}{3i} \cdot \sum_0^{T/2} e^2}$$

setzen. Liegen in allen Nuten gleich viel Drähte, so ist $w_1 = w_2 = \dots = w_i = w_z/i$, wenn w_z die Windungszahl eines Zweiges für ein Polpaar ist. Daher wird für einen Zweig A

$$e_A = \frac{w_z}{i} \varepsilon_1 + \frac{w_z}{i} \varepsilon_2 + \dots + \frac{w_z}{i} \varepsilon_i = \frac{w_z}{i} \cdot \Sigma \varepsilon_a$$

Sind zwei Zweige A und B in Stern geschaltet, so ist

$$e_Y = \frac{w_z}{i} \cdot (\Sigma \varepsilon_a - \Sigma \varepsilon_b)$$

Daher werden die effektiven Mittelwerte

$$E_A = \frac{w_z}{i} \cdot \sqrt{\frac{1}{3i} \Sigma (\Sigma \varepsilon_a)^2} \quad \text{und} \quad E_Y = \frac{w_z}{i} \cdot \sqrt{\frac{1}{3i} \Sigma (\Sigma \varepsilon_a - \Sigma \varepsilon_b)^2}$$

Bei Zweiphasenstrom hat man $2i$ für $3i$ zu setzen.

Beispiel. Drehstromwicklung, lange Spulen, 12 Nuten auf ein Polpaar, also $i=2$, $\beta/\tau=2/3$, Abb. 236.

$t_1 - t_2$ T	ε_{a1} ε_0	ε_{a2} ε_0	ε_{b1} ε_0	ε_{b2} ε_0	$\Sigma \varepsilon_a$ ε_0	$\Sigma \varepsilon_b$ ε_0	$(\Sigma \varepsilon_a)^2$ ε_0^2	$\Sigma \varepsilon_a - \Sigma \varepsilon_b$ ε_0	$(\Sigma \varepsilon_a - \Sigma \varepsilon_b)^2$ ε_0^2
0 - 1/12	1	0	0	1	1	1	1	0	0
1/12 - 2/12	1	1	0	0	2	0	4	2	4
2/12 - 3/12	1	1	-1	0	2	-1	4	3	9
3/12 - 4/12	1	1	-1	-1	2	-2	4	4	16
4/12 - 5/12	0	1	-1	-1	1	-2	1	3	9
5/12 - 6/12	0	0	-1	-1	0	-2	0	2	4
$\Sigma (\Sigma \varepsilon_a)^2 = 14 \varepsilon_0^2$							$\Sigma (\Sigma \varepsilon_a - \Sigma \varepsilon_b)^2 = 42 \varepsilon_0^2$		

Abb. 236 a zeigt einen Teil einer Drehstromwicklung bei zweifachen Nuten ($i=2$). Abb. 236 b und c stellen die EMK in den benachbarten beiden Windungen des Zweiges A , 236 d ihre Summe e_a bei Reihenschaltung dar. Abb. 236 e ist die negative EMK $-e_b$ des Zweiges B . Sie ist um 60° gegen die Kurve d verschoben. Die resultierende EMK bei Sternschaltung erhält man, indem man die Summe von e_a und $-e_b$ bildet, Abb. 236 f.

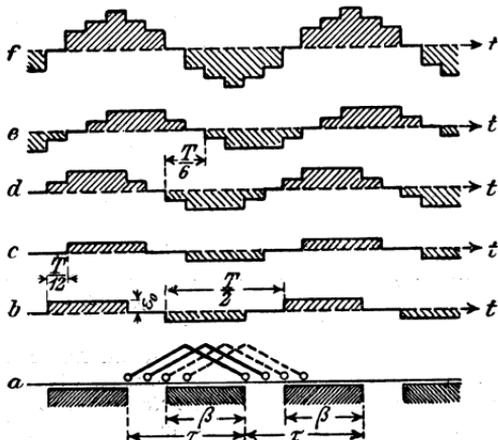


Abb. 236 a bis f.
Elektromotorische Kraft in einer Drehstromwicklung.

Daher

$$E_{\Delta} = \frac{w_z}{2} \cdot \sqrt{\frac{14}{6} \varepsilon_0^2} = \frac{w_z}{2} \cdot \sqrt{\frac{14}{6}} \cdot \frac{4f\Phi}{2/3} \cdot 10^{-8} = 4,59 \cdot f w_z \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$E_{\nabla} = \frac{w_z}{2} \cdot \sqrt{\frac{42}{6} \varepsilon_0^2} = \frac{w_z}{2} \cdot \sqrt{\frac{42}{6}} \cdot \frac{4f\Phi}{2/3} \cdot 10^{-8} = 7,95 \cdot f w_z \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

Man findet noch $E_{\nabla}/E_{\Delta} = \sqrt{42/14} = \sqrt{3}$.

(468) Glatte Anker. Wenn i sehr groß ist, oder wenn die Wicklung auf einem glatten Anker gleichmäßig verteilt liegt, ist die EMK einer Spule konstant gleich ihrem größten Wert E_0 , solange alle Drähte der einen Spulenseite unter einem, alle Drähte der anderen Spulenseite unter einem anderen Pole liegen, oder solange überall unter einem Pole Drähte einer Spulenseite liegen. Zwischen dem Maximum und Minimum kann man den Verlauf der EMK als linear annehmen. Dann ist

a) wenn $\beta \geq b$ ist, so daß alle w_z Windungen der Spule dieselbe EMK ε_0 enthalten,

$$E_0 = w_z \cdot \varepsilon_0 = w_z \frac{4f\Phi}{\beta/\tau} 10^{-8} \text{ Volt}$$

b) wenn $\beta < b$ ist, so daß gleichzeitig nur in $\frac{\beta}{b} w_z$ Windungen die EMK den Wert ε_0 haben kann,

$$E_0 = \frac{\beta}{b} w_z \cdot \varepsilon_0 = w_z \frac{4f\Phi}{b/\tau} 10^{-8} \text{ Volt}$$

Aus dem Maximalwert kann man, da die Kurve der EMK ein gebrochener, aus geraden Strecken zusammengesetzter Linienzug ist, Abb. 237, die Effektivwerte der EMK E_{Δ} für Dreieck- und E_{∇} für Sternschaltung durch Integration finden. Man kann daher allgemein die EMK für ein Polpaar gleich

$$E = k \cdot f w_z \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

setzen, worin unter w_z die Windungszahl eines Zweiges für ein Polpaar, unter Φ der von einem Pol herrührende Induktionsfluß im Anker zu verstehen ist.

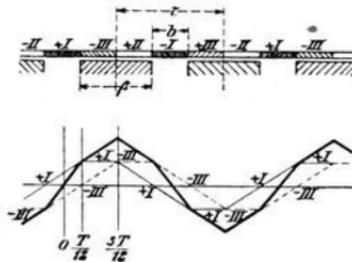


Abb. 237. Elektromotorische Kraft einer Drehstromwicklung bei glattem Anker.

$$\beta/\tau = 2/3.$$

Wird statt mit Windungen mit am Anker liegenden „Leitern“ gerechnet, so ist für k nur der halbe Wert einzusetzen. Die Konstante k hängt vom Verhältnis Polbogen zur Teilung und von der Nutenzahl ab; sie wird, da sie in erster Linie aus den Kapschen Lehrbüchern bekannt ist, häufig die „Kapsche Konstante“ genannt. Die einzelnen Werte von k können für eine Drehstromwicklung den folgenden Tabellen entnommen werden.

Nutenanker.

Nutenzahl für je ein Polpaar	i	$\frac{\beta}{\tau} = \frac{1}{2}$			$\frac{\beta}{\tau} = \frac{2}{3}$			$\frac{\beta}{\tau} = \frac{5}{6}$		
		k_{Δ}	k_{γ}	$\frac{k_{\gamma}}{k_{\Delta}}$	k_{Δ}	k_{γ}	$\frac{k}{k_{\Delta}}$	k^{Δ}	k_{γ}	$\frac{k_{\gamma}}{k_{\Delta}}$
6	1	5,65	9,22	1,63	4,90	8,49	1,73	4,39	8,08	1,84
12	2	5,16	8,64	1,67	4,59	7,95	1,73	4,16	7,07	1,70
18	3	5,07	8,53	1,68	4,53	7,84	1,73	4,08	6,96	1,71
24	4	5,03	8,50	1,69	4,50	7,80	1,73	4,07	6,95	1,71
30	5	5,01	8,47	1,69	4,49	7,77	1,73	4,05	6,93	1,71

Glatter Anker.

Phasenwicklung und aufgeschnittene Wicklung	}	4,99	8,45	1,69	4,47	7,75	1,73	4,04	6,91	1,71
		4,22	—	—	3,88	—	—	3,46	—	—
Geschlossene Wick- lung	}									

i gibt die Nutenzahl je Pol und Zweig an, k_{Δ} ist die Konstante für Dreieck-, k_{γ} die Konstante für Sternschaltung. Für andere Werte von β/τ kann hieraus k leicht interpoliert werden. Vgl. Sengel, ETZ 1907, S. 1188.

Vielfach werden mit Rücksicht auf Geräuschlosigkeit und weiche Form der Spannungskurve die Polschuhkanten abgeschrägt oder verrundet. Bei Ableitung der EMK-Kurven kann man die Abrundungen durch Einführung entsprechender magnet. Induktion berücksichtigen, indem man annimmt, daß diese stets der radialen Tiefe des Luftraumes umgekehrt proportional ist.

(469) Erregung. Die Feldmagnete der synchronen Wechselstrommaschinen werden i. Allgem. von einer besonderen Gleichstromquelle erregt. Der Erregerstrom wird entweder einer vorhandenen Gleichstromquelle von konstanter Spannung entnommen und der Schenkelwicklung der Wechselstrommaschine unter Vorschaltung eines Regulierwiderstandes zugeführt, oder in einer besonderen Erregermaschine erzeugt. Die Erregermaschine kann mit der Hauptmaschine unmittelbar gekuppelt werden — Eigenerrregung — fällt dann aber namentlich bei großen Maschinen mit Kolbenmaschinenantrieb infolge der geringen Drehzahl teurer aus und ist zugleich mit der Hauptmaschine allen störenden Einflüssen der Geschwindigkeitsschwankungen der Antriebsmaschine ausgesetzt, so daß diese Einflüsse sich in der Wirkung auf die Spannung der Hauptmaschine potenzieren. Bei Turbodynamos ist die Eigenerrregung allgemein gebräuchlich. In vielen Fällen wird die Erregermaschine dauernd oder gelegentlich in Parallelschaltung mit einer Akkumulatorenbatterie betrieben. Werden die Erregermaschinen von Wechselstrommotoren angetrieben, die von den Hauptmaschinen gespeist werden, so muß eine Akkumulatorenbatterie vorgesehen werden, um die ganze Anlage nach einer Betriebseinstellung wieder in Gang setzen zu können. Um sie zum erstenmal in Betrieb zu setzen, ist dann eine fremde Maschine oder Stromquelle erforderlich.

Die Erregermaschinen selbst können als Nebenschlußmaschinen oder als Reihenschlußmaschinen ausgeführt werden. Im ersteren Falle braucht man in der Regel, um stabilen Gang der Erregermaschine zu sichern, zwei Regulierwiderstände, nämlich einen im Nebenschlußkreis des Erregers und einen im Erregerkreis der Wechselstrommaschine.

(470) Die **Regulierwiderstände** müssen eine genügende Anzahl Stufen erhalten. Ihre Gesamtgröße richtet sich nach den Bedingungen, die man aus der Belastungscharakteristik ableitet (477), wobei es sich empfiehlt, eine Sicherheit von etwa 25% einzuschließen. Bei Nebenschlußerregemaschinen werden die Stufen zweckmäßig gleich groß gemacht. Ist die Erregerdynamo eine Reihenschlußmaschine, so darf der Regulierwiderstand nicht in gleiche Stufen geteilt werden, er muß vielmehr unter Benutzung der Maschinencharakteristik so geteilt werden, daß jeder Stufe eine gleich große Zunahme der Stromstärke entspricht (422).

Die Kontakte der Regulierwiderstände sollten während des Betriebes unzugänglich sein, besonders wenn an der Schalttafel kein isolierender Bedienungsgang vorgesehen ist.

Die **Ausschaltung** eines Erregerkreises bedingt große Vorsicht, weil infolge der großen Selbstinduktion der Wicklung bei plötzlichem Öffnen des Stromkreises sehr große Überspannungen entstehen können. Man hat daher vor dem Ausschalten die Stromstärke mit Hilfe des Regulierwiderstandes möglichst zu erniedrigen und dann entweder unter Benutzung eines Kurzschlußkontaktes (427) oder mit Hilfe eines lichtbogenziehenden Ausschalters zu unterbrechen. Direkt gekuppelte Erreger brauchen, sofern sie lediglich auf den zugehörigen Generator geschaltet sind, in der Regel überhaupt nicht ausgeschaltet zu werden; man macht sie durch Abstellen der Antriebsmaschine stromlos. Als Reihenschlußmaschinen ausgeführte Erreger können dadurch stromlos gemacht werden, daß man ihre Schenkelwicklung kurz schließt.

(471) **Sinusförmiger und nichtsinusförmiger Strom.** Aus vielen Gründen ist es das Vorteilhafteste, daß der Stromerzeuger EMKe liefert, die nach einem einfachen Sinusgesetz verlaufen, also die Form

$$e = E_0 \sin 2\pi ft = E_0 \sin \omega t$$

besitzen. Dies ist daher auf jede Weise anzustreben, gelingt aber nur bis zu einem bestimmten Grade. Im allgemeinen kann man die EMK nur durch eine unendliche trigonometrische Reihe von der Form

$$\begin{aligned} f(t) &= A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t + \dots \\ &+ B_1 \cos \omega t + B_2 \cos 2\omega t + B_3 \cos 3\omega t + \dots \\ &= E_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + E_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + E_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots \end{aligned}$$

darstellen, worin

$$E_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2}, \quad E_2 = \sqrt{A_2^2 + B_2^2} \text{ usw. ist.}$$

Man nennt die EMK „**sinusförmig**“, wenn nur das erste Glied mit der Amplitude E_1 vorhanden ist, im anderen Falle **nichtsinusförmig**. Das erste Glied ist die Grundschwingung, die folgenden sind die Oberschwingungen. Nach den Maschinenregeln gilt eine Schwingung als praktisch sinusförmig, wenn keiner ihrer Augenblickswerte von dem gleichzeitigen Augenblickswerte der Grundschwingung um mehr als 5% vom Scheitelwert der Grundschwingung abweicht.

Zeichnet man sich die einzelnen Sinus- und ebenso die einzelnen Kosinustglieder auf, so erkennt man ohne weiteres unter anderen die folgenden beiden Sätze:

1. Addiert man je zwei Werte, die zu den Abszissen ωt und $\omega t + \pi$ gehören, so fallen alle ungeraden Glieder heraus, während die geraden verdoppelt werden. Geometrisch hat man die zweite Hälfte der Kurve über der Periode um π nach links zu schieben und ihre Ordinaten zu denen der ersten Hälfte zu addieren.

Sind nun bei einer Wechselstrommaschine alle Pole gleich ausgebildet und gleich stark erregt, so verläuft die negative Hälfte der Kurve genau so wie die positive, nur mit umgekehrtem Vorzeichen. Die beschriebene Maßnahme ergibt daher überall den Wert Null. Die zugehörige Reihe kann demnach keine geraden Glieder erhalten.

2. Subtrahiert man je zwei Werte, die zu den Abszissen ωt und $(\omega t + 2\pi/3)$ gehören, voneinander, so fallen alle Glieder, deren Ordnungszahl durch 3 teilbar ist, heraus.

Dies ist bei der Sternschaltung der Drehstrommaschinen der Fall.

Bei der üblichen Bauart der Wechselstrommaschinen kann die Kurve der EMK daher nur Oberschwingungen von ungerader Ordnungszahl enthalten; bei Drehstrommaschinen in Sternschaltung fallen außerdem alle Oberschwingungen heraus, deren Ordnungszahl durch 3 teilbar ist.

Bei Leerlauf läßt sich die EMK der normalen Wechselstrommaschinen durch eine Sinus- oder eine Kosinusreihe allein darstellen, bei Belastung wird die Kurve durch die Ankerrückwirkung verzerrt, die EMK enthält daher gleichzeitig die Sinus- und die Kosinusglieder.

Der effektive Mittelwert der sinusförmigen EMK ist $E_{eff} = E_1/\sqrt{2}$, der der nichtsinusförmigen EMK

$$E_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2 + E_3^2) + \dots}$$

Über die Berechnung der Amplituden A und B sowie über die Aufnahme der Wechselstromkurven siehe *R u n g e*, Theorie und Praxis der Reihen. Sammlung Schubert, XXXII, Göschensche Verlagsbuchhandlung Leipzig. — *Orlich*, Aufnahme und Analyse von Wechselstromkurven. Braunschweig 1906 — vgl. (132), (133) und (238).

Oberschwingungen entstehen durch die Treppenform der Kurve der EMK und durch periodische Schwankungen im Widerstande des magnetischen Kreises infolge der Nutung. Zur Abhilfe vergrößert man den Abstand der Polfläche von der Ankerfläche allmählich nach den Polkanten hin oder stellt die Polkanten oder die Nuten schräg mit einer Steigung gleich der Nutenteilung auf die Ankerlänge. Die Oberschwingungen sind bei den Bruchwicklungen (458) kleiner als bei den ganzzahligen Wicklungen. Die tatsächlich vorhandenen Kurven der Spannung und der Stromstärke werden vielfach durch äquivalente Sinuskurven ersetzt, deren Amplituden und deren Phasenverschiebung gegeneinander so gewählt werden müssen, daß sie dieselben effektiven Mittelwerte haben und dieselbe mittlere Leistung ergeben, wie die wahren Kurven.

(472) Wicklungsfaktoren. Führt man in die Gleichung der in einer Windung induzierten EMK

$$e = (\mathfrak{B}_x - \mathfrak{B}_{x+b})lv$$

eine trigonometrische Reihe für \mathfrak{B}_x ein, deren ν tes Glied

$$\mathfrak{B}_{x\nu} = \mathfrak{B}'_{\nu} \sin \nu \frac{x}{\tau} \pi + \mathfrak{B}''_{\nu} \cos \nu \frac{x}{\tau} \pi$$

lautet, und setzt man

$$\xi = x + \frac{b}{2}, \quad x = \xi - \frac{b}{2},$$

so erhält man nach einigen Umformungen

$$e_{\nu} = -2lv \cdot \sin \frac{\nu b}{2\tau} \pi \cdot \left[\mathfrak{B}'_{\nu} \cos \frac{\nu \xi}{\tau} \pi - \mathfrak{B}''_{\nu} \sin \frac{\nu \xi}{\tau} \pi \right].$$

Der Klammerausdruck ist eine Sinusfunktion der Zeit, weil ξ bei konstanter Geschwindigkeit eine lineare Funktion der Zeit ist. Seine Amplitude ist $\sqrt{\mathfrak{B}'_{\nu}{}^2 + \mathfrak{B}''_{\nu}{}^2}$.

Der Ausdruck $\sin \frac{\nu b}{2\tau} \pi$ ist der Wicklungsfaktor der Windung.

Bei Durchmesserwicklung ($b = \tau$) verschwindet er für alle geraden Werte von ν , es sind dann also nur Oberschwingungen ungerader Ordnungszahl vorhanden. Für alle ungeraden Werte von ν ist er bei Durchmesserwicklung gleich ± 1 .

Bei Sehnwicklung ($b \geq r$) wird die ν te Schwingung im Verhältnis des Wicklungsfaktors zu 1 verkleinert. Ist (Abb. 238) $\sphericalangle AOB = b\pi/r$, so ist $AB = 2 \sin b\pi/2r$ die Sehne eines Kreises, dessen Radius gleich 1 ist. Es sei weiter $\sphericalangle BOC = \sphericalangle COD = \sphericalangle DOE = \sphericalangle EOF = \sphericalangle AOB$, so sind die Sehnen $AB, AC, AD, AE, AF, \dots$ den Amplituden der Oberschwingungen proportional. Diese werden also abwechselnd kleiner und größer. In der Abb. 238 verschwindet die fünfte Oberschwingung AF fast völlig.

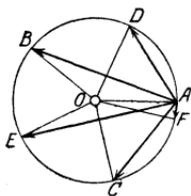


Abb. 238.

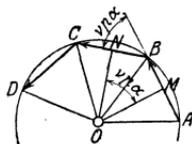


Abb. 239.

Wenn i Wicklungselemente oder Spulen durch Reihenschaltung zu einer Gruppe vereinigt sind, kann man Hin- und Rückführung im allgemeinen so zusammensetzen oder zusammengesetzt denken, daß alle Windungen dieselbe Öffnung haben und um je denselben Winkel α gegen einander verschoben sind. Für die ν ten Oberschwingungen zweier benachbarter Windungen ergibt sich hieraus eine Verschiebung um den Winkel $\nu \phi \alpha$ in elektrischem Maß. Addiert man die Vektoren AB, BC, CD, \dots der ν ten Schwingungen einer Gruppe, so liegen die Endpunkte A, B, C, D, \dots (Abb. 239) auf einem Kreise und der Vektor der resultierenden Schwingung ist die Schlußsehne, z. B. AD . Den Mittelpunkt O des Kreises findet man als Schnittpunkt zweier Mittelsenkrechten MO und NO . Daher ist $\sphericalangle MON = \nu \phi \alpha$, also auch $\sphericalangle AOB = \sphericalangle BOC = \sphericalangle COD = \nu \phi \alpha$. Mit

$$AD = 2R \sin \frac{i \cdot \nu \phi \alpha}{2}, \quad AB = 2R \sin \frac{\nu \phi \alpha}{2}$$

ergibt sich

$$\frac{AD}{i \cdot AB} = \frac{\sin \frac{i \cdot \nu \phi \alpha}{2}}{i \sin \frac{\nu \phi \alpha}{2}}$$

Dieser Ausdruck ist der Wicklungsfaktor der Windungs- oder Spulengruppe. Er gibt an, in welchem Verhältnis die Amplitude der ν ten resultierenden Schwingung verkleinert wird im Verhältnis zu dem Werte, den sie bei algebraischer Addition aller ν ten Schwingungen haben würde.

Bei ganzzahligen Drehstromwicklungen ist die Nutenzahl i je Pol und Zweig gleich $m/6 \phi$ und $\alpha = 360^\circ/m$, daher wird $\frac{i \nu \phi \alpha}{2} = \nu \cdot 30^\circ$.

Der Wicklungsfaktor eines Zweiges ist daher gleich

$$\frac{\sin \nu 30^\circ}{i \sin \frac{\nu}{i} 30^\circ}$$

(473) Das Diagramm der Wechselstrommaschine gibt qualitativ einen guten Einblick in die Vorgänge bei Belastung. Die umlaufenden, durch Gleichstrom erregten Feldmagnete werden durch einen ruhenden, mit Mehrphasenstrom erreg-

ten Ring ersetzt gedacht, der dieselbe Nutenzahl und dieselbe Windungszahl besitzt wie der Anker. Wir können dann das Transformatoridiagramm (334) anwenden. Alle Magnetismen sind durch die EMKe zu messen, die sie im Anker bei Leerlauf erzeugen würden, wenn sie einzeln für sich allein vorhanden wären.

Der wirksame Induktionsfluß (Abb. 240) im Anker $\Phi_a = OA$ erzeugt die um 90° gegen ihn verschobene EMK $E = OA_1$, die Klemmenspannung $U = OK$ ist die geometrische Differenz von E und $I_a R_a$. Die Magnetisierung des Ankereisens erfordert die MMK H_a , die wegen Wirbelströmen und Hysterese eine Voreilung vor Φ_a hat. Die für die Ankerstreuung in Rechnung zu ziehende magnetische Potentialdifferenz Π_a ist die geometrische Summe von H_a und $-0,4\pi \Delta_a$. Die Ankerstreuung $\Phi_s = AB$ kann proportional und phasengleich mit Π_a angenommen werden. Wenn \mathfrak{R}_s der Widerstand des Ankerstreulusses ist, so ist $\Phi_s = \Pi_a / \mathfrak{R}_s$. Der die Luft durchsetzende Magnetismus $\Phi_L = OB$ ist die geometrische Summe von Φ_a und Φ_s . Um Φ_L durch die Luft zu treiben, ist die MMK H_L erforderlich, proportional und phasengleich mit Φ_L . Man hat daher $\Phi_L = H_L / \mathfrak{R}_L$, wenn \mathfrak{R}_L der Widerstand des Luftweges ist. Die magnetische Potentialdifferenz zwischen den Polen der Feldmagnete ist $\Pi_f = \Pi_a + H_L$. Diese erzeugt die Feldstreuung, um die die Feldmagnete stärker als bei Leerlauf belastet sind. Um den gesamten Induktionsfluß durch die Feldmagnete zu treiben, ist noch die MMK H_f erforderlich. Die Summe von Π_f und H_f , nämlich OD , ist der Durchflutung der Feldmagnete proportional.

(474) Leerlauf. Läßt man die Erregung konstant und verringert man I_a allmählich bis auf Null, so wird der Ankerstreulfluß sehr klein, A und B fallen nahezu mit C zusammen. AB wird gleich Null und OA fällt vollkommen mit OC zusammen, wenn man H_a und H_f vernachlässigt, d. h. bei geringer Eisensättigung. Bei Leerlauf würde dann der Ankerfluß gleich OC und die EMK gleich OC_1 ($\perp OC$) sein. Die AB entsprechende EMK A_1B_1 heißt die EMK der Ankerstreuung, die BC entsprechende EMK B_1C_1 heißt die der Ankerrückwirkung entsprechende EMK. OC_1 ist die EMK bei Leerlauf E_λ . Starke Sättigung der Feldmagnete, d. h. relativ großer Wert von H_f , verhindert ein allzu starkes Anwachsen der EMK; in diesem Falle bewegt sich A nicht nach C , sondern etwa nach C' . Die Spannungsschwankungen werden dadurch bei veränderlicher Belastung in geringeren Grenzen gehalten. Ankerstreulfluß und Ankerrückwirkung ergeben zusammen die „Selbstinduktivität“ des Ankers. A_1C_1 ist demnach die durch (die gesamte) Selbstinduktion hervorgerufene EMK des Ankers. Der Voreilungswinkel $C_1'OA_1$ wird durch die Eisensättigung nicht beeinflusst.

(475) Diagramm der EMK. Trägt man (Abb. 240) die Klemmenspannung $U = OK$ senkrecht nach oben auf, so ist die tatsächlich in der Maschine vorhandene EMK $E = OA_1$ gleich der geometrischen Summe von U und $I_a R_a = KA_1$. Dieselbe Erregung würde aber bei Leerlauf eine EMK $E_\lambda = OC_1$ erzeugen, die sich von E um A_1C_1 unterscheidet. A_1C_1 ist die EMK der Selbstinduktion. Bei schwacher Sättigung der Feldmagnete steht A_1C_1 senkrecht auf dem Vektor der Stromstärke, also auch senkrecht auf KA_1 . Bei wachsender Stromstärke und konstanter Spannung bewegt sich der Endpunkt des Vektors E_λ auf der Geraden A_1C_1 , bei stärkerer Sättigung dagegen auf einer konkav nach unten gekrümmten Linie A_1C_1' .

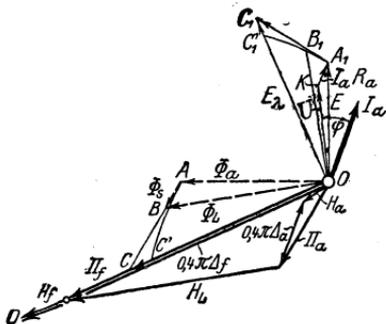


Abb. 240. Vektordiagramm des Wechselstromerzeugers.

(476) Spannungsabfall durch Belastung. Die Klemmenspannung der unbelasteten Maschine sei gleich $E_\lambda = OC_1'$. Dann sinkt bei konstanter Erregung die Klemmenspannung bei Belastung auf den Betrag OK . Man nennt KA_1 den Ohmschen, A_1C_1' den induktiven Spannungsverlust. Der Spannungsverlust ist durch die algebraische Differenz zwischen OC_1' und OK gegeben. Diese ist bei konstanter Stromstärke um so größer, je größer der Winkel φ der Phasenverschiebung zwischen Klemmenspannung und Stromstärke ist.

(477) Charakteristiken der Wechselstrommaschinen nennt man Kurven in einem rechtwinkligen Koordinatensystem, die über ihr Verhalten Aufschluß geben. Man unterscheidet die Leerlauf-, die Kurzschluß- und die Belastungscharakteristik. Bei der Aufnahme wird die Drehzahl konstant gehalten.

Die Leerlaufcharakteristik, auch statische Charakteristik (Abb. 241), stellt die Abhängigkeit der EMK bei Leerlauf E_λ von der Erregung I_{err} bei konstanter Drehzahl dar. Sie hat die Form der Magnetisierungskurve und liegt, wenn sie bei steigenden Werten aufgenommen wird, wegen der Remanenz etwas tiefer, als wenn sie bei fallenden Werten aufgenommen wird (Abb. 203). Man wählt häufig eine mittlere, durch den Nullpunkt gehende Kurve.

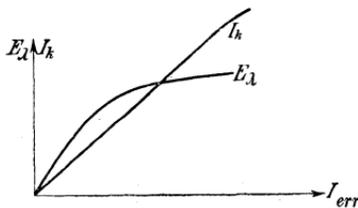


Abb. 241. Leerlauf- und Kurzschlußcharakteristik des Wechselstromgenerators.

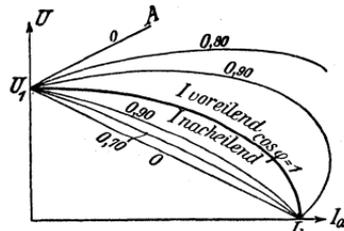


Abb. 242. Belastungscharakteristiken des Wechselstromgenerators.

Die Kurzschlußcharakteristik (Abb. 241) stellt die Abhängigkeit der Stromstärke I_k im kurzgeschlossenen Anker von der Erregung I_{err} dar. Sie verläuft wegen der geringen Eisensättigung vom Nullpunkt ausgehend sehr lange geradlinig und biegt erst bei weit über normaler Ankerstromstärke nach rechts um. Bei der Aufnahme dieser Kurve braucht die Drehzahl nicht konstant zu sein.

Die Belastungscharakteristik, auch dynamische Charakteristik genannt (Abb. 242), stellt die Abhängigkeit der Klemmenspannung U von der Ankerstromstärke I_a dar, wenn Drehzahl, Erregung und Leistungsfaktor konstant gehalten werden.

Sie läßt sich aus dem Vektordiagramm, Abb. 240, ableiten. Man erhält für jeden $\cos \varphi$ eine besondere Kurve. Bei $\cos \varphi = 1$ ist sie angenähert eine Ellipse, deren Achsen mit den Koordinatenachsen zusammenfallen. Bei $\cos \varphi = 0$ geht sie in eine gerade Linie über, und zwar bei nacheilender Phasenverschiebung von 90° in die Gerade $U_1 I_k$, bei voreilender in die Gerade $U_1 A$. Bei voreilender Phasenverschiebung steigt die Spannung zunächst, bei nacheilender sinkt sie gleich bedeutend stärker als bei $\cos \varphi = 1$.

Um die Spannung konstant zu halten, muß man den Erregerstrom stark ändern können, etwa innerhalb der Grenzen von 50 bis 100% des größten Wertes.

(478) Selbsterregung und Zusatzerregung (Kompondierung) der Wechselstrommaschinen ist wiederholt versucht worden, vgl. z. B. He y l a n d, ETZ 1903, S. 844 u. 1036.

Bei der Zusatzerregung von Danielson (ETZ 1899, S. 38) erhält der Anker der mit der Hauptmaschine gekuppelten Erregermaschine neben der Gleichstromwicklung noch eine an drei Schleifringe angeschlossene Wechsel-

stromwicklung, die in Reihe mit der aufgelösten Ankerwicklung der Hauptmaschine geschaltet wird. Bei richtiger Stellung der Anker beider Maschinen zueinander wird die EMK der Erregermaschine durch den Strom der Hauptmaschine bei Phasennacheilung verstärkt, bei Phasenvoreilung abgeschwächt.

In Anlehnung an diese und eine von Rice angegebene Anordnung sind die von den Siemens-Schuckertwerken gebauten Wechselstromgeneratoren *HD* der Hamburger Vorortbahn, Abb. 243, mit einem Erreger *E* und einem Umformer *U* direkt gekuppelt. Der letztere verwandelt den von einem primär in den Stromkreis der Hauptmaschine geschalteten Stromtransformator *T* gelieferten Wechselstrom in Gleichstrom, der die Erregerwicklung *A* des Erregers speist. Dieser ist mit Wendepolen (Wicklung *B*) ausgestattet. Der Umformer wird von einer Akkumulatorenbatterie erregt (ETZ 1909, S. 1145 und 1195).

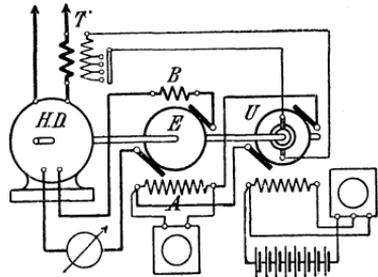


Abb. 243. Kompoundierungsschaltung eines Wechselstromgenerators.

(479) Kurzschluß der Ankerwicklung. Man hat zwischen dem „Stoßkurzschlußstrom“, der zu Anfang des Kurzschlusses auftritt und dem Dauerkurzschlußstrom in der Ankerwicklung zu unterscheiden. Der Strom kann gleich nach Beginn des Kurzschlusses bis zum 30-fachen des normalen Vollaststromes anwachsen. Man kann sich angenähert das auf Grund des Diagrammes, Abb. 240, das streng genommen nur für den Dauerzustand gilt, die Vorgänge klarmachen. Wegen der großen Selbstinduktion der Erregerwicklung kann sich nämlich der Erregerstrom und daher der Induktionsfluß in den Schenkeln nicht sofort ändern. Es bleibt daher zunächst $\Phi_L = OB$ bestehen, und da bei Kurzschluß *U* verschwindet, mithin *E* und Φ_a sehr klein werden, muß, abgesehen von dem Ohmschen Spannungsverlust im Ankerkreise, der Ankerstrom so lange wachsen, bis *AB* die Größe von *OB* erreicht. Der Stoßkurzschlußstrom verhält sich daher zum Normalstrom nahezu wie $OB : AB$. Dazu kommt noch ein schnell abklingendes Gleichstromglied. Der Dauerkurzschlußstrom verhält sich dagegen zum Vollaststrom wie $OC : AC$. Das Abklingen des Stoßkurzschlußstromes erfolgt nach einem Exponentialgesetz und nimmt bei kleinen Maschinen einige Perioden des Wechselstromes, bei großen mehrere Sekunden in Anspruch. Die dabei auf die Wicklung wirkenden mechanischen Kräfte sind sehr bedeutend und verlangen die sorgfältigste Befestigung der Spulenköpfe durch starke Klammern. Der Stoßkurzschlußstrom ist um so größer, je kleiner die Zeitkonstante $\tau = L/R$ der Erregerwicklung ist. Mittel zur Verringerung des Stoßkurzschlußstromes sind große Nutenstreuung und in den Ankerkreis eingeschaltete Drosselspulen, sowie Dämpfungswicklungen (487). Außerdem kommt es auf den Ort des Kurzschlusses an. Je weiter er von der Maschine entfernt ist, um so weniger stark ist der Kurzschlußstrom. Die Maschinenregeln schreiben vor, daß der Stoßkurzschlußstrom das 15-fache des Nennstromes nicht überschreiten darf. Vgl. Biermanns, ETZ 1916, S. 319, 579, 592; Arch. El. Bd. 3, S. 354; ETZ 1921, S. 81. Der Dauerkurzschlußstrom beträgt etwa das 1,75- bis 2,50-fache des Nennstromes, seine Stärke ist von der Erregung abhängig.

Infolge von Störungen tritt auch an Drehstrommaschinen häufig nur ein Kurzschluß zwischen zwei Leitern oder Klemmen auf. Im Dauerzustande lagert sich dann über den Erregerstrom infolge der Ankerrückwirkung ein Wechselstrom von der doppelten Frequenz der Grundschwingung des Ankerstromes. Dieser ruft im Anker eine Oberschwingung von der dreifachen Frequenz hervor usw., so daß

sich in der Erregerwicklung ein nicht sinusförmiger Strom von der 2-, 4-, 6- usw.-fachen Frequenz der Grundschwingung des Ankerstroms, im Anker Oberschwingungen von der 3-, 5-, 7- usw.-fachen Frequenz ausbilden. Beim Eintritt eines einphasigen Kurzschlusses treten in dem dritten Wicklungsarme einer in Stern geschalteten Wechselstrommaschine bei geringer Sättigung Spannungserhöhungen von dem Mehrfachen der normalen Spannung auf, die infolge von Dämpfung nach Verlauf einiger Perioden der Grundschwingung ziemlich abgeklungen sind. Vgl. Weidig, Die Wechselstrominduktionsmaschinen mit einachsiger Wicklung, Diss. Dresden 1912.

(480) Hochfrequenzmaschinen. — Für die drahtlose Telegraphie sind Wechselströme hoher Leistung für Frequenzen von 30 000 bis 100 000 Per/s erforderlich. Man baut die Maschinen dazu mit einer Grundfrequenz von 5000 bis 10 000 Per/s nach dem Gleichpoltyp, Abb. 244, der für Maschinen niedriger Frequenz veraltet ist.

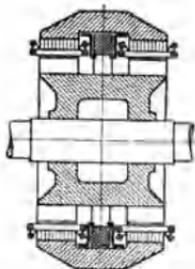


Abb. 244. Gleichpoltyp.

Ein Läufer trägt zwei Polkränze, die von einer großen feststehenden Spule ϵ rragt werden. Der eine Polkranz besitzt nur Nord-, der andere nur Südpole, die so weit voneinander abstehen, wie wenn die dazwischenliegenden entgegengesetzten Pole entfernt worden wären. Die Polkränze drehen sich innerhalb zweier mit Wicklungen versehener Anker, die durch einen großen sie umfassenden Zylinder aus massivem Eisen magnetisch miteinander verbunden sind. In den Ankerspulen wechselt der Induktionsfluß daher nicht, wie bei dem normalen Wechselpoltyp zwischen gleich großen positiven und negativen Höchstwerten, sondern zwischen einem Höchstwert und einem geringsten Wert, der wegen der Streuung nicht völlig zu Null wird. Wegen der großen Polzahl besitzen die Anker nur zwei Nuten auf ein Polpaar, die Polkränze nur einen Zahn und eine breitere Nut auf ein Polpaar. Die Ankerwicklung liegt mäanderbandartig in den Nuten. Eine Maschine der Großstation Nauen besitzt bei 130 m/s Umfangsgeschwindigkeit, 1500 U/min und 6000 Per/s einen Läuferdurchmesser von 1,65 m, eine Nutenteilung von 10,8 mm und eine Teilung von Mitte Nordpol bis Mitte Nordpol von 21,6 mm. Sie liefert 1200 A bei 450 V. Der Anker ist mit Kühlschlangen versehen. Von der AEG ist eine Maschine für 30000 Per/s, 40 kW gebaut worden und in der Station Deutsch-Altenburg bei Wien in Betrieb. Zur Erhöhung der Frequenz dienen mit Gleichstrom gesättigte Frequenztransformatoren (346).

Man kann auch nach R. Goldschmidt (ETZ 1911, S. 54) einen nach Art der Induktionsmotoren gebauten Generator verwenden, den einen Teil mit Gleichstrom erregen, wobei die Gleichstromquelle durch eine vorgeschaltete Drosselspule vor dem Eindringen von Wechselströmen geschützt wird, und durch Resonanz bestimmte Oberschwingungen herausheben, deren Entstehung in (479) beschrieben ist. Erregt man den Ständer mit Gleichstrom, so wird im Läufer eine der Umlaufzahl proportionale Frequenz f erzeugt. Wird der Läufer durch die Reihenschaltung einer Drosselspule und eines Kondensators geschlossen, so daß bei der Frequenz f Resonanz besteht, so wirkt dieser Schließungskreis wie ein Kurzschluß für die Schwingung mit der Frequenz f . Im Ständer entstehen daher Ströme von der Frequenz $2f$, die wieder durch einen Resonanzkreis als Kurzschlußströme wirken und im Läufer Ströme von der Frequenz $3f$ erzeugen. Man kann in dieser Weise fortfahren und beliebig hohe Frequenzen herstellen, von denen nur die letzte benutzt wird. Die verschiedenen Schließungskreise des Läufers sind einander parallel geschaltet, ebenso wie die des Ständers. Sie stören einander nicht, weil sie auf verschiedene Frequenzen abgestimmt sind. Dies System ist von C. Lorenz A.-G. Berlin ausgebildet worden und auf der Großstation Eilvese in Betrieb.

Parallelbetrieb der Wechselstrommaschinen¹⁾.

(481) **Allgemeine Bedingungen.** Zum Parallelbetrieb ist erforderlich, daß die Maschinen gleiche Frequenz, gleiche Spannung und annähernd gleiche Kurven der EMK haben. Parallel geschaltet müssen die Maschinen „synchron“ laufen. Dazu ist nicht nur erforderlich, daß gleiche Maschinen gleich schnell, verschiedenpolige Maschinen mit Umdrehungszahlen laufen müssen, die sich umgekehrt wie die Polzahlen verhalten, sondern auch, daß die Pole dauernd nahezu gleiche relative Stellungen zu den Ankerwicklungen bewahren müssen. Andernfalls fallen die Maschinen „außer Tritt“, wodurch der Betrieb gestört wird, so daß er unterbrochen werden muß. Der Synchronismus wird durch ein „synchronisierendes Moment“ von den Maschinen selbst aufrecht erhalten. Es werde zunächst angenommen, daß die betrachtete Maschine auf ein unendlich starkes Netz arbeite, d. h. daß Größe und Frequenz der Klemmenspannung U vollkommen konstant seien.

(482) **Voreilung.** Aus dem Diagramm (Abb. 240) ergibt sich, daß der Vektor von E_λ eine Voreilung vor dem Vektor der Klemmenspannung U hat, die mit der Belastung wächst. Denkt man sich zwei gleiche Maschinen, von denen die eine leer läuft, und deren E_λ daher mit U zusammenfällt, während die zweite belastet ist, so muß die letztere relativ eine Voreilung vor der leer laufenden Maschine haben. Diese Voreilung ist bei zweipoligen Maschinen gleich dem Winkel $\alpha = C_1OK$, bei p Polpaaren dagegen nur der p -te Teil, also α/p .

(483) **Leistungslinien.** (Görges, ETZ 1900, S. 188.) Wenn die Leistung N_e der EMK des Generators, d. h. das Produkt $E I \cos \vartheta$ eines Zweiges der Ankerwicklung, wobei ϑ die Phasenverschiebung zwischen E und I ist, konstant gehalten wird, so bleibt bei konstantem E auch die Projektion $I \cos \vartheta$ des I -Vektors auf den E -Vektor konstant, Abb. 240. Folglich bleibt auch die Projektion von $I I_a$ auf eine Senkrechte zu $\Phi_a = OA$ konstant. Bei konstanter Leistung und veränderlicher Phasenverschiebung bewegt sich mithin der Endpunkt von $I I_a$ auf einer Parallelen zu OA . Dasselbe muß von Punkt C gelten, denn man kann die Maßstäbe für H_a und \mathcal{L}_a so wählen, daß $I I_a = AC$. Punkt C_1 bewegt sich dann auf einer Parallelen zu OA_1 . Diese Gerade heißt daher eine Leistungslinie. Man erkennt, daß die Leistungslinie für $N_e = 0$ nicht mit OA_1 zusammenfällt, sondern etwas links davon liegt, weil $I I_a$ dann nicht verschwindet, sondern gleich H_a wird. $E_\lambda = OC_1$ ist die EMK, die vorhanden sein würde, wenn die Maschine nicht gesättigt wäre. Man darf daher E_λ zur Konstruktion des Punktes C_1 nicht aus der Leerlaufcharakteristik entnehmen, weil man dadurch den Wert OC_1' erhält.

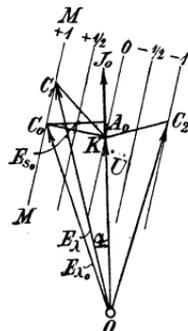


Abb. 245. Leistungslinien.

Man denke sich nun, daß nicht E , sondern die Klemmenspannung U der Maschine konstant bliebe, etwa dadurch, daß sie auf Sammelschienen arbeitet, deren

¹⁾ Literatur: Kapp, ETZ 1899, S. 134. — Görges, ETZ 1900, S. 188; 1903, S. 561 (Vortrag) Physik. Zeitschr. 1909, S. 256 (n Masch.). — Görges u. Weidig, ETZ 1910, S. 332 (Versuche). — Rosenberg, ETZ 1902, S. 425 (graph. Theorie) 1903, S. 857 (Dämpfung). — Föppl, ETZ 1902, S. 59 (Regulator-schwingungen). — Sommerfeld, ETZ 1904, S. 273. — Emde, El. u. Maschb. 1907, S. 721 und 1909, S. 1073 (Dämpfung). — Fleischmann, ETZ 1906, S. 873; Benischke, El. u. Maschb. 1907, S. 1009 (2 Masch.). — Weißhaar, El. u. Maschb. 1908, S. 555 (n Masch.). — van Dyk, ETZ 1911, S. 99 (Versuche). — Punga, ETZ 1911, S. 385 (Versuche). — Schüller, ETZ 1911, S. 1199. — Czeija, ETZ 1912, S. 177. — Ferner Diskussionen zwischen Benischke, Emde, Görges, Rosenberg in d. ETZ u. El. u. Maschb. — Monographien: Benischke, Der Parallelbetrieb d. Wechselstrommasch. Braunschweig 1902. — Huldshiner, Diss. Über d. Pendeln parallel geschalteter Drehstromgen. Voitsche Samml. 1906 (mehrere Masch.). — Sarfert, Diss. Über d. Schwingen d. Wechselstrommasch. m. Parallelbetrieb (n Masch.). Forschungshefte d. V. D. I. 1908.

Spannung durch den nach Größe und Richtung unveränderlichen Vektor $U = OK$, Abb. 245, dargestellt werde. Man kann dann leicht nachweisen, daß die Leistung der Maschine $N_p = UI \cos \varphi$ unverändert bleibt, wenn sich der Endpunkt C des Vektors der fiktiven EMK bei Leerlauf E_λ auf einer bestimmten durch C_0 gelegten Geraden MM bewegt. Diese Gerade wird gefunden, indem man den Vektor E_{λ_0} für den Fall, daß keine Phasenverschiebung vorhanden ist, bei der gegebenen Leistung konstruiert und durch seinen Endpunkt C_0 eine Senkrechte zu KC_0 zieht. Zu jeder Leistung gehört eine Leistungslinie, deren Abstand vom Punkte K der Leistung proportional ist. Wird die der Maschine von ihrer Antriebsmaschine zugeführte Leistung größer, so wird der Winkel α größer, der Endpunkt C des Vektors E_λ gelangt auf eine andere Leistungslinie, und die Maschine gibt mehr Leistung ab, ohne daß sich ihre Geschwindigkeit ändert. Es hat sich nur infolge einer vorübergehenden Beschleunigung die relative Lage des rotierenden Teiles der Maschine, d. i. ihre Voreilung, geändert. Entspricht überhaupt aus irgendeinem Grunde die augenblickliche Lage nicht dem Gleichgewicht zwischen zugeführter und abgegebener Leistung, so tritt ein synchronisierendes Moment auf, das die Voreilung vergrößert oder verkleinert und dadurch die richtige Lage wiederherstellt. Aus dem Diagramm der Leistungslinien läßt sich ableiten, daß das synchronisierende Moment M der Winkelabweichung $\angle \alpha$ des Vektors E_λ von der richtigen Lage OC_1 proportional ist. Das der Abweichung Eins (im Bogenmaß gemessen) entsprechende Moment kann man als das synchronisierende Richtmoment M_s bezeichnen. Man erhält dann

$$M = M_s \cdot \angle \alpha \quad \text{und} \quad M_s = \frac{p^2}{2\pi f} \cdot N \left(\frac{U}{E_{s_0}} + \operatorname{tg} \varphi \right)$$

Hierin bedeutet p die Polpaarzahl, f die Frequenz in Per/s, N die normale Leistung in Watt gleich der zugeführten Leistung, indem von Verlusten abgesehen wird, U die Klemmenspannung, E_{s_0} den induktiven Spannungsverlust bei der Leistung N und $\cos \varphi = 1$, φ die bei dieser Leistung vorhandene Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Klemmenspannung der Maschine.

(484) Eigenschwingungen (Boucherot). Das synchronisierende Moment hat zur Folge, daß bei Abweichungen von der richtigen Lage OC_1 Schwingungen um diese Lage auftreten, deren Dauer gegeben ist durch die Beziehung

$$T = \frac{2\pi}{p} \cdot \sqrt{\frac{2\pi f J}{N(U/E_{s_0} + \operatorname{tg} \varphi)}}$$

worin T die Dauer einer ganzen Schwingung (hin und her) in Sekunden, J das Trägheitsmoment im absoluten Maßsystem in m^2kg , N die Leistung in Watt. Eigenschwingungen können bei jeder Art des Antriebes auftreten, sie werden aber meistens nach kurzer Zeit durch Dämpfung beseitigt.

Es sind indessen eine Reihe Fälle beobachtet worden, in denen die Eigenschwingungen nicht verschwinden, sondern entweder dauernd für sich allein bestehen bleiben oder mit erzwungenen Schwingungen dauernd Schwebungen bilden. Sie werden begünstigt, wenn die Polschäfte aus massivem Eisen bestehen, oder wenn sie von Metallteilen (z. B. metallenen Spulenkasten) umgeben sind, die so in sich geschlossen sind, daß sich darin Ströme bilden können, welche die Polschäfte umkreisen, oder wenn der Erregerkreis wenig Widerstand, wie bei der Erregung durch Akkumulatoren, besitzt. Damit nämlich die jeder Voreilung entsprechende Leistung sofort auftreten kann, muß sich der Magnetismus auch sofort um die dazu nötigen Beträge ändern können. Es geht aber aus Abb. 240 hervor, daß die EMK OA_1 etwas wachsen muß, wenn bei konstantem U die Leistung größer wird, und proportional mit OA_1 muß $\Phi_a = OA$ wachsen. Es muß daher alles vermieden werden, was die Einstellung des Magnetismus Φ_a verlangsamt. Vgl. Wagner, El. u. Maschb. 1908, S. 686. — Dreyfus, El. u. Maschb. 1911, S. 323.

(485) Erzwungene Schwingungen. Es kann auch die Antriebsmaschine die Urheberin von Schwingungen sein, wenn nämlich ihre Leistung während einer Umdrehung nicht konstant ist, sondern periodischen Änderungen wie bei Kolbenmaschinen unterliegt. Man kann diese Änderungen durch eine Reihe von Sinusschwingungen ersetzen, deren erste eine Schwingungsdauer gleich der Dauer einer Umdrehung (bei Dampfmaschinen) oder gleich der Dauer eines Arbeitsprozesses (z. B. bei Viertaktmaschinen), und deren folgende eine Dauer gleich der Hälfte, einem Drittel, einem Viertel der Schwingungsdauer der ersten Schwingung haben. Jede solche Schwingung in der Leistungszufuhr ruft eine entsprechende Schwingung in der Geschwindigkeit hervor. Der Gang wird daher ungleichförmig, und in der Stellung finden Abweichungen von der „Sollstellung“ statt. Man nennt diese Schwingungen, deren Dauer von der Antriebsmaschine abhängt, „erzwungene Schwingungen“. Wenn eine Maschine für sich allein arbeitet, derart, daß ihre Belastung im wesentlichen als konstant angesehen werden kann, so ergibt sich der Ungleichförmigkeitsgrad im Gange der Maschine (gleich $(v_{\max} - v_{\min})/v_{\text{mittel}}$ wenn v die Geschwindigkeit) aus dem Tangentialdruckdiagramm, besser Momentendiagramm genannt, und dem Trägheitsmoment nach den Regeln des Maschinenbaues. Wenn dagegen mehrere Maschinen parallel arbeiten, so wird der Ungleichförmigkeitsgrad infolge von „Mitschwingen“ vergrößert. Daraus ergeben sich mehr oder minder große Schwingungen in der Stromstärke, der Leistung, ja auch der Spannung, und die Maschinen sind der Gefahr ausgesetzt, aus dem Tritt zu fallen. Auf keinen Fall darf die Eigenschwingungsdauer T_0 mit der Dauer einer der erzwungenen Schwingungen $T_{a1}, T_{a2} \dots$ ganz oder nahezu übereinstimmen. Nachträglich kann man durch Einschalten von Drosselspulen in die Ankerkreise E_{s0} vergrößern und dadurch Abhilfe schaffen. Gefährlich ist bei Dampfmaschinen und Zweitakt-Gasmotoren in der Regel nur die Grundschwingung, deren Dauer gleich der Dauer einer Umdrehung der Kurbelwelle ist, bei Viertakt-Gasmaschinen die Grundschwingung, deren Dauer gleich der Zeit zweier Umdrehungen der Kurbelwelle ist, und die erste Oberschwingung. Beide lassen sich aus dem Momentendiagramm berechnen, vergl. die Hinweise in (471). Das Mitschwingen wird durch Dämpfung verkleinert.

(486) Resonanzmodul. Die Vergrößerung des Ungleichförmigkeitsgrades wird für den Fall, daß keine Dämpfung vorhanden ist, durch den Resonanzmodul ζ angegeben, wobei

$$\zeta = \pm \frac{T_0^2}{T_0^2 - T_a^2} = \pm \frac{z_a^2}{z_a^2 - z_0^2}$$

Hierin ist T_0 die Eigenschwingungsdauer (484), T_a die Schwingungsdauer der Antriebsmaschine, z_0 und z_a sind die entsprechenden Schwingungszahlen. In Abb. 246 stellen die ausgezogenen Kurven die Abhängigkeit des Resonanzmoduls von z_0/z_a für die Grundschwingung (ζ_1) und die erste Oberschwingung (ζ_2) dar. Ist $T_0 = T_a$, so ist vollkommene Resonanz vorhanden und ein Betrieb ohne Dämpfung unmöglich. Für einen sicheren Betrieb muß T_0 größer als T_a gewählt werden. Hierzu ist ein um so größeres Trägheitsmoment erforderlich, je geringer die Drehzahl und je größer die Schwingungsdauer T_a der Antriebsmaschine ist. Bei Viertakt-Gasmotoren muß das Trägheitsmoment besonders groß gewählt werden, damit T_0 größer als die Dauer T_{a1} der Grundschwingung ist, Abb. 304. Manche Konstrukteure ziehen es daher vor, in solchen Fällen T_0 zwischen die Dauer T_{a1} der Grundschwingung und die Dauer T_{a2} der ersten Oberschwingung fallen zu lassen. Es besteht dann aber die Gefahr, daß Resonanz mit einer der beiden Schwingungen eintritt.

(487) Dämpfung. Die Ankerströme erzeugen ein rotierendes Feld, (463 u. 464), das in den massiven Teilen der Polschuhe und in besonderen Dämpfungswicklungen Ströme induziert, sobald die Feldmagnete Schwingungen ausführen. Hierdurch werden die Schwingungen gedämpft. Die Dämpfungswicklung von H u t i n und L e b l a n c besteht aus starken Kupferbolzen, die nahe der Peripherie durch die

Polschuhe gezogen und auf beiden Seiten am besten sämtlich durch starke Kupferstücke gut leitend miteinander verbunden sind. Vgl. (465).

Die Dämpfung kann schädlich oder nützlich wirken. Eine mäßige Dämpfung wirkt immer nützlich, indem sie die Eigenschwingungen beseitigt. Eine starke Dämpfung verringert die erzwungenen Schwingungen, damit aber auch zugleich die Wirksamkeit des Schwungrades, das Energie nur bei Geschwindigkeitsänderungen aufnehmen und abgeben kann. In diesem Falle können die Schwankungen der abgegebenen Leistung größer ausfallen.

Um starke Erwärmung der Dämpferstäbe zu verhüten, sind entweder die Abstände der Dämpferstäbe voneinander gleich der Zahnteilung auf dem Anker zu machen, oder es ist bei Schrägstellung der Polkanten und der Dämpferstäbe der Winkel so zu wählen, daß man beim Durchlaufen eines Stabes um den Abstand zweier Stäbe auf dem Umfang weiterschreitet (vgl. Schmidt, ETZ 1915, S. 187).

(488) Ungleichförmigkeitsgrad der Leistungsabgabe. Die gesamte ins Netz gelieferte Leistung N setzt sich aus der Leistung zusammen, die der Voreilung proportional ist, und der Dämpfungsleistung, die der Leistung asynchroner Strom-

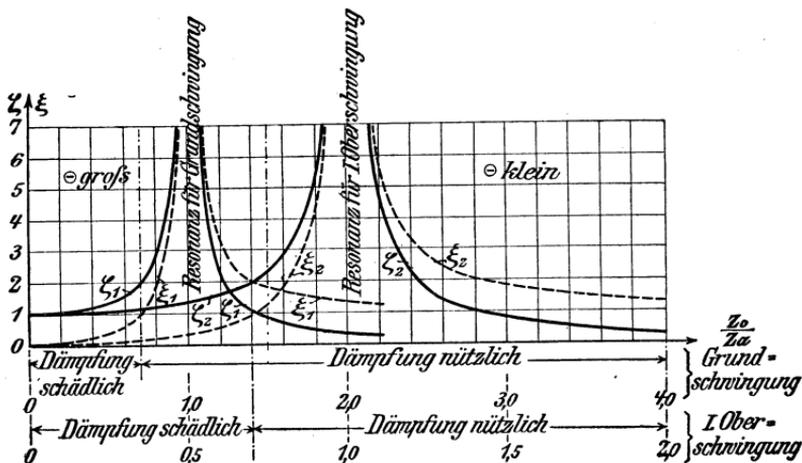


Abb. 246. Resonanzmodul beim Parallelbetrieb (der Wechselstrommaschinen).

erzeuger, (515) und (542), entspricht. Der Ungleichförmigkeitsgrad der Gesamtleistung ist, wenn die Dämpfung fehlt,

$$\delta = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\text{mittel}}} = \pm 2 \frac{R}{N_{\text{mittel}}} \cdot \frac{z_0^2}{z_0^2 - z_a^2} = \pm 2 \frac{R}{N_{\text{mittel}}} \cdot \xi$$

und bei unendlich starker Dämpfung gleich $\delta = 2 \frac{R}{N_{\text{mittel}}}$.

Hierin bedeutet R die Amplitude der betrachteten einfachen Schwingung der Leistung, die man sich der mittleren Leistung überlagert denken muß. In Abb. 246 stellen die gestrichelten Kurven die Abhängigkeit der Zahl ξ von z_0/z_a für die Grundschwingung und die erste Oberschwingung dar. Die Rechnung ergibt, daß die Dämpfung den Ungleichförmigkeitsgrad der Leistungsabgabe vergrößert, wenn $z_0/z_a < \sqrt{2}$ ist. In diesem Falle ist $\zeta < 2$, $\xi < 1$. Wenn dagegen $z_0/z_a > \sqrt{2}$ ist, so ist die Dämpfung immer nützlich, besonders wenn z_0/z_a ganz oder nahezu gleich 1 ist, d. h. im Falle der Resonanz. Sie kann den Ungleichförmigkeitsgrad der Leistungsabgabe dann aber höchstens bis auf $2 R/N_{\text{mittel}}$ verkleinern. Nützlich

ist die Dämpfung besonders bei Maschinen mit geringem Trägheitsmoment, deren Antrieb ziemlich gleichförmig ist, die aber infolge von Resonanz besonders stark schwingen. Liegt z_0 zwischen z_{a1} und z_{a2} , so ist die Dämpfung hinsichtlich der Grundschwingung nützlich, hinsichtlich der ersten Oberschwingung schädlich.

Das von den Maschinenfabriken gewöhnlich angegebene Schwungmoment GD^2 ist gleich dem vielfachen Trägheitsmoment J , beide in m^2kg gemessen.

(489) Parallelbetrieb beliebig vieler Maschinen. (Fleischmann, Huld-schiner, Sarfert, Görges, Weißhaar, siehe S. 321, Fußnote.) Im allgemeinen ist die Bedingung, daß Größe und Frequenz der Netzspannung konstant seien, nicht erfüllt. Es ergibt sich dann, daß sich Synchronmotoren und synchrone Umformer genau so verhalten wie Synchrongeneratoren. Der Betrieb einer Kraftübertragung mit einem Synchrongenerator und einem Synchronmotor unterliegt z. B. denselben Gesetzen, wie der Parallelbetrieb zweier Synchrongeneratoren, wenn sie auf feste Ohmsche Widerstände arbeiten. Auch asynchrone Maschinen können ins Schwingen geraten, aber nur erzwungene Schwingungen ausführen, weil ihnen das synchronisierende Richtmoment fehlt. Beim Betriebe von n Synchronmaschinen sind $(n-1)$ Eigenschwingungszahlen vorhanden, die bei gleichen oder ähnlich gebauten Maschinen in eine einzige zusammenfallen. Resonanz mit jeder einzelnen Eigenschwingung stört den Betrieb des ganzen Systems. Die Störung kann von jeder Maschine ausgehen, z. B. von einem Induktionsmotor, der eine Kolbenpumpe antreibt. Bei Kurbelsynchronismus ist zwar der Parallelbetrieb der Generatoren einer Zentrale leichter aufrecht zu erhalten, allein das Parallelschalten selbst ist schwierig und sehr zeitraubend. Es ist aber direkt gefährlich, wenn Synchronmotoren und Umformer an das Netz angeschlossen sind, weil diese dann leicht ins Schwingen kommen. Eine gleichmäßige Verteilung der Kurbelstellungen ist dann bei weitem vorzuziehen. Bei drei gleichen Dampfmaschinen oder vier gleichen Viertakt-Gasmotoren verhält sich die Klemmenspannung, wenn die Kurbeln gleichmäßig verstellt sind, bereits ähnlich wie in einem unendlich starken Netz; man kann also die Gesetze anwenden, die für eine Maschine in Parallelschaltung mit einem unendlich starken Netz gelten.

Die Eigenschwingungszahl zweier parallelgeschalteter Maschinen läßt sich leicht berechnen. Ist mit den Bezeichnungen in (483) und (484)

$$r = N \left(\frac{U}{E_{s0}} + \operatorname{tg} \varphi \right), \quad \mathfrak{F} = \frac{2\pi f J}{p^2}$$

so sind die Schwingungszahlen der Maschinen gegen ein unendlich starkes Netz

$$z_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{r_1}{\mathfrak{F}_1}}, \quad z_2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{r_2}{\mathfrak{F}_2}}$$

und die gemeinsame Eigenschwingungszahl, wenn die beiden Maschinen miteinander parallel arbeiten,

$$z_{12} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\mathfrak{F}_1} + \frac{1}{\mathfrak{F}_2} \right) \left/ \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \right.}$$

(490) Bedingungen für den Regulator. Der Unempfindlichkeitsgrad des Regulators muß größer sein als der Ungleichförmigkeitsgrad der Maschine. Er darf nicht durch die Geschwindigkeitsschwankungen, die innerhalb jeder Umdrehung auftreten, ins Spiel kommen. Ein Regulator, der bei Einzelbetrieb ausgezeichnet arbeitet, kann beim Parallelbetrieb versagen, weil der Ungleichförmigkeitsgrad dann durch Mitschwingen vergrößert wird. In einem solchen Falle kann eine am Regulator angebrachte Dämpfung, z. B. eine Ölbremse, den Fehler beseitigen. Man tut aber gut, von vornherein gut statische Regulatoren vorzusehen, die zwischen Leerlauf und Vollbelastung eine Änderung der Drehzahl um mindestens 5% ver-

ursachen. Die Regulatoren müssen während des Betriebes verstellbar sein, um die zugeführte Leistung bei konstanter Geschwindigkeit einstellen zu können. Denn da die Frequenz konstant gehalten wird, muß die Leistung jeder Maschine beim Zu- und Abschalten bei gegebener Geschwindigkeit auf Null gebracht und während des Betriebes auf jeden Betrag bis zur Höchstleistung eingestellt werden können.

(491) Parallelschalten und Hilfsmittel dazu. (Teichmüller, ETZ 1909, S. 1039; 1910, S. 265.) Man kann einen Pol einer Wechselstrommaschine mit einem Pol einer anderen verbinden. Die beiden noch freien Pole dürfen miteinander verbunden werden, wenn sie dasselbe Potential haben, also keine Spannung zwischen ihnen herrscht. Man erkennt dies daran, daß man einen geeigneten Spannungszeiger zwischen die Pole schaltet oder eine Reihe hintereinander geschalteter Glühlampen, die für eine Gesamtspannung gleich der Summe der EMK e beider Maschinen zu wählen sind. Ist die Spannung sehr hoch, so nimmt man kleine Transformatoren, deren Hochspannungswicklungen zwischen die Klemmen je einer Maschine und deren Niederspannungswicklungen unter Einschluß eines Spannungszeigers oder einer Glühlampe gegeneinander geschaltet werden. Das Verschwinden des Ausschlags beim Zeiger und das Erlöschen der Lampen zeigt den Augenblick an, in dem parallel zu schalten ist. Der Symmetrie halber schaltet man zwischen je zwei zu verbindende Pole eine (oder die gleiche Anzahl) Glühlampen. Haben die Maschinen verschiedene Frequenzen, so werden die Lampen abwechselnd hell und dunkel. Dies erzeugt bei großer Verschiedenheit ein Flimmern der Lampen, bei geringer ein langsames Aufleuchten und Verlöschen. Dieser letztere Zustand ist durch Verstellung des Regulators der Antriebsmaschine gut herzustellen. In den Fällen, wo eine Regulierung durch Verstellung des Regulators unmöglich ist, muß eine Belastungsbatterie angewendet werden, doch geschieht dies heutzutage selten. Zu demselben Zwecke hat D e t t m a r eine Wirbelstrombremse vorgeschlagen (ETZ 1899, S. 728).

(492) Gleichlaufzeiger. Die Spannung, die jede Lampe oder Lampengruppe erhält, ergibt sich aus dem Diagramm Abb. 247. $A_1 B_1$ ist die Klemmenspannung der einen, $A_2 B_2$ die der anderen Maschine. Läuft Maschine II langsamer als Maschine I, so müßte man annehmen, daß ihre Zeitlinie langsamer umläuft als die andere, oder man nimmt an, daß nur eine Zeitlinie vorhanden ist, dafür aber $A_2 B_2$ sich langsam im Sinne des Uhrzeigers dreht. Dadurch werden die Spannungen $A_1 A_2$ und $B_1 B_2$, denen die Glühlampen ausgesetzt sind, erst größer, bis sie die volle Spannung einer Maschine erreicht haben, und dann wieder kleiner.

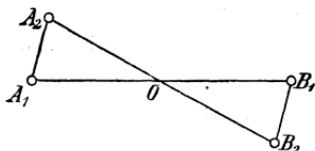


Abb. 247. Spannungsdiaagramm beim Phasenvergleich zweier Einphasenmaschinen.

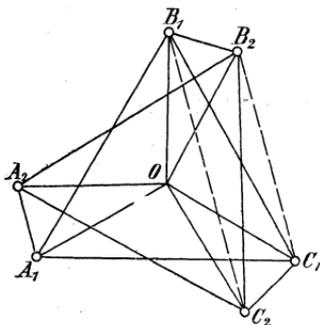


Abb. 248. Spannungsdiaagramm beim Phasenvergleich zweier Drehstrommaschinen.

Die Parallelschaltung muß erfolgen, wenn $A_1 B_1$ und $A_2 B_2$ einander genau decken. Diese Anschauung erklärt die Vorgänge beim Parallelschalten von Drehstrommaschinen besonders einfach. Man schalte zwischen je zwei zusammengehörige Klemmen eine Glühlampe oder eine Gruppe von solchen und vertausche nötigenfalls die Anschlüsse an einer Maschine so lange, bis alle Lampen zugleich hell und dunkel werden. Die Pole, die nun durch Lampen miteinander verbunden sind, müssen auch

beim Parallelbetrieb verbunden sein. Man schaltet wieder parallel im Augenblicke, wo die Lampen dunkel sind wie vorher. Im Diagramm (Abb. 248) sind die Lampenspannungen A_1A_2 , B_1B_2 , C_1C_2 . Jede Lampengruppe muß, wie das Diagramm zeigt, das Doppelte der Sternspannung, d. h. das $2/\sqrt{3}$ fache der Drehstromspannung aushalten können. Schaltet man aber nach Michalke (ETZ 1896, S. 573) eine Lampengruppe zwischen A_1 und A_2 , die zweite zwischen B_1 und C_2 , die dritte zwischen C_1 und B_2 , so werden die Lampengruppen nacheinander hell und dunkel. Wenn man sie in den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks anordnet, so sieht man den Lichtschein rotieren, und zwar im einen oder anderen Sinne, je nachdem Maschine II zu langsam oder zu schnell läuft. Man kann dies am Diagramm leicht verfolgen, wenn man das Diagramm der Maschine II langsam nach links oder rechts dreht. Die Parallelschaltung muß jetzt erfolgen, wenn die Lampengruppe A_1A_2 dunkel ist. Die Vorrichtung zur Einstellung des Synchronismus und der Phasengleichheit nennt man „Phasenvergleichler“. Eine einfache Anordnung ist die der Siemens-Schuckertwerke, bei der 6 Glühlampen in einem Gehäuse in einem Kreise angeordnet sind. Je zwei einander gegenüberliegende Lampen sind hintereinander geschaltet. Die Lampen selbst sind verdeckt und beleuchten einen Reflektor, auf dem eine rotierende Lichtlinie erscheint. Man hat dasselbe Prinzip auch benutzt, um die Maschinen selbsttätig parallel zu schalten (495). Hartmann und Braun liefern zum Phasenvergleichern Frequenzmesser, die von den Spannungen beider Maschinen gleichzeitig erregt werden und daher bei Phasengleichheit einen besonders großen konstanten Ausschlag haben. (ETZ 1904, S. 44.; 1910, S. 1307.)

(493) Hellschaltung und Dunkelschaltung. Bei der beschriebenen Anordnung gibt das Verlöschen einer Lampe an, wann die Maschinen parallel geschaltet werden müssen. Manche Ingenieure ziehen es vor, die Lampen so zu schalten, daß im Augenblick des stärksten Aufleuchtens parallel geschaltet werden muß. Bei Einphasenstrom braucht man die Lampen nur zwischen A_2 und B_1 sowie zwischen B_2 und A_1 , Abb. 247, zu schalten. Bei Drehstrom ist zur Herstellung der Hellschaltung stets noch ein Transformator erforderlich, um die Phasen um 180° umzukehren. Man denke sich zunächst beide Wicklungen des Transformators gleichsinnig in Stern geschaltet, so daß in einem bestimmten Augenblick die EMKe in homologen Zweigen der Primär- und der Sekundärwicklung vom Nullpunkt nach den Außenklemmen hin gerichtet sind. Man schneide jetzt die Sekundärwicklung am Nullpunkt auf, so daß hier die drei Klemmen entstehen, und vereinige die bisherigen drei Klemmen zum Nullpunkt, so hat man die Phasen um 180° umgekehrt.

(494) Verteilung der Last auf parallellaufende Maschinen. Nachdem die Maschinen parallel geschaltet worden sind, kann man ihre Leistung nicht durch Verstellung des Regulierwiderstandes einstellen, sondern nur durch Verstellung des Regulators der Antriebsmaschine. Man wird z. B. bei Dampfmaschinen den Regulator der zugeschalteten Maschine auf größere Dampfzufuhr einstellen, die übrigen auf verminderte Dampfzufuhr. Zur Erkennung der Leistung erhält jede Dynamomaschine zweckmäßig einen Leistungszeiger. Wie die Leistungslinien zeigen (483), kann die Stromstärke bei gegebener Leistung sehr verschieden groß sein. Man verstellt daher die Regulierwiderstände so, daß alle Maschinen bei gleicher Leistung auch dieselbe Stromstärke liefern.

Zum Zwecke des Abschaltens vermindert man durch Verstellung des Regulators der Antriebsmaschine die Leistung bis auf Null und verringert dann mit Hilfe des Nebenschlußregulierwiderstandes auch die Stromstärke bis auf Null. Die Schalter können dann ohne Funken und ohne die geringste Störung im Betriebe geöffnet werden.

(495) Zum selbsttätigen Parallelschalten benutzt man z. B. Elektromagnete mit zwei Wicklungen, von denen die eine ans Netz, die andere an die zuzuschaltende Maschine geschaltet wird. Man kann dadurch erreichen, daß sie ihren Anker anziehen und einen Stromkreis schließen, wenn beide Ströme gleiche Phase haben

(vgl. Besag ETZ 1910, S. 647; 1912, S. 135). Die Siemens-Schuckertwerke (Michalke) benutzen einen Induktionsmotor, dessen drei Ständerwicklungen wie die Lampen nach Diagramm Abb. 248 geschaltet werden, während der Läufer eine einphasige kurzgeschlossene Wicklung erhält. Der Motor erhält dadurch ein pulsierendes Feld, das sich mit einer dem Unterschied der Frequenzen proportionalen Geschwindigkeit in der einen oder der anderen Richtung dreht, je nachdem die Maschine zu schnell oder zu langsam läuft. Der Läufer sucht sich auf ein Stromminimum in seiner Wicklung einzustellen und folgt daher dem Ständerfeld (vgl. Michalke ETZ 1921, S. 1098 und Wissenschaft. Veröffentl. aus d. Siemens-Konzern, Bd. II S. 293).

Wechselstrommotoren.

(496) Arten der Motoren. Man unterscheidet

1. Synchronmotoren,
2. Asynchronmotoren.
 - a) Induktionsmotoren mit Schleifring- oder Kurzschlußanker.
 - b) Kommutatormotoren.

Die Synchronmotoren laufen mit einer genau durch die Frequenz f vorgeschriebenen Geschwindigkeit, die die synchrone oder die Geschwindigkeit bei Synchronismus heißt. Bei ihr legt der Läufer während einer Periode des Wechselstromes genau die doppelte Polteilung zurück. Die Drehzahl ist daher genau

$$n = \frac{60 f}{p}$$

also bei 50 Per/s 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500, 429, 375, 333, 300 usw. U/min.

Die Asynchronmotoren laufen mit einer vom Synchronismus abweichenden Geschwindigkeit. Bei den Induktionsmotoren weicht die Drehzahl nur wenig von der des Synchronismus ab — sie laufen bei allen Belastungen mit annähernd derselben Geschwindigkeit und gleichen darin den Nebenschlußmotoren für Gleichstrom. Die Geschwindigkeit der Kommutatormotoren weicht oft sehr erheblich von der des Synchronismus ab; man unterscheidet sie in solche, die mit annähernd konstanter Geschwindigkeit laufen, und solche, bei denen die Geschwindigkeit mit zunehmender Belastung stark abnimmt.

Hiernach kann man zwischen Asynchronmotoren mit Nebenschlußcharakteristik und solchen mit Reihenschlußcharakteristik unterscheiden. Hauptvertreter der ersteren sind die Induktionsmotoren, die Kommutatormotoren haben meistens Reihenschlußcharakteristik. Bemerkenswert ist, daß alle Einphasenmotoren mit Nebenschlußcharakteristik nicht von selbst anlaufen, sondern dazu besonderer Mittel bedürfen.

Synchronmotoren.

(497) Verhalten der Synchronmotoren. Die Synchronmotoren unterscheiden sich in der Bauart nicht von den Synchrongeneratoren; sie sind nichts anderes als in der Wirkung umgekehrte Generatoren. Ihre Arbeitsweise kann daher in derselben Art wie die der Generatoren an der Hand der Darstellung der Leistungslinien (483) erklärt werden. Entzieht man nämlich einem Synchrongenerator nach dem Parallelschalten zu anderen Generatoren die antreibende Kraft, so läuft er als Motor weiter, wobei sich lediglich die relative Lage der Pole zum Anker verändert, was gleichbedeutend ist mit einer Veränderung der Phase der fiktiven EMK E_λ bei Leerlauf, Abb. 245. Der Endpunkt C des Vektors E_λ bewegt sich im Diagramm nach rechts, bis er eine Leistungslinie erreicht, die der von der Maschine abzugebenden mechanischen Leistung entspricht, etwa in die Lage OC_2 . KC ist stets der Stromstärke proportional. Wird die Erregung geändert, so ändert sich auch

E_λ , und C wandert auf derselben Leistungslinie, so daß sich eine andere Stromstärke und eine andere Phasenverschiebung als vorher ergibt. Konstruiert man für verschiedene Erregungen die Stromstärken bei unveränderter Leistung, so ergibt sich, wenn man die Erregerstromstärken als Abszissen und die Ankerstromstärken als Ordinaten in ein Koordinatensystem einträgt, die sogenannte V -Kurve. Die V -Kurve ist am spitzesten bei Leerlauf und flacht sich mit der Belastung des Motors immer mehr ab (Abb. 249). Für die Drehzahl und die Polzahlen gelten die Beziehungen in (496).

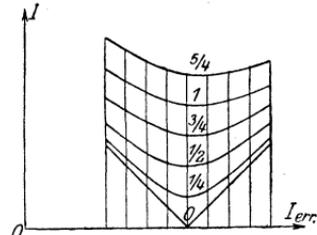


Abb. 249. V -Kurven des Synchronmotors.

Phasenverschiebung. Die graphische Darstellung in Leistungslinien zeigt also die bemerkenswerte Tatsache, daß, gleichgültig was für Belastung vorhanden ist, durch Änderung der Erregung jede beliebige Phasenverschiebung, also auch Phasenvoreilung eingestellt werden kann, daß daher die Stromstärke unabhängig von der Leistung in weiten Grenzen veränderlich ist, und daß selbst im Leerlauf starke Ströme aufgenommen werden können.

Überlastbarkeit. Aus dem Leistungsliniendiagramm erkennt man, daß Synchronmotoren eine bedeutende Überlastung vertragen, sofern vom Netz her auch bei großer Stromentnahme die Klemmenspannung aufrecht erhalten werden kann. Die größte zulässige Belastung ist durch die Leistungslinie gegeben, die den mit $E_\lambda = OC$ um O geschlagenen Kreis berührt. Die Überlastungsfähigkeit ist um so größer, je geringer der induktive Spannungsabfall und je stärker die Erregung ist. Das „Kippmoment“ kann das 3- bis 4fache des normalen Momentes betragen.

(498) Vorzüge und Nachteile der Synchronmotoren. In der Einstellbarkeit der Phasenverschiebung besteht der Hauptvorteil des Synchronmotors. Man kann durch passende Erregung mit dem Leistungsfaktor Eins arbeiten, ja man kann den Synchronmotor sogar als Phasenregler in stark mit Blindströmen belasteten Netzen benutzen, indem man ihn mit Phasenvoreilung laufen läßt.

Diesen Vorteilen stehen als empfindliche Nachteile die Notwendigkeit einer besonderen Erregung mit Gleichstrom und die Schwierigkeit des Anlassens unter Last bei normaler Frequenz gegenüber.

(499) Klein-Synchronmotor von Dr. Max Levy. Schüler führt den primären Strom dem Läufer eines Induktionsmotors über drei Schleifringe zu. Der Läufer besitzt neben der Drehstromwicklung noch eine Kommutatorwicklung, der bei synchronem Lauf Gleichstrom entnommen wird, weil dann das im Läufer erzeugte Feld im Raume stillsteht. Mit dem Gleichstrom wird der Ständer, der eine normale Drehstromwicklung besitzt, erregt. Der Motor läuft als Induktionsmotor an, fällt von selbst in Synchronismus und läuft bei starker Überlastung asynchron weiter. Der Leistungsfaktor ist bei starker Belastung gleich 1, bei schwacher Belastung geringer, aber mit voreilender Phasenverschiebung (ETZ 1923, S. 4).

(500) Anlassen der Synchronmotoren. Der Synchronmotor ist ohne besondere Vorkehrungen zum Anlaufen nur bei synchronem Lauf imstande, ein großes Drehmoment auszuüben. Einphasenmotoren entwickeln bei Stillstand gar kein Drehmoment, Mehrphasenmotoren infolge von Wirbelstrombildung in den Polschuhen ein geringes. Ohne Belastung kann man letztere daher anlassen, wenn man die Erregung ganz abschaltet oder über einen sehr großen Widerstand schließt. Der Anlaufstrom ist sehr bedeutend, etwa das 4-fache des Normal-

stromes, das Anlaufmoment trotzdem gering. Man setzt die Spannung daher am besten mittels eines Spartransformators auf etwa den dritten Teil herunter. Im Erregerkreise werden dabei sehr hohe für die Isolation und das Bedienungspersonal gefährliche Spannungen induziert, so daß diese Anlaßmethode besondere Vorsicht erheischt. Die Gefahr besteht bei Einphasenstrom bis zum Synchronismus, bei Mehrphasenmotoren ist sie bei Stillstand am größten und nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit des Motors ab (464). Man zerlegt daher auch wohl die Erregerwicklung vor dem Anlassen in mehrere Teile und schaltet diese erst in der Nähe des Synchronismus in Reihe.

Besser sind die im folgenden beschriebenen Anlaßmethoden.

1. Der Motor wird durch einen besonderen „Anwurfmotor“ in Bewegung gesetzt und bei Synchronismus wie ein normaler Generator zum Netz parallel geschaltet.

2. Der als Stromquelle dienende Generator wird bei Stillstand auf den ruhenden Motor geschaltet, stark erregt und langsam in Gang gesetzt. Der ebenfalls stark erregte Motor läuft dann gleichzeitig mit dem Generator an und gelangt bei Beschleunigung des Generators auf Synchronismus. Er wird dann wie ein normaler Generator mit dem Netz parallel geschaltet. Man kann dazu einen besonderen Motorgenerator aufstellen, der bei Leeranlauf des Motors für eine geringere Leistung bemessen und für beliebig viele Motoren benutzt werden kann. (Vgl. Klingenberg, Bau großer El.-Werke, Springer, Berlin 1913, Bd. 1. Anlagen d. Victoria Falls and Transvaal Power Co., Z. d. V. d. I. 1913, S. 128; 12 Synchronmotoren von je 2000 PS, dazu zwei Anlaßmotorgeneratoren von je 1250 bis 1410 kVA.)

3. Die Feldmagnete erhalten eine Käfigwicklung (508 u. 487), der Anker wird nach Herabsetzung der Spannung durch einen Transformator (in Sparschaltung [339]) auf etwa den dritten Teil eingeschaltet. Das Anlaufmoment beträgt etwa 30% des normalen bei dem 1,5-fachen des Normalstromes.

4. Der Synchronmotor erhält eine zweite Wicklung in den Polschuhen, die mit der Erregerwicklung zusammen eine Art Zweiphasenwicklung bildet. Durch Herstellung der Feldmagnete aus Eisenplatten von geeigneter Dicke und Kurzschlußwindungen, die um die Pole gelegt werden, wird verhindert, daß die Pulsationen des Magnetismus in den Feldmagneten einen zu großen Wert annehmen (vgl. 465). Die Erreger- und die Anlaßwicklung werden über geeignete Widerstände geschlossen, letztere beim normalen Betrieb kurz geschlossen. Vgl. Böhm „Über das Intrittwerfen asynchron anlaufender Synchronmaschinen“, ETZ 1922, S. 426.

Einphasensynchronmotoren können in beliebiger Richtung auf Synchronismus gebracht werden, Mehrphasensynchronmotoren nur in einer bestimmten Richtung. Soll bei letzteren der Drehungssinn geändert werden, so hat man beim Drehstrom zwei Zuleitungen, beim Zweiphasenstrom die beiden Zuleitungen eines der beiden Stromkreise miteinander zu vertauschen.

Auch die Wechselstrom-Gleichstrom-Umformer verhalten sich hinsichtlich des Anlassens und des Betriebes wie die Synchronmotoren (570, 575).

Induktionsmotoren.

(501) Bei den **Induktionsmotoren** wird nur dem einen Teil — dem **Primäranker** — Strom vom Netz zugeführt, während die Ströme im anderen Teile — dem **Sekundäranker** — durch eine Transformatorwirkung induziert werden. Man kann sie als Transformatoren betrachten, deren Wicklungen möglichst nahe beieinander, aber auf getrennten Eisenkörpern liegen, von denen der eine konzentrisch im anderen rotieren kann; es ergibt sich hierbei eine Kraftwirkung, die zur Abgabe mechanischer Leistung ausgenutzt werden kann. Induktionsmotoren

werden entweder als Mehrphasenmotoren (Drehstrom-, Zweiphasen-, n -Phasenmotoren) ausgeführt und haben dann die Eigenschaft, von selbst anzulaufen, oder als Einphasenmotoren und können in dieser letzteren Form nur unter Anwendung besonderer Hilfsmittel in Gang gebracht werden.

Die Mehrphasenmotoren sind den Einphasenmotoren hinsichtlich Preis und Betriebseigenschaften erheblich überlegen.

(502) Arbeitsweise der Induktionsmotoren. Die mechanische Wirkung kommt bei den Mehrphasenmotoren dadurch zustande, daß ein magnetisches Drehfeld erzeugt wird, das sich über den sekundären Teil hinwegbewegt und dabei in letzterem Ströme induziert, die mit dem Drehfeld zusammen ein Drehmoment ergeben.

Auch bei den Einphasenmotoren entsteht ein Drehfeld, wenn der Motor rotiert, doch weichen die Vorgänge in seinem Sekundäranker erheblich von denen im Mehrphasenmotor ab.

Das Drehfeld schreitet in einer Periode des in der Wicklung fließenden Wechselstromes um die doppelte Polteilung, d. i. um den einem Polpaar entsprechenden Teil des Umfanges fort. Die Zahl der minutlichen Umdrehungen des Drehfeldes im Raum ist daher $n_0 = 60f/p$, worin f die Frequenz, p die Polpaarzahl bedeutet. Man nennt diese Zahl die Drehzahl bei Synchronismus.

Der Läufer läuft bei Leerlauf nahezu synchron; bei Belastung nimmt er eine „Schlüpfung“ oder „Schlupf“ σ von einigen Prozent an, seine Drehzahl ist also

$$n = \frac{60f}{p} (1 - \sigma)$$

Die Drehzahl eines Induktionsmotors ist daher angenähert gleich der des Drehfeldes. Man sieht, daß für geringe Drehzahlen hohe Polzahlen und umgekehrt erforderlich sind, und ferner, daß bei gegebener Frequenz die Drehzahl nicht beliebig gewählt werden kann (vgl. hierzu auch die Normalien des VDE).

(503) Aufbau. Für ein gutes Arbeiten der Induktionsmotoren ist es erforderlich, daß das Zustandekommen des Drehfeldes nicht durch eine Veränderlichkeit des magnetischen Widerstandes längs der Peripherie des Läufers gestört wird; Induktionsmotoren werden deshalb mit genuteten Eisenkörpern in Hohlzylinder- und Walzenform sowohl für den primären als auch für den sekundären Teil ausgeführt. Aus demselben Grunde dürfen beide Teile nicht dieselbe Nutenzahl besitzen. Man spricht deshalb bei ihnen im allgemeinen nicht von „Feldmagnet“ und „Anker“, sondern von „Primäranker“ und „Sekundäranker“.

Äußerlich unterscheidet man den „Ständer“ und den „Läufer“. Der Luftspalt zwischen Ständer und Läufer soll so eng gemacht werden, wie es sonstige Rücksichten, namentlich in mechanischer Hinsicht, gestatten. Kleine Motoren werden mit Luftspalt bis zu 0,5 mm herab, große mit Luftspalt von höchstens 3 mm radialer Tiefe ausgeführt. Aus demselben Grunde führt man die normalen Motoren auch fast durchweg mit nahezu oder auch wohl ganz geschlossenen Nuten aus.

(504) Der Ständer bildet in der Regel den Primäranker. Das Drehfeld wird in den Drehstrommotoren mit drei unter sich genau gleichen Wicklungszweigen (in der Werkstattp Sprache wohl auch schlechtweg „Phasen“ genannt) erzeugt, deren Symmetrieachsen am Umfang in gleicher Weise wie bei den Generatoren um je $2/3$ Polteilung gegeneinander verschoben sind und einander entsprechend übergreifen (Abb. 223 bis 226). Die Nutenzahl je Pol und Zweig wird möglichst hoch gewählt, doch ist bei ihrer Festlegung eine Berücksichtigung der Massenfertigung zu empfehlen, sobald es sich um kleinere oder mittlere Typen handelt. Für Zweiphasenmotoren wird das Drehfeld in entsprechender Weise durch Anordnung von zwei um $1/2$ Polteilung gegeneinander verschobenen Wicklungszweigen erzeugt. Die Schaltungs- und Wicklungsmöglichkeiten entsprechen genau denen der Generatoren (457) bis (462).

(505) Die Grenze der Spannung, bis zu der die Motoren rationell gebaut werden können, liegt bei kleinen Leistungen bis etwa 10 kW bei 500 V, bei mittleren

Leistungen bis etwa 30 kW bei 3 kV und bei großen Leistungen bei 7 bis 10 kV. Sie ergibt sich aus dem Anwachsen einmal des für Isolation erforderlichen Raumes — in der Hinsicht sind Motoren mit geringer Nutenzahl für hohe Spannungen besser geeignet als andere — und aus der größten Zahl dünner Drähte, die man noch durch eine Nut fädeln oder träufeln kann (361), wenn man nicht die Nuten nachträglich schließt, vgl. (365). Bei Motoren für sehr hohe Spannung ist man in der Regel gezwungen, um mit dem Wickelraum auszukommen und dabei vernünftige Abmessungen des Motors einzuhalten, im Wirkungsgrad und Leistungsfaktor etwas schlechtere Werte zuzulassen als bei normalen Spannungen.

(506) Schaltung und Klemmen. Beide Teile können bei Drehstrom nach Belieben Dreieck- oder Sternschaltung erhalten. Die Enden der Wicklung werden zu drei Klemmen geführt, wenn ein für allemal Dreieckschaltung oder Sternschaltung ohne Herausführung des Nullpunktes vorgesehen ist. Bei Herausführung des Nullpunktes ergeben sich vier Klemmen. Soll die Wahl zwischen Dreieck- oder Sternschaltung offen bleiben, wie es bei Motoren für zweierlei Spannung (z. B. 110 und $\sqrt{3} \times 110 \approx 190$ V) vorkommt, so sind sechs Klemmen erforderlich. Bei solchen Motoren wird oft falsch angeschlossen, so daß die Stromrichtung in einem Wicklungszweig die verkehrte ist; in dem Falle laufen die Motoren auch, nehmen aber sehr starke Ströme auf, entwickeln nur ein geringes Drehmoment und brummen in der Regel stark. Man hat daher durch Vertauschen der Anschlüsse an dem betreffenden Zweig die richtige Stromrichtung herzustellen.

Drehstrommotoren sind ohne weiteres durch Vertauschen zweier Zuleitungen umsteuerbar, weil dadurch der Drehsinn des Drehfeldes umgekehrt wird. Zweiphasenmotoren werden durch Vertauschung der Zuleitungen zu einem Wicklungszweig umgesteuert.

Die Anschlußklemmen aller Motoren sollten im normalen Betrieb der Berührung nicht zugänglich sein.

(507) Der Läufer bildet in der Regel den Sekundäranker. Auch die Läufer werden vielfach mit drei Wicklungszweigen ausgeführt (sogenannte Phasenanker); zum Anschluß von Anlaßwiderständen (536) werden drei Punkte der Wicklungen mit Schleifringen verbunden, die entweder zwischen die Motorlager eingebaut oder fliegend angeordnet und dann unter Benutzung einer Bohrung durch die Welle angeschlossen werden (Abb. 266). Es empfiehlt sich, alle Motoren für Dauerbetrieb ohne Umsteuerung mit Bürstenabhebevorrichtung und umlaufender Kurzschlußvorrichtung für die Schleifringe auszuführen (537).

(508) Kurzschlußläufer. Wo ein Anlaßwiderstand entbehrt werden kann, kommen sogenannte Kurzschlußläufer zur Verwendung. Diese werden nach *Dobrowolsky* als sogenannte Käfiganker (Abb. 250) ausgeführt; ihre Wicklung besteht dann aus Stäben (in der Regel ein Stab je Nut), die an den Stirnseiten des Läufers sämtlich durch je einen Kurzschlußring unmittelbar miteinander verbunden sind. Diese Form stellt die einfachste Wicklung dar und verdient wegen ihrer mechanischen Vorzüge und des geringen Preises die größte Beachtung; ihre Anwendung ist aber beschränkt, weil das Anlassen größerer Motoren mit Kurzschlußläufer Schwierigkeiten macht und Störungen verursacht (531). Die Käfigwicklung ist eine hinsichtlich der Polzahl indifferente Wicklung. Derselbe Läufer paßt daher zu beliebigen Polzahlen, eine Eigenschaft, die für die Polumschaltung (530)

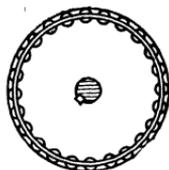


Abb. 250. Käfigwicklung.

wichtig ist. Es empfiehlt sich, die Eisenkörper der Sekundärteile nicht massiv auszuführen, sondern aus Blechen aufzubauen, weil die Ströme dann nur in den durch die Kupferleiter vorgeschriebenen Bahnen nahe der Peripherie des Läufers auftreten können, wo sie das größte Drehmoment entwickeln.

(509) Die **Windungszahl** auf dem Sekundäranker kann beliebig gewählt werden. Stabwicklung mit einem oder zwei Stäben in der Nut ermöglicht die beste Ausnutzung des Wickelraumes und ergibt eine sehr solide und sauber aussehende Wicklung, Abb. 225 und 226. Dabei ist zugleich gute Abkühlung zu erreichen; die Wickelköpfe können aber nach Art einer Sirene ein pfeifendes Geräusch hervorbringen. Als ein Nachteil der Stabwicklung ist es anzusehen, daß die Ströme wegen der geringen Windungszahl verhältnismäßig stark ausfallen und daher größere Abmessungen der Schleifringe, Bürsten oder anderer Kontakte und der Verbindungsleitungen zum Anlasser verlangen.

Bei großen Motoren treten bei Stillstand und geringer Drehzahl — auch bei einfacher Stabwicklung — an der Läuferwicklung hohe Spannungen auf, die sowohl hinsichtlich der Isolierfestigkeit als auch mit Rücksicht auf Gefährdung von Personen zu berücksichtigen sind. Die an der offenen Läuferwicklung bei Stillstand auftretende Spannung heißt „Anlaßspannung“.

(510) **Das Drehfeld bei Mehrphasenstrom**¹⁾. Legt man durch die Achse eines mit Drehstromwicklung versehenen Läufers in beliebiger Richtung eine Ebene, so wird diese auf jeder Seite des Motors eine Anzahl Spulen schneiden. Zählt man die Durchflutungen aller auf einer Seite des Motors geschnittenen Spulen zusammen, so findet man bei guten Wicklungen, daß, wenn man die Schnittebene in beliebiger Richtung um eine Polteilung dreht, in der neuen Stellung genau dieselbe Durchflutung, jedoch mit entgegengesetztem Vorzeichen vorhanden ist. An der einen Stelle treten Induktionslinien aus dem äußeren in den inneren Teil ein, an der anderen Stelle ebensoviel Induktionslinien aus dem inneren in den äußeren aus. Wir können uns dann vorstellen, daß die Durchflutung der an einer Stelle geschnittenen Spulen genau für die eine Wegehälfte derjenigen Induktionslinien aufgebraucht wird, die an der Schnittstelle durch die Luft gehen. Sieht man von dem Verbrauch an MMK für den Eisenweg ab, so kommt für die Luft an jedem Zahn die Durchflutung zur Geltung, die bei einem durch diesen Zahn und die Wicklung an dieser Stelle geführten Schnitt in den geschnittenen Spulen vorhanden ist, Abb. 251. Unter dieser Voraussetzung kann man leicht die auf jeden Zahn entfallende Durchflutung bestimmen.

Ein Beispiel bei vierfachen Nuten ($i = 4$) nach Abb. 251 möge dies deutlich machen. Die Durchflutung der geschnittenen Spulen beträgt:

Zahn Nr.	Durchflutung	Zahn Nr.	Durchflutung
1	$4a$	8	$a + 4b$
2	$4a + b$	9	$4b$
3	$4a + 2b$	10	$4b + c$
4	$4a + 3b$	11	$4b + 2c$
5	$4a + 4b$	12	$4b + 3c$
6	$3a + 4b$	13	$4b + 4c$
7	$2a + 4b$	14	$3b + 4c$

Dabei bezeichnen a, b, c die auf eine Nut entfallende Durchflutung der drei Stromkreise des Drehstroms. Die Polteilung enthält in diesem Falle 12 Nuten. Man erhält z. B. als Durchflutung für Zahn 2: $(4a + b)$, für Zahn 14: $(3b + 4c)$ oder, da $(a + b + c) = 0$, $-(4a + b)$ AW.

¹⁾ Literatur: G ö r g e s, D. Berechnung d. EMK von Mehrphasen- u. Einphasenwicklungen. ETZ 1907, S. 1. — K u m m e r, Vergl. Berechnung des Magnetisierungsstromes von Mehrphasen- u. Einphasen-Wicklungen auf Grund d. Feldstärke-Diagramms von G ö r g e s u. d. Drehfeld-Zerlegung in Harmonische. ETZ 1907, S. 645. — R. E. H e l l m u n d, D. Differentialfelder im Drehfelde. ETZ 1909, S. 841 u. Graph. Behandlung d. Streuung in Induktionsmotoren. ETZ 1909, S. 25. — K l o s s, D. Berechnung d. Magnetisierungsstromes von Drehstrommotoren. El. u. Maschb. Wien 1910, S. 857. — R a s c h, Über die Anwendung d. G ö r g e s schen Diagramms auf Teillochwicklungen ETZ 1912, S. 7. — E m d e, El. u. Maschb. 1922, S. 557.

Die einzelnen Durchflutungen lassen sich leicht graphisch darstellen, wenn man annimmt, daß sich die einzelnen Stromstärken sinusartig ändern. Es mögen OA , OB , OC , Abb. 252, die drei Stromstärken und zugleich die Durchflutungen $4a$, $4b$, $4c$ (allgemein ia , ib , ic) darstellen. Zeichnet man nun das regelmäßige Sechseck $AFBDC E$, teilt die Seiten in je vier (allgemein je i) gleiche Teile und zieht von O aus die Radienvektoren nach den Teilpunkten, so stellen diese Vektoren der Größe und Phase nach die auf jeden Zahn entfallenden Durchflutungen dar, so z. B. der Vektor OA die für Zahn 1, OB die für Zahn 2, OC die für Zahn 3.

Der Scheitelwert von a , b , c ist $\frac{1}{i} \cdot \frac{wI}{3} \cdot \sqrt{2}$, wenn w die Windungszahl eines Polpaares und i die Zahl der Zähne für Pol und Zweig ist. Die Vektoren OA , OB , OC haben daher, wenn sie Durchflutungen bedeuten, den Zahlenwert

$$\frac{wI}{3} \cdot \sqrt{2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot wI$$

Man kann hieraus die Verteilung des Magnetfeldes in jedem Augenblicke feststellen. Man halte die Zeitlinie in einer beliebigen Lage fest und projiziere alle Vektoren auf die Zeitlinie, so sind die Projektionen den augenblicklichen Werten des magnetischen Feldes von Zahn zu Zahn proportional. Geht die Zeitlinie durch eine der Ecken des Sechsecks, so erhält man für die Darstellung der Verteilung über einer Abszissenachse, die den Umfang des Motors darstellt, die spitze Treppen-

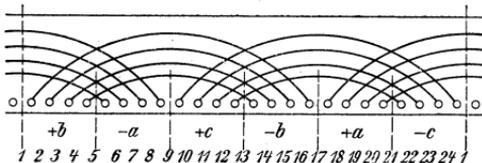


Abb. 251. Drehstromwicklung mit vierfachen Nuten.

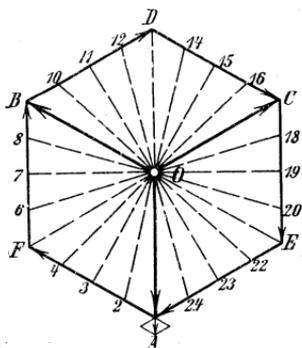


Abb. 252. Vektordiagramm der Feldverteilung einer Drehstromwicklung.

form (Abb. 253a); steht die Zeitlinie senkrecht auf einer der Seiten, so erhält man die flache Treppenform (Abb. 253c). Dazwischen kann man leicht die Übergänge konstruieren. Man erkennt dann, daß das magnetische Feld während einer Periode um die doppelte Polteilung (2τ) fortschreitet.

Die Amplitude der augenblicklichen Durchflutung schwankt zwischen zwei Werten hin und her; der größere Wert $\sqrt{2} \cdot wI/3 = 0,471 wI$ wird immer dann erreicht, wenn die Zeitlinie mit einem der Stromvektoren in gleiche Richtung fällt und einen Grenzzahn zwischen zwei Wicklungsabteilungen trifft, die kleinere $\sqrt{2} \cdot wI \cos 30^\circ/3 = 0,408 wI$, wenn die Zeitlinie den mitten zwischen zwei Grenzzähnen liegenden Zahn trifft, falls ein solcher vorhanden ist. Die Amplitude der Schwankung ist von der Zahl der Zähne für Pol und Stromzweig unabhängig; sie ist bei Drehstrommotoren kleiner ($2:\sqrt{3}$) als bei Zweiphasenmotoren ($2:\sqrt{2}$), weil bei letzteren im Diagramm statt des Sechsecks ein Quadrat erscheint.

Allgemein hat (E m d e, El. u. Maschb. 1922, S. 557) der Unterschied der geschnittenen $0,4 \pi$ fachen Querdurchflutung und der in der Schnittebene vorhandenen magnetischen Spannung zwischen Ständer und Läuferisen (bei Vernachlässigung der Spannungsverluste im Eisen) an allen Punkten des Ankerumfangs

denselben Wert. In unserem Beispiel war dieser Unterschied gleich Null; ist er vorhanden, so muß man damit rechnen, daß ein Teil des Induktionsflusses unerwünschte Wege, z. B. durch die Welle und das Gehäuse einschlägt.

(511) Die magnetische Induktion. Ist die Sättigung im Eisen gering, so ist der größte Wert der magnetischen Induktion bei Drehstrom in der Luft unter den Grenzzähnen:

$$\mathfrak{B} = \frac{0,4\pi\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{wI}{\delta} = 0,5924 \cdot \frac{wI}{\delta}$$

wenn δ die Länge der einfachen Luftstrecke zwischen Ständer und Läufer in cm ist. Hieraus folgt umgekehrt für die erforderliche Durchflutung

$$wI = \frac{3}{0,4\pi\sqrt{2}} \cdot \delta \mathfrak{B} = 1,69 \cdot \delta \mathfrak{B}$$

Zu wI kommt noch der für den Verlauf der Induktionslinien in den Eisenkörpern aufzuwendende Betrag hinzu, der geometrisch zu addieren ist. Die Summe ergibt die gesamte Durchflutung.

Der aus einem Pol austretende Gesamtinduktionsfluß variiert zeitlich nur sehr wenig. Man kann, wenn man einfache Nuten, die bei Motoren nicht angewendet werden dürfen, ausschließt, mit genügender Genauigkeit setzen

bei Drehstrom:

$$\Phi = 1,74 \cdot i \cdot \Phi_z$$

bei Zweiphasenstrom:

$$\Phi = i \cdot \Phi_z$$

Φ_z ist der maximale Induktionsfluß in einem Grenzzahn.

Hieraus ergibt sich der Induktionsfluß im Kranz zu $\frac{1}{2} \Phi$.

Bei starker Sättigung der Zähne sind die magnet. Induktionen den Feldstärken nicht genau proportional, die Unterschiede zwischen der magnet. Induktion unter den Grenzzähnen und der unter den mittleren Zähnen werden also geringer.

Von Einfluß sind natürlich auch die Nutenformen und das Verhältnis der Zahl der Nuten auf dem Primäranker zu der auf dem Sekundäranker, weil die obige Ableitung gleichförmigen magnetischen Widerstand über den ganzen Ankerumfang voraussetzt und diese Gleichförmigkeit durch die Nutzung beeinträchtigt wird.

(512) Die EMK. Um die in einer Drehstrom-Sechspannungwicklung durch das Drehfeld induzierte EMK zu berechnen, muß man eine Annahme über die Verteilung der magnetischen Induktion machen. Wir nehmen an, daß auch die Dichte \mathfrak{B}

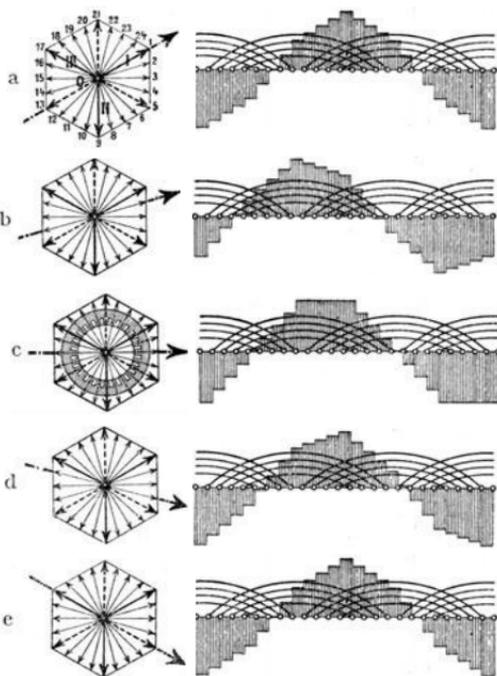


Abb. 253 a bis e. Fortschreiten des Drehfeldes und Übergang von spitzer in flache Form und umgekehrt während $T/6$.

der aus den einzelnen Zähnen austretenden Induktionslinien durch das Vektordiagramm (Abb. 252) dargestellt werde, obwohl infolge der Sättigung, wie eben bemerkt, eine geringe Abweichung eintreten wird. Es sei Φ_z das Maximum des Induktionsflusses, der aus einem der Grenzzähne austritt, und \mathfrak{B} die zugehörige Induktion in der Luft, E die EMK für Polpaar und Zweig. Dann ist bei i -fachen Nuten, wenn F die wirksame Oberfläche eines Polpaares ist,

$$\text{für Drehstrom: } \Phi_z = \frac{F}{6i} \mathfrak{B},$$

$$E = \frac{\sqrt{2}\pi}{3} \cdot C_3 \cdot f w i \Phi_z \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$= 0,247 C_3 \cdot f w F \mathfrak{B} \cdot 10^{-8} \text{ Volt},$$

für Zweiphasenstrom:

$$\Phi_z = \frac{F}{4i} \mathfrak{B},$$

$$E = \frac{\pi}{2} \cdot C_2 \cdot f w i \Phi_z \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

$$= 0,393 C_2 \cdot f w F \mathfrak{B} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}.$$

i	C_3	C_2
1	2,000	2,000
2	1,750	1,500
3	1,705	1,409
4	1,688	1,375
5	1,681	1,360
6	1,677	1,352
7	1,672	1,347
⋮	⋮	⋮
∞	1,667	1,333

Die EMKe werden durch Streuung etwas vergrößert.

C_3 und C_2 lassen sich in geschlossener Form darstellen (ETZ 1907, S. 1), sind aber am besten aus obenstehender Tabelle zu entnehmen.

Ist ein bestimmtes E vorgeschrieben, so kann man nach diesen Formeln Φ_z und daraus \mathfrak{B} berechnen.

Bei Dreieckschaltung ist E mit der Anzahl der hintereinander geschalteten Polpaare zu multiplizieren, um die gesamte EMK zu erhalten; bei Sternschaltung ist außerdem noch mit $\sqrt{3}$ zu multiplizieren.

(513) Streuung zwischen den Zähnen. Die magnetische Streuung zwischen zwei benachbarten Zähnen ist der magnetischen Potentialdifferenz zwischen ihnen proportional, und deren Scheitelwert wird im Diagramm, Abb. 252, durch die Abschnitte auf den Seiten des Sechsecks (oder Quadrats bei Zweiphasenstrom) dargestellt. Solange nun die magnetische Sättigung das Diagramm nicht verzerrt, ist der Maximalwert der Streuung von Zahn zu Zahn konstant, auch hat eine Anzahl von Streuflüssen immer dieselbe Phase, und nur an den 6 Grenzstellen tritt innerhalb eines Polpaares ein Sprung in der Phase um je 60° auf. Die Zähne, in die der Phase und Größe nach ein ebensolcher Streufluß aus- wie eintritt, werden durch die Streuung nicht stärker belastet. Es werden also nur die Grenzzähne, die sich zwischen zwei Wicklungsabteilungen befinden, z. B. 1, 5, 9 . . . in Abb. 251 infolge von Streuung magnetisch stärker belastet. Ist der Streufluß von Zahn zu Zahn Φ_s , ein Wert, der sich berechnen läßt, sobald der Widerstand des Streuflusses zwischen zwei benachbarten Zähnen bekannt ist, so sind die Grenzzähne durch Streuung um die geometrische Summe zweier Streuflüsse Φ_s , die 120° Phasenverschiebung gegeneinander haben, also um Φ_s stärker belastet, als sie es ohne Streuung wären, Abb. 252.

(514) Berechnung der Streuung. Die magnetische Potentialdifferenz zwischen zwei Zähnen ist bei Drehstrom $0,4\pi \cdot w/(3i) \cdot \sqrt{2} I = 0,59 \cdot w I/i$. Ist \mathfrak{R}_s der magnetische Widerstand des Streuflusses zwischen zwei einander benachbarten Zähnen, so ist der Streufluß selbst

$$\Phi_s = \frac{0,4\pi \sqrt{2}}{3} \cdot \frac{w I}{i \mathfrak{R}_s} = 0,59 \cdot \frac{w I}{i \mathfrak{R}_s}.$$

Dieser Streufluß umschlingt alle Windungen eines Zweiges zweimal, daher ist für einen Zweig und ein Polpaar die EMK der Streuung

$$E_s = 2 \cdot \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega}{3} \Phi_s \cdot 10^{-8} = 1,76 \cdot \frac{f \omega^2 I}{i \mathfrak{R}_s} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

Aus (512) ergibt sich ferner für Drehstromwicklung das Verhältnis

$$\tau = \frac{E_s}{E} = \frac{12 \delta}{C_3 i F \mathfrak{R}_s}$$

worin τ der Heylandsche Streuungskoeffizient ist (329).

Die letzte Gleichung läßt den Einfluß der Nutenzahl erkennen. Unter der Annahme, daß \mathfrak{R}_s konstant gehalten wird, gilt für τ folgende Tabelle:

i	1	2	3	4	5	6	7
τ in %	100	57,2	39,1	29,7	23,8	19,9	17,1

d. h. die Streuung nimmt mit wachsender Nutenzahl stark ab.

Wegen Berechnung von \mathfrak{R}_s vgl. (391).

(515) Wirkungsweise der Mehrphasenmotoren. Drehzahl und Winkelgeschwindigkeit des magnetischen Feldes seien n_0 und ω_0 , die des Läufers n und ω . Ihre Differenz heißt die Schlüpfung, auch der Schlupf. Bei p Polpaaren ist

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2\pi f}{p} \quad \omega = \frac{2\pi n}{60} \quad \omega_s = \omega_0 - \omega \quad (1)$$

Häufig wird die Schlüpfung in Bruchteilen von ω_0 angegeben, also

$$\sigma = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_s}{\omega_0} \quad (2)$$

woraus

$$n = n_0(1 - \sigma) = \frac{60f}{p}(1 - \sigma) \quad (3)$$

folgt. σ ist die relative Schlüpfung zwischen dem umlaufenden Feld und dem Läufer. Die im Sekundäranker induzierte EMK ist der Schlüpfung und dem sekundären Induktionsfluß Φ_2 proportional:

$$E_2 = c \cdot \Phi_2(\omega_0 - \omega) = c \Phi_2 \omega_s \quad (4)$$

Wenn der Anker kurz geschlossen ist, so ist die Stromstärke

$$I_2 = \frac{c}{R_2} \Phi_2(\omega_0 - \omega) = \frac{c}{R_2} \Phi_2 \omega_s \quad (5)$$

wobei alle Größen auf einen Wicklungsweig zu beziehen sind. Ihr entspricht die Stromwärmeleistung

$$N_{w_2} = E_2 I_2 = R_2 I_2^2 = \frac{c^2}{R_2} \Phi_2^2 (\omega_0 - \omega)^2 = \frac{c^2}{R_2} \Phi_2^2 \omega_s^2 \quad (6)$$

Sie wird durch die mechanische Leistung $M \omega_s$ erzeugt, worin M das Drehmoment ist. Es ist also

$$M \omega_s = \frac{c^2}{R_2} \Phi_2^2 \omega_s^2$$

woraus

$$M = \frac{c^2}{R_2} \Phi_2^2 \omega_s = c \Phi_2 I_2 \quad (7)$$

folgt. Das Drehmoment ist also der Schlüpfung und dem Quadrat des Induktionsflusses im Sekundäranker proportional.

Das Produkt $M\omega$ stellt die tatsächlich vom Läufer abgegebene mechanische Leistung N_{mech} dar, von der noch die Reibungsverluste abzuziehen sind, um die Nutzleistung zu erhalten; das Produkt $M\omega_s$ die zur Stromwärme verbrauchte Leistung N_{w_2} . Es ist also

$$N_{mech} = M\omega = \frac{c^2}{R_2} \Phi_2^2 (\omega_0 - \omega) \omega = \frac{c^2}{R_2} \Phi_2^2 \omega \omega_s \quad (8)$$

und es verhält sich

$$\frac{N_{w_2}}{N_{mech}} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega} = \frac{\omega_s}{\omega} \quad (9)$$

und, wenn N_2 die gesamte dem Anker zugeführte Leistung ist,

$$\frac{N_{w_2}}{N_2} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_s}{\omega_0} = \sigma \quad \text{und} \quad \frac{N_{mech}}{N_2} = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (10)$$

Die relative Schlüpfung σ ist daher gleich dem relativen Leistungsverlust durch Stromwärme im Sekundäranker. Dies Resultat gilt genau nur bei einem vollkommenen Drehfeld; ist es unvollkommen, so ist der Verlust größer, als sich aus der Schlüpfung ergibt. Beim Einphasenmotor ist der Verlust bei normalem Betrieb nahezu doppelt so groß (559).

Gl. (7) zeigt, daß zur Erzielung desselben Drehmomentes bei konstantem Φ_2 (konstanter Primärspannung) die Schlüpfung proportional dem Ankerwiderstand sein muß. Vergrößerung des Ankerwiderstandes vergrößert also die Schlüpfung bis zum Stillstand des Motors ohne Beeinträchtigung des Drehmomentes. Daraus ergibt sich das Anlassen und die Geschwindigkeitsregelung durch Einschaltung von Widerständen in den Sekundärkreis.

(516) Heylandsches Kreisdiagramm¹⁾. Nach (2) und (7) kommt der Motor ohne wesentliche Änderung der magnetischen und elektrischen Vorgänge zur Ruhe, wenn der Widerstand im Sekundärkreise von R_2 auf $\frac{R_2}{\sigma}$ vergrößert wird. Er verhält sich dann wie ein Transformator mit großer Streuung (334). Es seien der primäre Induktionsfluß $\Phi_1 = OA$, Abb. 254, und also auch die primäre EMK E_1 konstant. Die primäre Klemmenspannung U_1 wird sich dann etwas, jedoch nur wenig ändern. Setzt man $\varphi_2 = 0$ und vernachlässigt man H_2 , d. h. die Eisenverluste im Läufer, so geht Abb. 150 in Abb. 254 über, und $\sphericalangle OQI$ wird ein Rechter. Der Schnittpunkt der Verlängerung von QI mit Φ_1 sei B . Zieht man IC parallel QO , AF parallel IO und FD parallel OQ , so läßt sich nachweisen, daß D , B und C feste Punkte auf AO sind. Daher müssen Q , I und F auf Kreisen über BO , BC und BD als Durchmessern liegen. Wählt man M so, daß $\triangle MAI$ ähnlich $\triangle M'A'O$, so ist MI parallel und proportional zu $M'O$ und FI parallel und proportional zu $F'O$; MI stellt daher I_1 und FI bei gleichen Windungszahlen im Sekundär- und Primärkreise I_2 in demselben Maße dar. Auch QI und BI sind I_2 proportional. Gewöhnlich werden nur die Kreise über BC und BD gezeichnet und E_1 und U_1 von M aus eingetragen, Abb. 255. $E_1 U_1$ ist parallel zu MI und gleich $R_1 I_1$; U_1 bewegt sich auf einem Kreise, dessen Lage zu E_1 ähnlich der Lage des Kreises über BC zu M ist. $\sphericalangle U_1 MI$ ist gleich der primären Phasenverschiebung φ_1 . Bei Leerlauf fällt I mit I_λ , bei Stillstand mit I_k zusammen.

(517) Streuungskoeffizienten. Hält man, Abb. 254, die Zeitlinie in der Richtung senkrecht zum Vektor I_2 fest, so rührt der Induktionsfluß nur von

¹⁾ Literatur: Heyland, Eine Methode zur experimentellen Untersuchung an Induktionsmotoren. Voitsche Samml. 1905. — Berkitz-Behrend, Induktionsmotoren. Berlin, Krayn, 1903. — Heubach, D. Drehstrommotor. Berlin, Springer, 2. Aufl. 1923. — Emde, D. Arbeitsweise d. Wechselstrommaschinen. Berlin, Springer, 1902. — Ossanna, Theorie der Drehstrommotoren. Z. f. El. 1899, S. 223. — Sumec, Kreisdiagramm des Drehstrommotors bei Berücksichtigung des primären Spannungsabfalls (Ossanna). Z. f. El. 1901, S. 177. — Außerdem Lehrbücher.

I_1 her, hält man sie in der Richtung senkrecht zum Vektor I_1 fest, so rührt der Induktionsfluß nur von I_2 her. Man erhält daraus einerseits Φ_1' und Φ_2' , andererseits Φ_2'' und Φ_1'' , vgl. (329). Es war aber

$$\nu_1 = \frac{\Phi_1'}{\Phi_2'} \quad \text{und} \quad \nu_2 = \frac{\Phi_2''}{\Phi_1''}$$

Man erhält daraus, wenn man noch die primären Eisenverluste gleich Null setzt also die primäre Stromstärke durch AI , nicht durch MI darstellt,

$$\nu_1 = \frac{\varrho + \varrho_1}{\varrho_1} = \frac{DC}{BC} \quad \tau_1 = \frac{\varrho}{\varrho_1} = \frac{DB}{CB}$$

$$\nu_2 = \frac{\varrho + \varrho_2}{\varrho_2} = \frac{AC}{DC} \quad \tau_2 = \frac{\varrho}{\varrho_2} = \frac{AD}{DC}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{\nu_1 \nu_2} = \frac{AB}{AC}$$

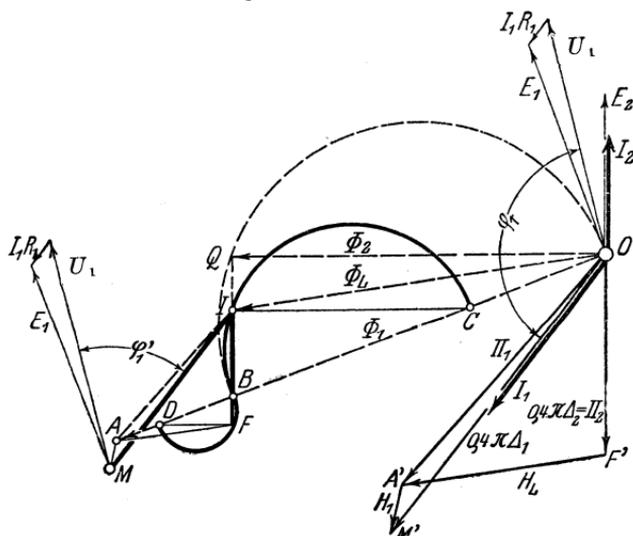


Abb. 254. Geometrische Örter des allgemeinen Transformators.

(518) **Primärer Leistungsfaktor.** Angenähert läßt man wohl M mit A zusammenfallen, d. h. man vernachlässigt die primären Magnetisierungsverluste. Dann wird I_1 durch AI dargestellt. Vernachlässigt man auch $I_1 R_1$, so fällt U_1 mit E_1 zusammen. In diesem Falle wird der Maximalwert von $\cos \varphi_1$ gleich $(1 - \varepsilon)/(1 + \varepsilon)$, ein Wert, der demnach nur angenähert gilt.

(519) **Schlüpfung.** Nach (515) Gl. (5) kann man $I_2 R_2$ proportional mit $\Phi_2 \cdot \sigma$ setzen. Andererseits ist Φ_2 mit CI proportional, daher $I_2 R_2$ proportional mit $\sigma \cdot CI = SI$. Diese Strecke tragen wir von I aus auf IC ab, Abb. 255. Da BI und, wie eben bemerkt, SI proportional mit I_2 sind, so ist $SI/BI = \text{konst.}$, also $\sphericalangle SBI$ konstant und, da $\sphericalangle BIS = 90^\circ$, auch $\sphericalangle BSI$ konstant. Demnach liegt S auf einem Kreise, der durch B und C geht und seinen Mittelpunkt in K hat. Bei Stillstand rückt I nach I_k . Dabei wird $\sigma = 1$, also $SI/CI = 1$, d. h. S fällt mit C zusammen. Die Strecke CI_k ist daher Tangente an dem Schlüpfungskreise in C , und K liegt daher auf der in C zu CI_k gezogenen Senkrechten. Die Schlüpfung ist $\sigma = SI/CI$.

(520) **Drehmoment.** Nach (515) Gl. (7) kann man das Drehmoment proportional mit $QB \cdot QO$, Abb. 254, oder $BI \cdot CI$, Abb. 254 und Abb. 255, setzen. Da die Grundlinie BC des Dreiecks BCI konstant, so mißt die Höhe IG das Drehmoment. Zieht man hiervon einen konstant angenommenen Betrag GG_1 für Überwindung der Reibung ab ($MI_1 =$ Leerlaufstromstärke, G_1 auf der Parallelen durch I_1 zu AC), so ist IG_1 das nützliche Drehmoment. Das größte Drehmoment wird erreicht, wenn I auf der Mittelsenkrechten von BC liegt; bei noch größerer Schlüpfung wird M wieder kleiner, während I_1 und I_2 weiter wachsen. Das „Kippmoment“ ist

$$(7) \quad M_{max} = \frac{I_1 \cdot E_1}{9,81 \cdot w_o} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{2\varepsilon} \text{ kg*m}$$

(521) **Drehmomente der Hysterese und der Wirbelströme.** Die Verluste durch Hysterese V_h und durch Wirbelströme V_w im Läuferisen sind

$$V_h = c \cdot \eta \cdot \mathfrak{B}_{max}^{1,6} f_2 = c_1 \cdot \sigma \quad V_w = C \cdot \beta \cdot \mathfrak{B}_{max}^2 f_2^2 = C_1 \sigma^2 \quad (1)$$

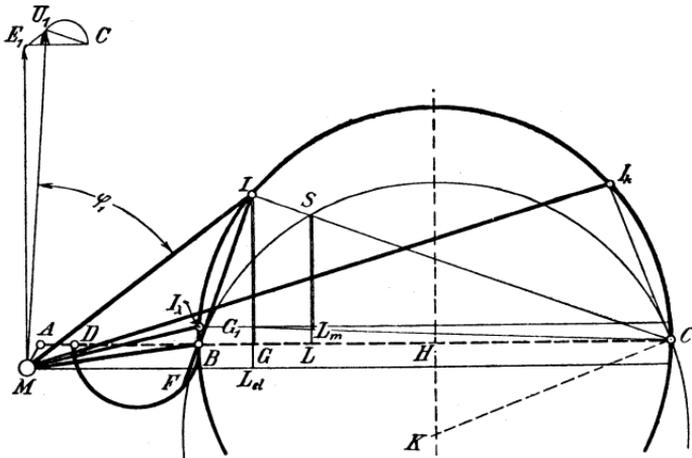


Abb. 255. Modifiziertes Heylandsches Diagramm.

wenn f_2 die der Schlüpfung σ proportionale Frequenz des Läuferfeldes ist. Erteilt man dem ganzen Motor eine Drehung gleich und entgegengesetzt der Rotation des magnetischen Feldes, so kommt dieses zum Stillstand, und das Läuferisen dreht sich mit einer der Schlüpfung σ proportionalen Geschwindigkeit. Die dazu aufzuwendenden mechanischen Leistungen sind

$$N_h = c_2 \cdot M_h \sigma \quad N_w = C_2 \cdot M_w \sigma \quad (2)$$

Der Vergleich von 1) und 2) zeigt, daß

$$M_h = c_1 / c_2 = \text{const} \quad M_w = (C_1 / C_2) \sigma = \text{const} \cdot \sigma$$

ist. Das Drehmoment der Hysterese ist daher von der Schlüpfung σ der Größe nach unabhängig, es wechselt jedoch mit σ sein Vorzeichen und springt daher beim Durchschreiten des Synchronismus von einem konstanten positiven zu einem ebenso großen konstanten negativen Werte. Dagegen ist das Drehmoment der Wirbelströme genau wie das der Ströme in der Läuferwicklung proportional mit der Schlüpfung (vgl. L e h m a n n, ETZ 1910, S. 1249, hier auch weitere Literaturangaben). Dies gilt nur bei glatten Zylindern, bei genuteten Eisenkernen treten starke Abweichungen von den einfachen Gesetzen ein.

(522) **Leistung.** Die gesamte mechanische Leistung N_{ges} würde proportional mit IG sein, wenn keine Schlüpfung vorhanden wäre. Die Schlüpfung verkleinert die Gesamtleistung im Verhältnis $CS : CI$, die Reibungsleistung im Verhältnis $GG_1 : LL_m$ (L_m auf G_1C), so daß

$$(8) \quad N_{ges} = c \cdot SL \text{ und } N_m = c \cdot SL_m$$

worin N_m die Nutzleistung. Zieht man noch durch M eine Parallele zu AC , so stellt das Lot IL_{el} die elektrische Leistung abzüglich der vernachlässigten Eisenverluste im Sekundäranker und der primären Stromwärme dar, weil IL_{el} gleich der Wirkkomponente von I_1 . Demnach ist der Wirkungsgrad $[\mu_N \text{ siehe (523)}]$

$$(9) \quad \eta = \frac{\mu_N \cdot SL_m}{\mu_N \cdot IL_{el} + I_1^2 R_1}$$

wenn man alles auf einen Wicklungszweig bezieht.

Die Lage von M ist tatsächlich nicht völlig fest, sondern M rückt wegen der zusätzlichen Verluste mit zunehmender Belastung mehr und mehr nach unten, so daß der Abstand der durch M gezogenen Parallelen zu AC von dieser Geraden wächst.

(523) **Maßstäbe für das Diagramm.** Man bezieht am besten alle Größen auf einen Wicklungszweig. Sind durch die Gleichungen

$$(10) \quad E_1 = \mu_{e1} \cdot ME_1 \text{ und } I_1 = \mu_{i1} \cdot MI,$$

die Maßstäbe für E_1 und I_1 nach Belieben festgelegt, etwa in V/mm und A/mm, so folgt für den Maßstab μ_{i2} für I_2 aus

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_2}{\Delta_1} &= \frac{w_2 I_2}{w_1 I_1} = \frac{FI}{MI} \\ I_2 &= \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{FI}{MI} \cdot I_1 = \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{FI}{MI} \cdot \mu_{i1} MI = \frac{w_1}{w_2} \mu_{i1} \cdot FI = \mu_{i2} \cdot FI \\ (11) \quad \mu_{i2} &= \frac{w_1}{w_2} \mu_{i1} \cdot A/\text{mm} \end{aligned}$$

Ferner ergibt sich der Leistungsmaßstab μ_N aus

$$N_{e1} = \mu_N \cdot IL_{el} = E_1 I_1 \cos (E_1 I_1) = E_1 \cdot \mu_{i1} \cdot MI \cos (E_1 I_1) = E_1 \cdot \mu_{i1} \cdot IL_{el}$$

zu

$$(12) \quad \mu_N = E_1 \cdot \mu_{i1} \text{ W/mm} = \frac{E_1 \mu_{i1}}{736} \text{ P/mm}$$

Der Maßstab μ_M für das Drehmoment folgt aus den Formeln

$$N_m = \mu_N \cdot SL_m = 9,81 \cdot M\omega = 9,81 \cdot \mu_M \cdot IG_1 \cdot \omega$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{SL_m}{IG_1}$$

Daher

$$(13) \quad \mu_M = \frac{\mu_N}{9,81 \cdot \omega_0} \cdot \text{kg} \cdot \text{m/mm}$$

(524) **Reduktion auf konstante Spannung.** Da das Kreisdiagramm für konstante EMK abgeleitet ist, gewöhnlich aber die Spannung am Motor konstant gehalten wird, sind die aus dem Diagramm abgegriffenen Größen auf konstante Spannung zurückzuführen¹⁾. Winkel und Schlüpfung bleiben dabei ungeändert, Spannungen,

¹⁾ O s s a n n a hat ein Diagramm für konstante Spannung auf rechnerischer Grundlage angegeben, vgl. Z. f. El. 1899, S. 223 und 1901, S. 177.

Stromstärken, Induktionsflüsse ändern sich im einfachen, Drehmomente und Leistungen im quadratischen Verhältnis mit E_1 . Zwischen E_1 und U_1 bestehen die Näherungsformeln

$$E_1 = U_1 - \frac{R_1}{U_1} \cdot N_1 \quad \text{und} \quad U_1 = E_1 + \frac{R_1}{E_1} \cdot N_1$$

wenn alle Größen auf einen Zweig bezogen werden, N_1 also den dritten Teil der ganzen elektrischen Leistung bedeutet.

(525) Herstellung des Diagramms durch Rechnung. Man trage ME_1 senkrecht nach oben auf, berechne für die entsprechende Magnetisierung die Komponenten des Teiles MA von I_1 , der zur Magnetisierung des Ständers notwendig ist, und trage die Wirkkomponente parallel zu ME_1 , die Blindkomponente rechtwinklig dazu nach rechts an. Man erhält dadurch A und die Richtung von AC . Die für die Durchmagnetisierung der Luft erforderliche Komponente von I_1 ist gleich AB . Man berechne nun ε (514 u. 329) und $AC = AB/\varepsilon$. Der Kreis über BC kann nun geschlagen werden. Aus der für eine bestimmte Belastung festgesetzten Schlüpfung ist dann Punkt S zu konstruieren und durch BSC der Schlüpfungskreis zu legen. Für die Schlüpfung sind Gl. (6) und (8) in (515) maßgebend.

(526) Herstellung des Diagramms auf Grund von Versuchen. Werden I_1 , U_1 und N_1 bei synchronem Leerlauf (Antrieb durch fremden Motor bei offenem Sekundärkreis), ferner bei normalem Leerlauf, endlich bei Stillstand (Motor bei verringerter Spannung festgebremst, Mittelwerte bei verschiedenen Stellungen nehmen) gemessen, so kann man nach Festlegung des Vektors E_1 die Punkte B , I_k , I_k konstruieren, indem man I_1 auf konstantes E_1 (524) reduziert. Dadurch sind der Kreis über BC , die Strecke ABC rechtwinklig zu ME_1 und die zu ihr parallelen Geraden durch I_k und M festgelegt. Der Mittelpunkt des Schlüpfungskreises ergibt sich als Schnitt der Mittelsenkrechten auf BC mit der Parallelen zu BI_k durch C . Die Lage von I_k und daher von K ergibt sich hieraus indessen nicht mit Sicherheit, weil beim Diagramm die Eisenverluste im Läufer vernachlässigt werden mußten, diese aber bei Stillstand ziemlich bedeutend sind. Man kann nun die Lage von K wie folgt berichtigen. Aus den Diagrammen Abb. 254 und 255 folgt

$$\frac{w_1 E_2}{w_2 E_1} = \frac{OQ \cdot IS}{OA \cdot IC} = \frac{OQ}{OA} \cdot \frac{IS}{IC} = \frac{CI}{CD} \cdot \frac{IS}{IC} = \frac{IS}{CD}$$

also

$$R_2 I_2 = E_2 = \frac{w_2}{w_1} E_1 \cdot \frac{IS}{CD}$$

Daraus

$$R_2 = \frac{w_2}{w_1} \cdot E_1 \cdot \frac{IS}{CD} \cdot \frac{1}{\mu_{i2} \cdot FI} = \frac{w_2}{w_1} \cdot E_1 \cdot \frac{IS}{CD} \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{1}{\mu_{i1} \cdot FI}$$

oder

$$(14) \quad R_2 = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 \cdot \frac{E_1}{CD} \cdot \frac{IS}{\mu_{i1} \cdot FI} = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 \cdot \frac{E_1}{CD} \cdot \frac{I_k C}{\mu_{i1} \cdot F_k I_k} \quad \text{Ohm}$$

(F_k auf dem kleinen Kreis in der Verlängerung von $I_k B$). Da AB eine sehr kleine Strecke ist, kann man D in der Mitte von AB annehmen, CD und $F_k I_k$ aus dem vorläufigen Diagramm entnehmen, aus Gl. (14) $I_k C$ berechnen und danach die Lage von C berichtigen.

(527) Drehzahlen. Die Drehzahl n hängt von der Polpaarzahl p und der Frequenz f ab, denn bei Synchronismus ist $n_0 = 60/fp$.

Die Drehzahlen n_0 ergeben sich daher aus der folgenden Tabelle.

Bei Leerlauf stimmen die Geschwindigkeiten fast genau mit diesen Werten überein, bei Belastung sind sie um die Schlüpfung geringer.

p	n_0 für		p	n_0 für	
	$f=25$ Per/s	$f=50$ Per/s		$f=25$ Per/s	$f=50$ Per/s
1	1500	3000	24	62,5	125
2	750	1500	28	53,5	107
3	500	1000	32	46,9	93,8
4	375	750	36	41,7	83,3
6	250	500	40	37,5	75,0
12	125	250			

Motoren für mehr als 3000 U/min (z. B. für Holzbearbeitungsmaschinen) verlangen eine höhere Frequenz als 50; in der Regel sind niedrigere Drehzahlen erwünscht und daher die kleinsten normalen Motoren bei 50 Per/s vierpolig.

Die Winkelgeschwindigkeit ω_0 des Drehfeldes bleibt ungeändert, wenn die Polzahl $2p$ und die Frequenz f proportional zueinander geändert werden. Betreibt man denselben Motor mit verschiedenen Frequenzen, so läuft er entsprechend schneller oder langsamer.

(528) Änderung der Umlaufzahl. Soll bei konstanter Frequenz die Drehzahl verändert werden, so stehen dazu folgende Mittel zur Verfügung.

1. Vergrößerung der Schlüpfung durch Einschalten von Widerstand in den Sekundäranker. Dies ist mit einfachen

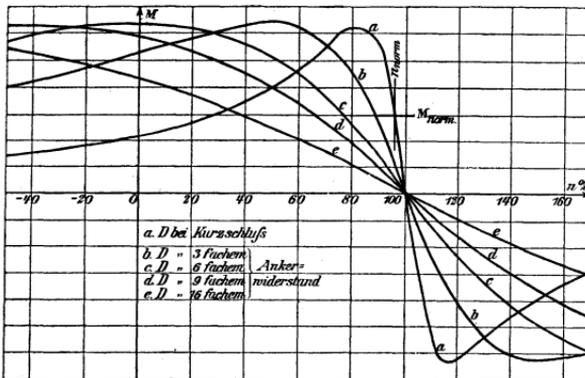


Abb. 256. Drehmomentkurven des Drehstrominduktionsmotors. (D=Drehmoment.)

Mitteln bei jedem Motor mit Phasenanker ausführbar, sobald Schleifringe vorhanden sind, verursacht aber starke Verluste durch Stromwärme im Regulierwiderstand und ergibt eine bestimmte Einstellung nur für eine bestimmte Belastung. Wird der Motor entlastet, so läuft er schneller, und wird er belastet, langsamer. Abb. 256 zeigt die Abhängigkeit des Drehmomentes von der Drehzahl in Prozent der Drehzahl bei Synchronismus bei verschiedenen Widerständen im Sekundäranker.

2. Herstellung einphasiger Wicklung im Sekundäranker. Öffnet man bei Drehstrom einen Stromzweig (z. B. durch Abheben einer Bürste), so fällt der Motor bei stärkerer Belastung aus der normalen auf die halbe Drehzahl, beim Anlaufen erreicht er nur die halbe Drehzahl. Bei Überschreitung der halben Drehzahl läuft er als Generator. Leistungsfaktor und Wirkungsgrad sind unbefriedigend, letzterer jedoch größer als bei 50% Schlüpfung nach der ersten Methode. (Vgl. ETZ 1896, S. 517. — Weidig, Die Wechselstrominduktionsmasch. mit einachsiger Wicklung. Diss. Dresden 1912.)

3. Kaskadenschaltungen (529).

4. Polumschaltung (530).

(529) Kaskadenschaltungen. Man kann die bei dem Verfahren 1 auftretenden Verluste vermeiden, wenn man die aus dem Sekundäranker entnommene Leistung nützlich verwendet. Dies geschieht durch die Kaskadenschaltungen.

a) Kaskadenschaltung zweier Induktionsmotoren¹⁾. Im Sekundäranker des Drehstrommotors fließt Drehstrom, dessen Frequenz f_2 der Schlüpfung σ proportional ist. Man kann mit ihm daher einen zweiten Motor speisen. Gekuppelt laufen zwei gleiche Motoren in Kaskadenschaltung mit der Hälfte der Geschwindigkeit, die sie für sich allein annehmen würden. Verbindet man (Abb. 257) die beiden gleichgewickelten Läufer miteinander, so kann man die Schleifringe sparen, da man den Anlasser dann in die Ständerwicklung des zweiten (Hinter-) Motors einzuschalten hat.

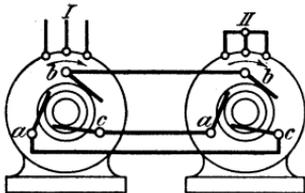


Abb. 257. Kaskadenschaltung.

Danielson erzielt mit der Kombination zweier Motoren mit verschieden viel Polen vier Geschwindigkeiten, indem er die Motoren einzeln oder in Kaskade benutzt Näheres siehe 8. Auflage (544).

Die Umschaltung von Normal- auf Kaskadenschaltung wird bei elektrischen Bahnen angewendet, um verschiedene Geschwindigkeiten zu erzielen. Zu beachten ist, daß die Stromstärke im Läufer des ersten Motors jetzt eine Phasenverschiebung gegen die EMK besitzt; für das Drehmoment kommt aber nur die Wirkkomponente in Betracht. Die Beanspruchung des ersten Motors ist daher größer als die des zweiten. Der erste Motor wird daher bei dauernder Kaskadenschaltung zweckmäßig größer als der zweite gebaut.

Kaskadenschaltung gleich gebauter Motoren ergibt geringen Wirkungsgrad und niedrigen Leistungsfaktor. Bei Anwendung besonderer Bauart des zweiten Motors (Hintermotors) läßt sich der Wirkungsgrad und auch der Leistungsfaktor etwas verbessern. In dem Falle ist aber der Hintermotor nur bei Betrieb in Kaskadenschaltung zu benutzen und muß im übrigen leer laufen.

b) Regelsätze. Nach von Linsemann, Krämer und Heyland schließt man an die Schleifringe des Motors einen Drehstrom-Gleichstrom-Umformer (569) an und speist mit dem gewonnenen Gleichstrom einen Gleichstrommotor, der mit dem Induktionsmotor direkt gekuppelt ist. Nach Krämer speist man mit den Sekundärströmen des Induktionsmotors einen Drehstromkommutator mit Reguliertransformator in Nebenschlußschaltung (556), der mit dem Hauptmotor direkt gekuppelt ist, während er nach Scherbius einen besonderen synchronen oder asynchronen Drehstromgenerator antreibt, der an das Netz angeschlossen ist. (Meyer, „Die Verwendung verlustlos regelbarer Drehstrommotoren“, El. K. u. B. 1911, S. 421).

(530) Polumschaltung²⁾. Durch Einschaltung der einen oder der anderen von zwei voneinander unabhängigen Wicklungen (H. Peters, ETZ 1914, S. 379) oder durch Umschaltung der Teile einer Wicklung wird die Polzahl auf dem Ständer und unter Umständen auf dem Läufer geändert. Am einfachsten ist es, den Läufer mit der von der Polzahl unabhängigen Käfigwicklung (508) zu ver-

¹⁾ Görge, ETZ 1894, S. 644. — Danielson, ETZ 1902, S. 656 u. 1904, S. 43. — Breslau, D. Kreisdiagramm d. Drehstrommotors u. seine Anwendung auf d. Kaskadenschaltung. Voitsche Sammlung 1903. — Cauwenberghe, Beitrag zur allgemeinen Theorie d. Asynchronmot. ohne Kollektor. — D. Kaskadenmotor. Diss. Danzig 1909.

²⁾ Behn-Eschenburg, ETZ 1902, S. 1055, ETZ 1903, S. 1004. — Schnetzler, ETZ 1909, S. 320. — Schnackenburg, El. K. u. B. 1909, S. 206. — Hoefle, ETZ 1914, S. 873. — Rudolf Richter, Ankerwickelungen f. Gleich- u. Wechselstrommaschinen. Berlin: Julius Springer 1920, S. 281 ff.).

sehen. Die Polumschaltung ermöglicht, den Motor wirtschaftlich mit verschiedenen von der Belastung nahezu unabhängigen Geschwindigkeiten laufen zu lassen, ist aber nur bei mäßig hoher Spannung ohne weiteres ausführbar und verlangt vielfach bei der Umschaltung auch einen Wechsel in der Höhe der Spannung. Sie wurde zuerst (Krebs) für Ringwicklung, dann (Behn-Eschenburg) für Trommelwicklung ausgeführt. Polumschaltung ist sowohl bei der Schleifenwicklung wie bei der Wellenwicklung möglich, erfordert aber besonders bei der Schleifenwicklung eine große Zahl Anschlüsse. Die Zahl der einfachen Nuten muß bei Schleifenwicklung und Drehstrom durch $3p$ teilbar sein, worin p jede der verlangten Polpaarzahlen bedeutet, bei Wellenwicklung durch 3 und die Zahl der bei höheren Polzahlen parallel geschalteten Abteilungen. Dies verlangt bei Wellenwicklung im allgemeinen eine künstlich geschlossene Wicklung. Soll z. B. die Zahl der einfachen Nuten gemäß der Gleichung $m = pY + 1$ um eine Einheit verkleinert werden, so läßt man ein Wicklungselement weg und schließt die Lücke durch eine direkte Verbindung auf der Stirnseite des Ankers. Dadurch wird der untere Teil einer Nute und der obere einer anderen Nute frei. Man kann daher die Wicklung so zusammenschieben, daß eine Nute frei wird, die nun weggelassen wird. Eine Anzahl Schritte auf der Seite des künstlichen Schlusses wird dadurch um eine Einheit verkürzt.

Die normale Trommelwicklung ist eine zweischichtige Wicklung, bei der die Oberschicht gegen die Unterschicht um den Teilschritt γ_1 verschoben ist und außerdem die entgegengesetzte Durchflutung wie die Unterschicht hat. Im allgemeinen haben daher die Ströme der Hin- und der Rückführung in ein und derselben Nut nicht dieselbe Phase; die Ausnutzung der Wicklung ist dann verringert. Diese Phasenverschiebungen innerhalb einer Nute sollen möglichst gering sein. Man zeichnet am besten die Phasen in die einzelnen Nuten ein, ähnlich wie in den Abb. 260 und 261, und entnimmt daraus, wie groß die Phasenverschiebungen in den einzelnen Nuten sind. Bei Schleifenwicklung wird die Unterschicht durch $3p$ Anschlüsse in $3p$ gleiche Teile geteilt. Je p Anschlüsse werden miteinander verbunden. Bei Wellenwicklung kommt man mit weniger Anschlüssen aus. Bei jedem Anschluß springt die Phase des Stromes in der Hinführung um 120° .

Man kann statt der geschlossenen Wicklungen auch aufgeschnittene verwenden und die Polzahl durch Vertauschung einzelner Teile ändern.

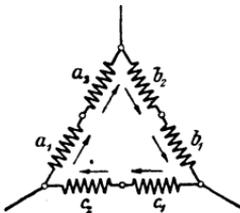


Abb. 258. Polumschaltung:
 p Pole.

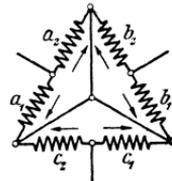


Abb. 259. Polumschaltung:
 $2p$ Pole.

Endlich kann man bei der gewöhnlichen Mehrphasenwicklung (457) durch Umkehrung der Stromrichtung in einzelnen Teilen die Polzahl ändern. Ein einfaches Beispiel zeigt die Polumschaltung der älteren Simplon-Lokomotiven von Brown, Boveri u. Cie, Abb. 258 für p Pole, Abb. 259 für $2p$ Pole. Zeichnet man die Vektoren der Ströme in die Nuten bei beiden Schaltungen ein (Abb. 260 und 261, so erhält man nach dem in (510) geschilderten Verfahren die Diagramme Abb. 262 und 263. Man erkennt, daß die Schaltung Abb. 258 das normale Drehfeld mit 2 Polen, die Schaltung Abb. 259 ein stärkeres entgegengesetzt umlaufendes unregelmäßiges Drehfeld mit 4 Polen liefert.

(531) Anlassen der Drehstrommotoren. Kleine Motoren bedürfen überhaupt keiner Anlaßvorrichtung. Man führt sie dann mit Kurzschlußläufer aus. Beim Einschalten entsteht dann aber ein starker Stromstoß, der nachteilig auf das Netz wirkt. Man kann den Stoß durch einen Stern-Dreieck-Schalter oder einen Anlasser im Primärkreis abschwächen. Zum Anschluß an öffent-

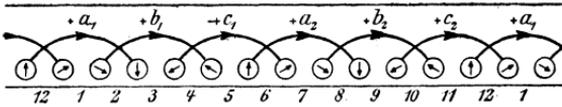


Abb. 260. Stromrichtungen bei der Polumschaltung: p Pole.

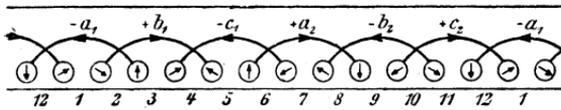


Abb. 261. Stromrichtungen bei der Polumschaltung: $2p$ Pole.

liche, auch der Beleuchtung dienende Elektrizitätswerke werden Motoren mit Kurzschlußläufer in der Regel nur für kleine Leistungen bis zu etwa 2 kW zugelassen. Ist eine fremde Kraftquelle vorhanden, um den Motor auf synchrone Geschwindigkeit zu bringen, so kann der Kurzschlußläufer für beliebig große Leistungen benutzt werden. Notwendig ist dann, daß der Synchronismus möglichst genau hergestellt werde, weil schon bei geringer Schlüpfung das volle Drehmoment und die volle Stromstärke auftritt.

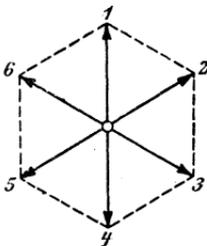


Abb. 262. Vektordiagramm der Polumschaltung: p Pole.

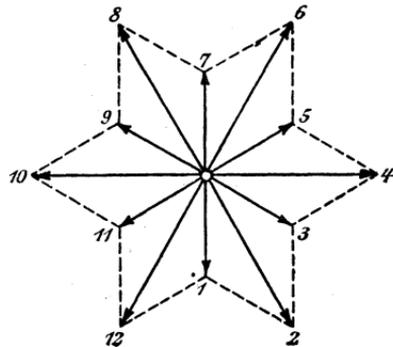


Abb. 263. Vektordiagramm der Polumschaltung: $2p$ Pole.

Zur Abschwächung des Stromes und Erhöhung des Drehmomentes beim Anlaufen kann man die Stromverdrängung benutzen (Rüdenberg, ETZ 1918, S. 483, AEG DRP. 314651), indem man die Läufernten sehr schmal und tief macht und sie mit einem oder mehreren massiven Stäben versieht, die zu einer Käfigwicklung miteinander verbunden sind. Bei Stillstand und geringer Geschwindigkeit, also hoher Frequenz im Läufer, werden die Ströme in radialer Richtung nach außen gedrängt, wodurch der Widerstand der Wicklung um ein Bedeutendes wächst und die sekundäre Streuung verringert wird. Der Strom kann

dann nicht so stark anwachsen und das Drehmoment wird vergrößert. Solche Kurzschlußläufer dürften für größere Leistungen in Frage kommen, wenn die Motoren ohne wesentliche Belastung anlaufen sollen und das Trägheitsmoment der umlaufenden Teile mäßig groß ist. Im allgemeinen ist bei größeren Motoren eine Anlaßvorrichtung erforderlich, um stoßfreies Einschalten und genügendes Anlaufmoment zu erzielen. Zum Anlassen dienen Widerstände und Umschaltungen.

(532) Die Methode von Boucherot besteht darin, daß zwei Ständer, von denen einer verdrehbar ist, auf zwei mit gemeinsamer Käfigwicklung versehene Läufer wirken. Zwischen den Läufern sind die Stäbe durch Widerstände verbunden. Bei einer Verstellung der Ständer gegeneinander um 180 elektr. Grad bleibt die Käfigwicklung stromlos, bei Verringerung der Verstellung bis auf 0° wächst die EMK bei gleicher Schlüpfung bis zum Maximum. Diese Stellung entspricht daher dem Betriebszustande. Im Motor von Bruncken werden die magnetischen Achsen in den Primärankern auf elektrischem Wege gegeneinander verstellt.

(533) Motoren mit Stufenanker. Der Sekundäranker erhält zwei Kurzschlußwicklungen, von denen die eine mit hohem Widerstand dauernd kurz geschlossen ist, die andere mit geringem Widerstand entweder auch dauernd (Boucherot) oder erst nach Erreichung einer bestimmten Geschwindigkeit selbsttätig oder von Hand kurz geschlossen wird. Punga versieht zu dem Zweck den Läufer abwechselnd mit tieferen und weniger tiefen Nuten und legt in den tieferen Teil eine Eisenkäfigwicklung, während die weniger tiefen und der freie Teil der anderen Nuten eine Kupferwicklung erhält, die erst später geschlossen wird.

(534) Anlassen durch Stern-Dreieck-Schaltung. Die Motoren mit Kurzschlußläufer und den soeben beschriebenen anderen Anordnungen werden mit Hilfe besonderer Schalter beim Anlassen in Stern, sobald sie laufen, in Dreieck geschaltet. Bei der Sternschaltung erhält jeder Zweig nur das $1/\sqrt{3}$ -fache der Netzspannung, bei Dreieckschaltung die volle Netzspannung. Die Stromstärken sind daher beim Anlassen verringert, aber auch das Drehmoment, und zwar, weil der Induktionsfluß nahezu proportional der Spannung ist, nach (515) Gl. (7) auf den dritten Teil. Beim Übergang von Stern- auf Dreieckschaltung werden zweckmäßig Widerstände zwischengeschaltet, um Strom- und Spannungsschöße zu verhüten.

(535) Anlasser im Primärkreise. Motoren mit Kurzschlußläufer erhalten hin und wieder einen in den Primäranker zu schaltenden Anlasser, bestehend aus einem mit Sparschaltung ausgeführten Transformator (339) mit Anzapfungen und Windungsschalter, (326), oder einem Wasseranlasser. Dabei kann die Fliehkraftkuppelung von Friese angewandt werden, die die Welle erst bei einer bestimmten Geschwindigkeit mit der Riemenscheibe kuppelt (gebaut von den Siemens-Schuckertwerken). Der Anlasser kann aber nur ein zu starkes Anwachsen der Stromstärke verhindern, wobei zugleich das an sich geringe Anlaufdrehmoment noch verringert wird.

(536) Anlasser im Sekundärkreise. Der Anlasser im Läuferkreis (Abb. 264) erfordert Schleifringe, verbürgt aber größtes Drehmoment beim Anlaufen und normales Drehmoment bei etwa normaler Stromstärke, vgl. Abb. 256. Anlasser im Primäranker und im Sekundäranker werden mitunter gleichzeitig angewendet, um auch in elektrischer Hinsicht ganz stoßfreies Anlaufen zu erzielen.

Abstufung des Anlassers (Görges, ETZ 1894, S. 644; Elektr. Bahnen 1906, S. 249. — Niethammer, ETZ 1900, S. 37). Die Abstufung wird wie in (449) am besten so gewählt, daß jeder Stufe derselbe Sprung in den Stromstärken entspricht. Es sei, Abb. 265, MS die normale, MT die maximale Stromstärke im Primärkreise, BS die normale BT , die maximale Stromstärke im Sekundärkreise. Der Gesamtwiderstand $R + R_a$ im Sekundärkreise ($R_a =$ Widerstand der Wicklung, $R_a =$ dem des Anlassers) sei zuerst so groß, daß der Motor bei Stillstand die Stromstärke MT annimmt. Der zugehörige Schlüpfungskreis berührt CT und hat seinen Mittelpunkt in K_1 , wobei

$\sphericalangle TCK_1 = 90^\circ$. Da das Drehmoment größer als normal ist, setzt sich der Motor in Bewegung, bis $I_1 = MS$ geworden ist. CS schneidet den Schlüpfungskreis in S_1 , die Geschwindigkeit ist daher jetzt proportional mit CS_1/CS und die Schlüpfung gleich S_1S/CS . Springt jetzt durch Abschalten einer Stufe die Stromstärke wieder auf den Wert MT , so ist im ersten Augenblick die Schlüpfung noch ebenso groß wie vorher, also

$$\frac{T_2 T}{CT} = \frac{S_1 S}{CS} \quad (1)$$

Es ist also $S_1 T_2$ parallel mit ST zu ziehen und durch B , T_2

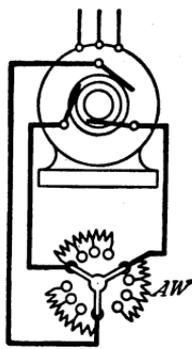


Abb. 264. Schaltung des Anlassers bei Induktionsmotoren.

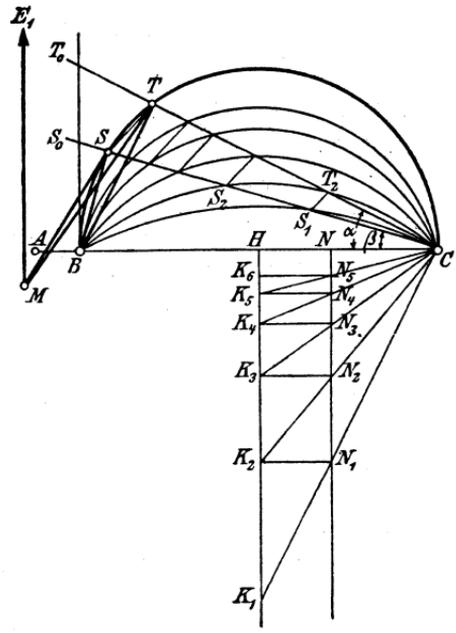


Abb. 265. Diagramm zum Anlasser des Mehrphasenmotors.

und C ein neuer Schlüpfungskreis mit dem Mittelpunkt K_2 zu legen. Bei normaler Stromstärke MS ist die Schlüpfung nunmehr gleich $S_2 S/CS$. Es war aber (519) SS_2 proportional mit $I_2(R_2 + R_a)$ und BS proportional mit I_2 . Da nun T_2 und S_2 auf demselben Schlüpfungskreise liegen, also demselben Widerstände $(R_2 + R_a)$ angehören, so ist

$$\frac{T_2 T}{BT} = \frac{S_2 S}{BS} \quad (2)$$

Die Division von 2) durch 1) gibt

$$\frac{CT}{BT} = \frac{S_2 S}{S_1 S} \cdot \frac{CS}{BS} \quad \text{oder} \quad \frac{S_1 S}{S_2 S} = \frac{BT}{CT} \cdot \frac{BS}{CS} \quad (3)$$

Setzt man $BT/CT = \text{tg } \alpha$ und $BS/CS = \text{tg } \beta$, so wird

$$S_1 S : S_2 S = \text{tg } \alpha : \text{tg } \beta = BT_0 : BS_0 = \lambda$$

wenn S_0 und T_0 die Schnittpunkte von CS und CT mit der in B auf AC errichteten Senkrechten sind. Es bilden also die Gesamtwiderstände $(R_2 + R_a)$, weil sie bei konstanter Stromstärke I_2 den Abschnitten $S_1 S, S_2 S \dots$ proportional sind, eine geometrische Reihe, und es ist

$$\frac{R_2 + R_{a1}}{R_2 + R_{a2}} = \frac{R_2 + R_{a2}}{R_2 + R_{a3}} = \dots = \lambda = \frac{BT_0}{BS_0}$$

Da diese Widerstände proportional mit $\operatorname{tg} BCK$ sind, so kann man sie auch durch die Strecken $HK_1, HK_2 \dots$ darstellen. Macht man $CH : CN = \lambda$ und zieht man durch N eine Senkrechte zu BC , so ergibt die dargestellte Konstruktion direkt die Widerstände. Für die Konstruktion genügt die Festlegung der Punkte S und T , die einfache Konstruktion der Punkte S_0 und T_0 sowie der Punkte K wobei CK_1 senkrecht auf CT steht. Ist σ die Schlüpfung ohne vorgeschalteten Widerstand in Prozent, R_{an} der ganze bei Stillstand und maximalem Strom vorhandene Widerstand des Anlanners, so ist

$$R_2 \lambda^n = R_2 + R_{an} \quad \text{oder} \quad R_{an} = R_2 (\lambda^n - 1) \quad \text{und} \quad 1/\lambda^n = \sigma$$

Der bis jetzt betrachtete Widerstand ist nur so groß, daß beim Einschalten sofort die größte Stromstärke MT auftritt. Da dies im allgemeinen unzulässig ist, muß man den Anlasser noch durch eine Reihe Stufen ergänzen, so daß beim Einschalten nur der dritte bis fünfte Teil des normalen Stromes auftritt.

(537) Bürstenabhebevorrichtung. Um die Abnutzung der Schleifringe und Bürsten zu verringern, werden die Motoren meistens mit einer Vorrichtung versehen, durch die die Schleifringe, nachdem der Anlaßwiderstand ganz abgeschaltet ist, kurz geschlossen und die Bürsten abgehoben werden. In Abb. 266 legt eine unterhalb der Schleifringe gelagerte, mit einem Handrade gedrehte Spindel mit Hilfe zweier Nocken nacheinander zwei Hebel um. Der eine von diesen schiebt die rechts auf einem Zapfen der Schleifringbuchse gelagerte und mit drei Kontaktfedern versehene Glocke nach links und schließt dadurch die Schleifringe kurz, der andere dreht darauf den Bürstenträger und hebt dadurch die Bürsten

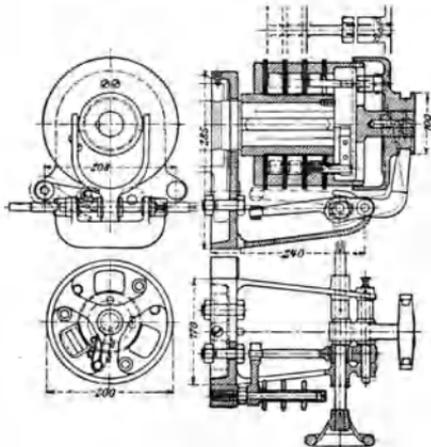


Abb. 266. Bürstenabhebevorrichtung der Siemens-Schuckertwerke, Maßstab 1 : 12,5.

von den Ringen ab. Vielfach wird diese Vorrichtung mit dem Anlasser so zusammengebaut, daß das Abschalten der Widerstandsstufen, das Kurzschließen der Schleifringe und das Abheben der Bürsten durch einfaches Drehen an einem Handrade in richtiger Reihenfolge ausgeführt wird. Vgl. Abb. 309.

(538) Die Gegenschaltung (Görge's, ETZ 1894, S. 644) besteht darin, daß beim Anlauf zwei in Stern geschaltete Abteilungen auf dem Sekundäranker entweder mit verschieden großen Windungszahlen in gleicher relativer Lage zueinander, Abb. 267, oder mit gleichen Windungszahlen bei einer Verdrehung um 60 elektrische Grade, Abb. 268, mit ihren gleichnamigen Anfängen zusammengeschaltet werden, während diese für Dauerbetrieb sämtlich untereinander kurz geschlossen werden. In Schaltung I wirkt die algebraische, in Schaltung II die geometrische Differenz der EMKe auf die Summe der Widerstände; der Kurzschluß zwischen A, B, C macht die Wicklungsabteilungen voneinander unabhängig. Die erste Wicklung eignet sich für Drahtwicklung und gestattet verschiedene Abstufungen, die zweite Wicklung für Stabwicklung mit zwei Stäben für 1 Nut. Geht bei derselben Schlüpfung durch Gegenschaltung die Stromwärme im Sekundärkreis auf den m -ten Teil zurück, so muß die Schlüpfung zur Herstellung des früheren Drehmomentes m -mal so groß werden, wobei die Stromwärme ebenfalls m -mal so groß

wird wie bei Normalschaltung. Sind bei Drahtwicklung die Drähte für eine Nut 2 und 1, so wirkt bei Gegenschaltung die einfache EMK auf den Widerstand dreier Drähte, bei Normalschaltung die einfache EMK auf den Wider-

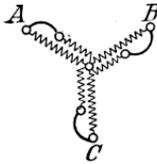


Abb. 267. Gegenschaltung;
Wicklungen parallel.

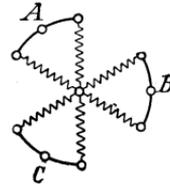


Abb. 268. Gegenschaltung;
Wicklungen gegeneinander verdreht.

stand eines Drahtes, die doppelte EMK auf den Widerstand zweier Drähte.

Demnach verhalten sich die Stromwärmen wie $\frac{1^2}{3} : \left(\frac{1^2}{1} + \frac{2^2}{2} \right) = \frac{1}{9}$. Bei Gegenschaltung ist also die Schlüpfung die neunfache, sie wirkt daher so, als wenn der achtfache Ankerwiderstand vorgeschaltet wäre. Bei der zweiten Art wirkt die einfache EMK entweder auf jeden Draht oder auf zwei Drähte; die Schlüpfungen verhalten sich daher hier immer wie 1:4. Dies Verhältnis genügt in den meisten Fällen, um den Motor mit übernormalem Moment anlaufen zu lassen. Zur Umschaltung benutzt man einen selbsttätigen Kurzschließer, vgl. (386) und Abb. 185, der bei etwa 80% der Synchrongeschwindigkeit den Kurzschluß herstellt.

(539) Anlassen mit Polumschaltung. Motoren, die mit Polumschaltung versehen sind, werden so angelassen, daß man zuerst die größte Polzahl einstellt und allmählich die Polzahlen verringert.

(540) Anlassen mit Kaskadenschaltung. Benützt man die Kaskadenschaltung, wie gewöhnlich, lediglich zum Anfahren, so kann der Hintermotor mit Käfiganker von verhältnismäßig hohem Widerstande ausgeführt und magnetisch hoch gesättigt werden. Man erreicht dann bei einfacher Schaltung sehr große Zugkraft auch noch dann, wenn die Netzspannung nicht ganz konstant gehalten wird (Veltlinbahn, vgl. El. Bahnen u. Betr. 1904, S. 394 und 407; 1905, S. 25 und 454).

(541) Kompensierung des Blindstromes. Soll der Motor im Primärkreise mit dem Leistungsfaktor 1 arbeiten, so muß der Strom I_2 eine beträchtliche Voreilung vor E_2 erhalten, Abb. 254. Dazu ist eine EMK ϵ nötig, die etwa 90° Voreilung vor E_2 und dieselbe Frequenz wie E_2 besitzt, vgl. Abb. 282. He y l a n d hat hierzu die Zuhilfenahme eines Kommutators vorgeschlagen (ETZ 1901 bis 1903), O s n o s eine Kommutatorwicklung auf dem Primäranker (ETZ 1902, S. 919), K a p p drei an die Schleifringe angeschlossene Gleichstromanker, die in konstant erregten Feldern schwingen (ETZ 1912, S. 778; 1913, S. 931; 1916, S. 625; 1919, S. 405), N e h l s e n eine Drehstromkommutatormaschine, die an die Schleifringe des Sekundärankers angeschlossen und durch einen Motor angetrieben wird (ETZ 1917, S. 584), B l o n d e l und L e b l a n c einen Kommutatoranker im Anschluß an die Schleifringe. Vgl. auch den S c h ü l e r s c h e n Motor (499).

Der Vorteil der Kompensation liegt einerseits in der Vergrößerung des Leistungsfaktors bis auf 1, andererseits in der Möglichkeit, den Luftspalt größer zu wählen. Die Anordnung besonderer Maschinen lohnt sich nur bei großen Motoren. Da für das Drehmoment nur die Wirkkomponente von I_2 in Betracht kommt, wird die Stromwärme und die Schlüpfung durch die Kompensation um etwa den dritten Teil vergrößert, dafür wird aber der Primärstrom schwächer, mithin auch die Stromwärme im Primäranker.

Das Sachsenwerk (Hartwagner) führt den Primärstrom über drei Schleifringe einer Drehstromwicklung auf dem Läufer zu. Dieser besitzt außerdem eine Kommutatorwicklung für niedrige Spannung, deren Bürsten mit den drei Anfängen der Ständerwicklung verbunden sind. Der Anlasser liegt zwischen den drei Enden der Ständerwicklung. Da der Läufer gegen das Drehfeld umläuft, ist die Geschwindigkeit des Drehfeldes im Raum gleich der Schlüpfung. In der Kommutatorwicklung und in der Ständerwicklung werden daher EMKe niedriger und zwar gleicher Frequenz induziert, woraus sich die Möglichkeit der Reihenschaltung beider Wicklungen ergibt. Die Phasen der EMKe in der Kommutatorwicklung werden durch Verschiebung der Bürsten nach Bedarf fest eingestellt, so daß eine Kompensation auf den Leistungsfaktor Eins wie beim Phasenschieber (557) möglich ist. Der Leistungsfaktor bleibt von Leerlauf bis zum Doppelten der Vollbelastung nahezu gleich Eins, er kann aber auch auf Überkompensation eingestellt werden. Die Drehzahl kann je nach der Bürstenstellung untersynchron oder übersynchron sein.

Die Schaltung des Vibrators von Kapp (Bergmann El. W.) zeigt Abb. 269. Die Sekundärströme werden über die Anlaßwiderstände zu den drei in Dreieck geschalteten Kommutatorankern geleitet. Die Erregerwicklungen sind in Reihe geschaltet und an eine Gleichstromquelle angeschlossen. Die Anker schwingen mit der Frequenz der Sekundärströme des Motors und erzeugen dadurch die kompensierenden EMKe. Da das Drehmoment nur zugleich mit dem Ankerstrom seine Richtung ändert, ist die Geschwindigkeit der Schwingung und mithin die EMK am größten, wenn die Stromstärke durch Null geht, und zwar eilt die EMK dem Strom um 90° vor. Der Apparat wirkt also wie ein Kondensator und gibt der Phase der Läuferströme des Motors eine Voreilung, vgl. (139). Die Kommutierung ist günstig, weil die Geschwindigkeit zur Zeit des stärksten Stromes und der Strom zur Zeit der größten Geschwindigkeit gleich Null ist. Es können daher Metallbürsten benutzt werden. Der Vibrator kann auch bei Induktionsgeneratoren, vgl. (543), verwendet werden. Die Bergmann-El.-W. führen den Vibrator mit stehenden Ankern und Kugellagern aus.

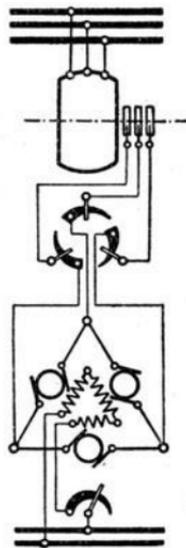


Abb. 269. Schaltung des Vibrators von Kapp.

(542) Der Induktionsmotor als Generator¹⁾. Bewegt sich Punkt I , Abb. 255 auf der unteren Hälfte des Kreises, so sind M und σ negativ. Der Motor läuft dann übersynchron, muß also mechanisch angetrieben werden. Liegt I unterhalb der Horizontalen durch M , so ist auch N_{el} negativ. Der Primäranker gibt dann elektrische Leistung ab, der Motor läuft als Generator. Punkt C wird bei unendlich großer Schlüpfung, d. h. bei unendlich großer Drehzahl, in beliebiger Richtung erreicht.

Die Generatorwirkung des Induktionsmotors bei Übersynchronismus hat bei stark schwankenden Kraftbetrieben den Vorteil eines Belastungsausgleiches, da bei Belastungsschwankungen in der Regel die Drehzahl der Generatoren und dadurch die Frequenz vorübergehend verringert wird, so daß sämtliche Motoren vorübergehend als Generatoren laufen. Hiervon ist besonders im Eisenbahnbetrieb Gebrauch gemacht worden (El. Bahn. u. Betr. 1905, S. 514).

Generatorwirkung anderer Art kann eintreten, wenn ein Drehstrommotor in einem Netz mit stark unsymmetrisch verteilter Spannung läuft. In dem Falle gibt er von der aus dem einen Wicklungszweig aufgenommenen Leistung solche an

¹⁾ Feldmann, Asynchrone Generatoren für ein- und mehrphasige Wechselströme. Berlin: Julius Springer 1903.

den anderen ab, wirkt also ausgleichend. Hierbei können indessen einzelne Teile der Wicklung überlastet werden. Im äußersten Falle, wenn in einem Zweig die Netzspannung auf Null gesunken ist, kann der Motor diese Spannung wiederherstellen. Damit ergibt sich das Prinzip eines von *Arno* angegebenen Phasenumformers.

(543) Als **asynchroner Stromerzeuger** kann man den Induktionsmotor daher in Verbindung mit Synchrongeneratoren verwenden. Der Erregerstrom, der im wesentlichen Blindstrom ist, muß dabei von den parallelgeschalteten Synchrongeneratoren geliefert werden, und dadurch ist zugleich die Frequenz des von ihm erzeugten Stromes bestimmt. Es empfiehlt sich daher eine Kompensation nach (541) anzuwenden. Es ist sogar möglich, daß der Induktionsgenerator einen Synchronmotor speist und zugleich von ihm die Erregung erhält. Solche Generatoren verlangen wenig Wartung, sie sind aber des starken Blindstromes wegen nur selten verwendet worden.

(544) **Der Induktionsmotor für Einphasenstrom.** Unterbricht man bei einem Drehstrominduktionsmotor, nachdem man ihn in Gang gesetzt hat, eine Zuleitung, so läuft er weiter und ist, wenn auch nicht in demselben Maße wie vorher, imstande, mechanische Leistung abzugeben. Er bildet dann einen einphasigen Induktionsmotor. Diese Anordnung ist in der Tat die übliche. Zwei in Reihe geschaltete Zweige einer Drehstromwicklung oder ein Zweig einer Zweiphasenwicklung bilden den Hauptstromkreis des Primärankers, in dem daher zunächst ein feststehendes magnetisches Wechselfeld erzeugt wird. Der Sekundäranker ist genau wie der der Mehrphasenmotoren ausgebildet und kann eine Kurzschlußwicklung, eine

Wicklung mit Schleifringen, Gegenschaltung usw. besitzen. Der Einphasenmotor hat bei Stillstand kein Drehmoment, es entwickelt sich erst beim Laufen, und zwar in der Drehrichtung; daher ist der Betrieb in beliebiger Richtung möglich, je nachdem man ihn in Gang gesetzt hat. Infolge der Drehung entsteht durch die Ströme im Sekundäranker ein Querfeld, d. h. ein Feld, das bei zweipoliger Anordnung senkrecht zu dem Felde der Primärwicklung steht. Beide Felder bilden zusammen, da sie nahezu um 90° gegeneinander in der Phase verschoben sind, ein Drehfeld. Damit sich das Querfeld genügend stark ausbilden kann, muß der Widerstand im Sekundäranker möglichst gering sein. Mit Vergrößerung des Widerstandes sinkt das Drehmoment schnell, eine Regulierung der Geschwindigkeit durch Einschalten von Widerständen in den Sekundäranker, wie bei Mehrphasenmotoren, ist daher unmöglich. Bei Übersynchronismus läuft der Motor als Generator. Die Stromwärmeleistung im Sekundäranker in Bruchteilen der auf ihn übertragenen Leistung ist bei normalem Betriebe etwa gleich der doppelten Schlüpfung und erreicht bei Synchronismus ihren geringsten Wert. Die Leistung beträgt etwa 60—70% von der eines gleich großen Drehstrommotors, der Wirkungsgrad ist einige Prozent geringer. Diagramm des Motors (559).

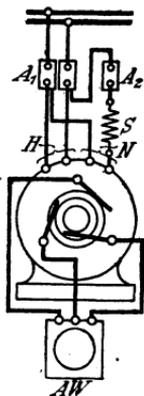


Abb. 270. Anlaßschaltung des einphasigen Induktionsmotors.

(545) **Anlassen des einphasigen Induktionsmotors.** Die üblichste Methode den Einphasenmotor in Gang zu setzen, beruht darauf, daß schon bei Stillstand ein Drehfeld erzeugt wird. Dazu ist eine *Kunstphase* erforderlich. Man benutzt einen zweiten räumlich um $(90/p)^\circ$ verschobenen Stromkreis, z. B. den dritten für den Betrieb weggelassenen Zweig des Drehstrommotors, in dem durch eine Drosselspule *S* oder einen Flüssigkeitskondensator eine Phasenverschiebung gegen den Strom im Hauptkreis hergestellt wird (Abb. 270). Etwa bei doppelter Normalstromstärke im Primäranker kann man normales Anlauf-Drehmoment erzielen. Der Hilfskreis muß nach dem Anlassen unterbrochen werden. Außerdem ist noch eine der für Mehrphasenstrom nötigen Anlaßvorrichtungen (Widerstand im Sekundäranker, Gegenschaltung usw.) anzuwenden.

Arnold und Schüler (ETZ 1903, S. 565) versehen den Läufer mit Kommutatorwicklung und lassen ihn als Repulsionsmotor (558, 4) anlaufen. Arnold verwandelt dann die Läuferwicklung durch Kurzschluß der Kommutatorteile miteinander in eine Kurzschlußwicklung. Schüler schließt geeignete Punkte der Ankerwicklung über Schleifringe und Bürsten an einen Drehstromanlasser an, der beim Betrieb kurzgeschlossen ist. Das resultierende Drehmoment ist dann beim Anlauf nahezu gleich der Summe der Drehmomente, die der Motor einzeln als Repulsionsmotor und als Induktionsmotor entwickelt. Die Ausnutzung der Läuferwicklung ist in diesem Falle ungünstig (462).

Kommutatormotoren für Wechselstrom¹⁾.

(546) **Allgemeines.** Kommutatormotoren werden für Mehrphasenstrom und Einphasenstrom gebaut. Der Kommutator hat die Eigenschaft, daß er die Frequenz der in der Wicklung zwischen den Bürsten induziertem EMKe von der Drehzahl der Wicklung unabhängig macht, vgl. (406). Sie besitzen einen Läufer mit Kommutator wie die Gleichstrommaschinen. Der Ständer besitzt bei einigen Typen ausgeprägte Pole, bei anderen ist er ein den Läufer eng umschließender Ring mit Nuten an der inneren Zylinderfläche, in denen eine verteilte Wicklung liegt. Letzteres ist nötig, wenn sich ein mehr oder minder vollkommenes Drehfeld ausbilden soll. Kompensationswicklungen und Wendepole oder Wendezähne werden häufig angebracht, (392) und (393). Der Hauptzweck des Kommutators besteht darin, Motoren zu bauen, die auch bei Einphasenstrom mit großer Kraft anlaufen, und deren Geschwindigkeit man wirtschaftlich innerhalb weiter Grenzen ändern kann.

¹⁾ Literatur: Mehrphasenkommutatormotoren: Görges, ETZ 1891, S. 699. — Blondel, Ecl. él. Bd. 35, S. 121. — Winter, Zeitschr. f. El. u. Maschb. 1903, S. 213. — Rüdénberg, ETZ 1910, S. 1181, ETZ 1911, S. 233, El. u. Maschb. 1911, S. 467. — Jonas, ETZ 1910, S. 390. — Eichberg, ETZ 1910, S. 749. — Schenkel, ETZ 1912, S. 473. — Binder, ETZ 1913, S. 410. — Heyland, ETZ 1914, S. 85. — v. Kleist, ETZ 1914, S. 1005. — Osnos, ETZ 1918, S. 215.

Kaskadenschaltungen von Drehstrom-Induktionsmotoren mit Kommutatormotoren: Fleischmann, ETZ 1910, S. 191. — Arbeiten aus d. Elektrotechn. Inst. Karlsruhe, Bd. 2. — Rüdénberg, El. K. u. B. 1914, S. 425. — Scherbius, ETZ 1912, S. 1079; 195, S. 299

Einphasen-Kommutatormotoren: Klassifizierungen: Atkinson, Proc. of the Inst. of Civil Eng. London, 1898, S. 113. — Osnos, ETZ 1904, S. 1. — Pichelmayer, ETZ 1904, S. 464. — Sumec, El. u. Maschb. 1904, S. 173. — Fyn, The Electrician, London, 1906, Bd. 57, S. 204. — Görges, ETZ 1907, S. 730. — Jonas, ETZ 1908, S. 183. — Aufsätze: Eichberg, ETZ 1904, S. 75 (Latour-Winter-Eichberg-M.). — Richter, ETZ 1906, S. 537, 1907, S. 827 (Reihenschlußmotor). — Schnetzler, ETZ 1905, S. 72; 1907, S. 818 u. 1097; 1909, S. 320 (Thomson-Déri-Motor). — Osnos, ETZ 1907, S. 336, 1908, S. 2 (Doppelschlußmotor). Weitere Aufsätze in d. ETZ u. andern Zeitschr. von Alexanderson, Arnold, Behn-Eschenburg, Bragstad, Breslau, van Cauwenberghe, Danielson, Eichberg, Fleischmann, Fyn, Heyland, Latour; Niethammer, Osnos, Punga, Richter, Rusch, Schnetzler, Sumec.

Berechnung d. Motoren siehe: Fischer-Hinnen, ETZ 1909, S. 485. — Ossanna, ETZ 1911, S. 581. — Simons u. Rogowski, ETZ 1908, S. 535 (Streuung). — Schenkel, El. u. M. 1911, S. 1019 (Streuung). — Schenkel, ETZ 1917, S. 101.

Monographien: Heubach, D. Wechselstromserienmotor-Voitsche Samml. 1899. — Niethammer, D. Wechselstrom-Kommutatormotoren, Zürich 1905. — Stern, Unters. d. Felder eines Einphasenrepulsionsmotors, System Déri, Diss. Karlsruhe 1910. — Wolf, Experimentelle Bestätigung d. Vektordiagrammes für d. Motor nach Winter-Eichberg-Latour, Diss. Dresden 1910. — Meyer-Delis, Beitrag zur Theorie des Mehrphasen-Wechselstrom-Compoundmotors. Diss. Hannover 1908. — Alexander, Drehstrommotoren mit Kommutator für regelbare Drehzahl. Diss. Berlin 1908. — Dyhr, Die Einphasen-Motoren nach den deutschen Patentschriften, Diss. Dresden, Berlin 1912, Springer. — Hillebrand, D. Theorie d. Drehstrom-Kollektor-Nebenschluß-Motors mit getrennter Erreger- u. Kompens.-Wicklung. Diss. München 1912. — Jaensch, Beiträge z. vektordiagrammat. Darstellg. d. Arbeitsweise d. allgem. Transform. mit Eisen u. des Repulsionsmotors nach Thomson. Diss. Dresden 1914. — Seiz, D. asynchrone Eisenkernformer (Frequenzumformer). Diss. Karlsruhe 1914. — Schmitz, D. Winter-Eichberg-Latour-Kollektor-Motor als selbstreggter Generator. Diss. Dresden 1916.

Bei allen Motoren müssen Ständer und Läufer aus dünnen, voneinander isolierten Blechen hergestellt werden. Für den Aufbau gilt das unter (348) bis (387) Gesagte.

Die Anwendung des Kommutators bei Wechselstrommotoren bringt folgende Vorteile: wirtschaftliche Regulierbarkeit der Geschwindigkeit in weiten Grenzen, Erzielung eines hohen Leistungsfaktors und eines großen Anlaufmomentes auch bei Einphasenstrom; sie macht die Motoren aber komplizierter, teurer und reparaturbedürftiger, als es die Induktionsmotoren sind. Man kann allgemein Motoren mit Reihenschlußcharakteristik und solche mit Nebenschlußcharakteristik unterscheiden, vgl. (496). Die Motoren mit Reihenschlußcharakteristik gehen bei völliger Entlastung durch, sie zeichnen sich andererseits durch ein großes Anlaufmoment aus und werden daher besonders für Einphasenstrom im Bahnbetrieb verwendet. Die Motoren mit Nebenschlußcharakteristik besitzen ein verschwindend geringes Anlaufmoment und müssen daher durch besondere Schaltungen angelassen werden. Zum Anlassen und zum Regulieren der Geschwindigkeit werden nicht Widerstände, sondern Reguliertransformatoren — meist einspülige in Sparschaltung (339) — verwendet, wodurch eine größere Wirtschaftlichkeit erzielt wird.

(547) **Direkte und durch Transformatoren vermittelte Schaltungen.** Die Transformatoren sind so zu schalten, daß der Charakter der Reihenschlußschaltung oder der Nebenschlußschaltung dadurch nicht verloren geht. Dies mögen die Abb. 271 und 272 verdeutlichen. Bei der Reihenschlußschaltung liegt die

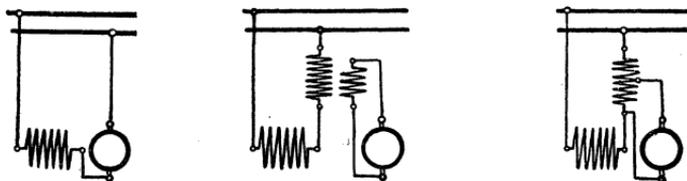


Abb. 271. Reihenschlußschaltung für Kommutatormotoren.

Abb. 271a. Direkte. Abb. 271b. Mit zweispüligem Abb. 271c. Mit einspüligem
Transformer.

Primärspule des Transformators in Reihe mit der Ständerwicklung, während die Sekundärspule an die Bürsten der Läuferwicklung angeschlossen ist. Abb. 271b stellt die Anordnung bei einem zweispüligen, Abb. 271c die bei einem einspüligen

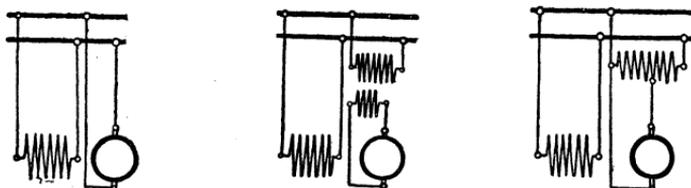


Abb. 272. Nebenschlußschaltung für Kommutatormotoren.

Abb. 272a. Direkte. Abb. 272b. Mit zweispüligem Abb. 272c. Mit einspüligem
Transformer.

Transformator dar. Man erhält die letzte Schaltung, indem man sich die beiden Spulen des Transformators in Abb. 271b übereinandergeschoben und zu einer einzigen vereinigt denkt. Bei Abb. 271a haben Läufer und Ständer denselben Strom, bei Abb. 271b und 271c erhält der Läufer einen Strom, dessen Stärke der Stromstärke

im Ständer proportional ist. Ist der dem Läufer zugeführte Strom schwächer als der Ständerstrom, so kann man sich statt dessen denken, der Strom wäre in beiden Teilen gleich stark, die Windungszahl auf dem Läufer aber verringert. Eine Vermehrung der sekundären Windungen des Transformators verringert die sekundäre Stromstärke, wirkt also ebenso, als wenn bei direkter Schaltung die Windungen der Läuferwicklung vermindert worden wären.

Bei der Nebenschlußschaltung liegt die Primärwicklung des Transformators am Netz, also parallel zur Ständerwicklung, während die Sekundärwicklung genau wie vorher an die Bürsten der Läuferwicklung angeschlossen ist. Abb. 272b stellt die Anordnung wieder bei einem zweispuligen, Abb. 272c bei einem einspuligen Transformator dar. Bei Abb. 272a erhält der Anker die volle Netzspannung, bei Abb. 272b und 272c einen ihr proportionalen Teil. Eine Vermehrung der sekundären Windungszahl des Transformators erhöht die Spannung an der Läuferwicklung, wirkt also ebenso, als wenn bei direkter Schaltung die Windungen der Läuferwicklung vermindert worden wären.

(548) Zerlegung der Wicklungen in X- und Y-Wicklungen. Wir denken uns ein beliebig gerichtetes Feld in einem zweipoligen Motor in zwei aufeinander senkrecht stehende Komponenten, eine horizontale X-Komponente und eine vertikale Y-Komponente, zerlegt und denken uns diese Komponenten durch besondere Wicklungen, eine X-Wicklung und eine Y-Wicklung, erzeugt. Bei mehrpoligen Motoren schließen diese Wicklungen $(90/p)^\circ$ miteinander ein. Diese Zerlegung ist immer möglich, und ihr Zusammenwirken gibt immer das richtige resultierende Feld, wenn die Felder im Luftspalt sinusartig verteilt sind; andernfalls ist sie nur angenähert richtig. Die Ströme in diesen Wicklungen, bei Kommutatorwicklungen die durch je ein Bürstenpaar zugeführt sind, seien I_x und I_y . Bei einem vollkommenen Drehfelde haben die Ströme I_x und I_y 90° Phasenverschiebung gegeneinander und sind dabei gleich stark. Haben die Ströme keine Phasenverschiebung gegeneinander, so erzeugen sie ein Wechselfeld in einer festen Richtung, dessen Achse mit der X-Achse den Winkel ω einschließen möge. Dann ist

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{w_y I_y}{w_x I_x}$$

wenn w_x und w_y die Windungszahlen der beiden Wicklungen sind.

Die Achse einer Kommutatorwicklung ist immer durch die Bürstenstellung bestimmt. Wir nehmen an, die Verbindungen der Wicklung mit dem Kommutator seien derart, daß die Verbindungslinie der Bürsten die Richtung der Achse anzeigt. Hat man zwei Bürstenpaare, die um $(90/p)^\circ$ gegeneinander verdreht sind, so kann man durch jedes Bürstenpaar einen Strom schicken, ohne daß diese in den äußeren Teilen der Stromkreise einander stören. In den Teilen der Kommutatorwicklung kann man sich die Ströme überlagert denken. Die magnetische Wirkung ist so, als wenn jeder Strom in einer besonderen Wicklung flösse.

(549) EMKe in der Kommutatorwicklung. In der Kommutatorwicklung entstehen zwischen den Bürsten EMKe, deren Frequenz bei jeder beliebigen Geschwindigkeit genau mit der Frequenz des magnetischen Feldes, in dem der Anker läuft, übereinstimmt. Man kann daher bei jeder Drehzahl Wechselstrom von dieser Frequenz durch den Anker schicken. Hierin beruht gerade die Bedeutung des Kommutators. Die EMKe sind zweierlei Art (406):

1. E M K d e r R u h e, hervorgerufen durch die Änderung des die ruhend gedachte Wicklung in der Richtung ihrer Achse durchsetzenden Induktionsflusses — Bezeichnung E' . Sie hat 90° nacheilende Phasenverschiebung gegen den Induktionsfluß und ist eine leistungslose oder Blindkomponente der EMK. Ihre Richtung ist unabhängig von der Drehungsrichtung des Ankers, ihre Größe ist von der Verteilung des Magnetismus längs des Umfangs des Ankers abhängig.

2. E M K d e r D r e h u n g, hervorgerufen durch die Drehung des Ankers in dem konstant gedachten Induktionsfluß, der die Wicklung senkrecht zu ihrer

Achse trifft — Bezeichnung E'' . Sie hat 0° oder 180° Phasenverschiebung gegen den Induktionsfluß und ist eine Wirkkomponente der EMK. Ihre Richtung kehrt sich zugleich mit der Drehungsrichtung des Ankers um, ihre Größe hängt nur vom Gesamtfluß, nicht von seiner Verteilung längs des Umfanges des Ankers ab. Bei mehrpoligen Maschinen ist der Induktionsfluß um $(90/p)^\circ$ gegen die Achse der Wicklung verdreht.

Bei positiver Rotation des Ankers, Abb. 273 a und b ergeben sich die EMKe aus den allgemeinen Gleichungen (4) und (5) in (406). Der Induktionsfluß sei längs des Umfanges nach einem Sinusgesetz verteilt. Es werde daher für Φ zuerst

$$\Phi_{x_2} = \Phi_{x_{20}} \sin \omega t \cdot \cos \vartheta$$

sodann

$$\Phi_{y_2} = \Phi_{y_{20}} \sin (\omega t - \psi) \cdot \sin \vartheta$$

ferner für die X_2 -Wicklung

$$\vartheta_1 = -\frac{\pi}{2}, \quad \vartheta_2 = +\frac{\pi}{2}$$

für die Y_2 -Wicklung

$$\vartheta_1 = 0 \quad \vartheta_2 = \pi$$

endlich

$$\frac{n}{60} p = \frac{v n_0}{60} p = v f, \text{ so daß } \frac{n}{n_0} = v \text{ ist,}$$

gesetzt. Dann ergibt sich für die effektiven Mittelwerte der EMKe in der X_2 -Wicklung

$$E_{x_2}' = \sqrt{2} \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{a} f w_{x_2} \Phi_{x_{20}} \text{ Volt mit } 90^\circ \text{ nacheilender Phasenverschiebung,}$$

$$E_{x_2}'' = v \sqrt{2} \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{a} f w_{x_2} \Phi_{y_{20}} \text{ Volt mit } 180^\circ \text{ Phasenverschiebung,}$$

in der Y_2 -Wicklung

$$E_{y_2}' = \sqrt{2} \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{a} f w_{y_2} \Phi_{y_{20}} \text{ Volt mit } 90^\circ \text{ nacheilender Phasenverschiebung,}$$

$$E_{y_2}'' = v \sqrt{2} \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{a} f w_{y_2} \Phi_{x_{20}} \text{ Volt mit } 0^\circ \text{ Phasenverschiebung.}$$

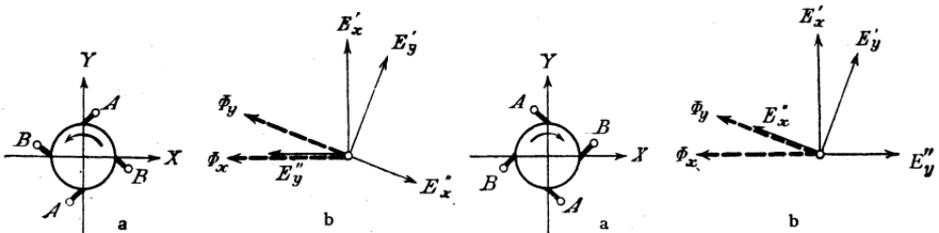


Fig. 273 u. 274. Vektordiagramm der EMKe der Kommutatorwicklung bei positiver Drehungsrichtung.

Die Diagramme beziehen sich immer nur auf den zeitlichen Verlauf der periodisch veränderlichen Größen und haben mit ihren Richtungen im Raume nichts zu tun.

Bei negativer Drehungsrichtung des Ankers, Abb. 274 a und b, bleiben E_{x_2}' und E_{y_2}' unverändert, E_{x_2}'' und E_{y_2}'' kehren ihre Vorzeichen um.

Index 1 bezieht sich immer auf den Ständer, Index 2 auf den Läufer. w_{x_2} und w_{y_2} sind die Gesamtwindungszahlen der X_2 - und Y_2 -Wicklung, $\Phi_{x_{20}}$ und $\Phi_{y_{20}}$ sind die Amplituden der Induktionsflüsse eines Poles; $2a$ ist die Zahl der parallelarbeitenden Wicklungszweige, f die Frequenz, v das Verhältnis der wahren zur synchronen Geschwindigkeit. $v = 1$ entspricht also dem Synchronismus.

Wenn die magnetischen Felder im Luftspalt nicht sinusförmig verteilt sind, treten statt der Koeffizienten $\sqrt{2}$ andere von mitunter erheblich davon abweichenden Werten auf.

Da die Richtungen von Φ_x und Φ_y fest liegen, können in ruhenden Wicklungen immer nur EMKe der Ruhe E' auftreten. Der Kurzschluß einer solchen Wicklung bedeutet bei normaler Frequenz, daß der zugehörige Induktionsfluß verschwindend gering ist, weil sonst so starke Ströme entstehen würden, daß die Wicklung Schaden litte. Dagegen kann durch eine umlaufende Wicklung auch bei Kurzschluß ein starker Induktionsfluß hindurchgehen, weil die beiden von verschiedenen einander kreuzenden Induktionsflüssen herrührenden EMKe E' und E'' eine Resultierende von ganz geringer Größe ergeben können, wie z. B. im Kurzschlußläufer der Induktionsmotoren.

(550) Drehmomente. Die Y_2 -Wicklung erleidet im X_2 -Felde ein Drehmoment M_1 , die X_2 -Wicklung im Y_2 -Felde ein Drehmoment M_2 . Die Drehmomente sind periodische Funktionen der Zeit mit doppelt so großer Frequenz wie die des magnetischen Feldes. Der Mittelwert der Drehmomente ist dem Ausdruck $\Phi_2 I_2 \cos(\Phi_2 I_2)$ proportional und daher am größten, wenn keine Phasenverschiebung zwischen Φ_2 und I_2 vorhanden ist, und gleich Null, wenn sie 90° beträgt. Der Mittelwert von Drehmomenten, die von Φ und I von verschiedenen Frequenzen herrühren, z. B. von Oberschwingungen verschiedener Frequenzen, ist gleich Null. Bei sinusartiger Verteilung des magnetischen Feldes im Luftspalt erhält man entsprechend Gl. (8) in (407)

$$M_1 = - \frac{\sqrt{2} \cdot 10^{-8}}{2\pi \cdot 9,81} \cdot \frac{p}{a} w_{y2} I_{y2} \Phi_{x20} \cos(\Phi_{x20}, I_{y2}) \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$M_2 = + \frac{\sqrt{2} \cdot 10^{-8}}{2\pi \cdot 9,81} \cdot \frac{p}{a} w_{x2} I_{x2} \Phi_{y20} \cos(\Phi_{y20}, I_{x2}) \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Hierin ist p die Polpaarzahl, I_{x2} und I_{y2} bedeuten die Effektivwerte der Gesamtströme in A .

Das Drehmoment des Gleichstrommotors war nach Gl. (4) in (419)

$$M_{gt} = \frac{1}{\pi} \frac{10^{-8}}{9,81} \cdot \frac{p}{a} w_{ge} I_a \Phi_a \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Bei den Mehrphasenmotoren ist das resultierende Drehmoment meistens gleich $\sqrt{M_1^2 + M_2^2}$ und daher bei gleichem Maximum von Φ ebenso groß wie bei Gleichstrom. Bei den Einphasenmotoren tritt aber nur eines der Drehmomente auf, sie sind daher gegenüber den Gleichstrommotoren im Nachteil. Das Verhältnis ist dann nämlich $(\sqrt{2}/2\pi) : (1/\pi) = 0,707$, eine Zahl, die durch geschickte Anordnung noch erhöht, aber nicht bis auf 1 gebracht werden kann.

Die Augenblickswerte der Drehmomente bestehen aus einem konstantem Glied, nämlich M_1 und M_2 und einer darüber gelagerten Schwingung mit der Frequenz $2f$.

(551) Arbeits- und Erregerwicklungen. (Atkinson Proceed. Inst. Civil Eng. London 1898, S. 113. — Eichberg, ETZ 1904, S. 75.) Zwischen zwei gleichachsigen Wicklungen kann bei völliger Symmetrie kein Drehmoment auftreten, solche Wicklungen bilden vielmehr, auch wenn sie an dasselbe Netz angeschlossen sind, zusammen einen Transformator. Es wird also Leistung von der einen Wicklung aufgenommen (bei Anschluß an dasselbe Netz von der Wicklung mit der geringeren Windungszahl) und Leistung von der anderen abgegeben (von der Wicklung mit der größeren Windungszahl). Ist aber eine der Wicklungen beweglich, so kann man sie durch eine dritte Wicklung, die rechtwinklig mit ihr gekreuzt ist, zum Laufen bringen. Die ersten beiden Wicklungen sind Arbeitswicklungen, die dritte ist die Erregerwicklung. Die Felder der Arbeitswicklungen sind gegeneinander gerichtet und heben einander wie im Transformator bis auf

einen geringen Rest auf, der für die Magnetisierung hinreicht. Sie bestehen z. B. aus der Kommutatorwicklung auf dem Läufer und der Kompensationswicklung auf dem Ständer, sie können aber auch indirekt durch Transformatoren parallel ans Netz angeschlossen sein, oder es kann eine von ihnen kurzgeschlossen sein. Die Phasenverschiebung der Ströme in ihnen gegen die zugehörigen Spannungen ist bei Belastung gering und kann völlig verschwinden. Die Erregerwicklung dagegen verhält sich wie eine Drosselspule, die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung in ihrem Stromkreis ist daher sehr bedeutend. Damit ein möglichst großes Drehmoment entsteht, muß das Feld der Erregerspule gleiche Phase mit dem Strom in der umlaufenden Arbeitswicklung haben. Arbeitsspannung und Erregerspannung müssen daher im allgemeinen Phasenverschiebungen gegeneinander besitzen, deren Größe von der Geschwindigkeit und der Belastung des Motors abhängt. Während die Sekundärwicklung eines Transformators elektrische Leistung an einen äußeren Kreis abgibt, besteht hier die von der sekundären Arbeitswicklung abgegebene Leistung teils in elektrischer Form und kann ans Netz zurückgeliefert werden, teils in mechanischer Form. Der letzte Teil ist der Geschwindigkeit proportional, weil durch die Rotation in dem Felde der Erregerspule eine EMK der Bewegung entsteht, die der Geschwindigkeit proportional ist. Sorgt man dafür, daß der übrig bleibende Teil der bei Stillstand auftretenden EMK, der nun als Spannung an den Bürsten auftritt, auf das Netz zurückarbeitet, indem die Bürsten über einen Transformator mit dem Netz verbunden werden, so kann man je nach der an die Bürsten angelegten Spannung den Motor ohne besondere Verluste mit jeder beliebigen Geschwindigkeit laufen lassen. Dieser Gedankengang läßt sich auf Mehrphasenstrom übertragen, indem man das System der drei Wicklungen um 90° verdreht noch einmal anordnet. Es können dann auch die Erregerwicklungen, deren Achse ja mit der der Arbeitswicklungen des anderen Systems zusammenfällt, gespart werden. Die Arbeitswicklungen führen dann auch die Erregerströme. Von den Arbeitswicklungen muß die eine immer auf dem Ständer, die andere auf dem Läufer liegen, die Erregerwicklung kann sich entweder auf dem Ständer oder auf dem Läufer befinden.

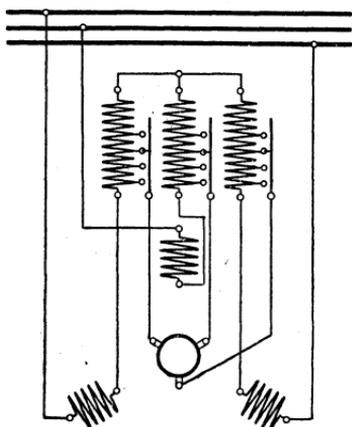


Abb. 275. Reihenschlußschaltung mit Transformator.

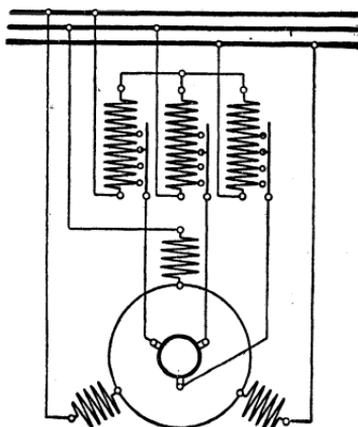


Abb. 276. Nebenschlußschaltung mit Transformator.

Drehstromkommutatormotoren.

(552) **Kommutatormotoren für Drehstrom.** Abb. 275 zeigt die Reihenschlußschaltung, Abb. 276 die Nebenschlußschaltung unter Vermittelung von Transformatoren in Sparschaltung. Letztere ist von Winter und Eichberg (Z. f. El. u.

Maschb. 1903, S. 213) zum Zwecke der Geschwindigkeitsregulierung vorgeschlagen worden. Man kann auch eine Doppelschlußschaltung anwenden. Der Reihen-schlußmotor wird durch Bürstenverschiebung in Gang gesetzt und reguliert. Es gibt zwei ausgezeichnete Bürstenstellungen. In der einen fallen die Achsen der im gleichen Sinne umlaufenden magnetischen Felder in dieselbe Richtung — Leerstellung, der Motor verhält sich wie eine Drosselspule —, in der anderen sind sie einander genau entgegengesetzt gerichtet — Kurzschlußstellung, die magnetischen Felder heben sich bis auf ihre Differenz auf. In beiden Stellungen entwickelt sich kein Drehmoment. Verschiebt man die Bürsten aus der Leerstellung in einer beliebigen Richtung, so läuft der Motor in der entgegengesetzten Richtung an. Er kann also mit oder auch gegen sein Drehfeld laufen, im letzteren Falle allerdings unter ungünstigen Verhältnissen (geringer $\cos \varphi$). Der Motor ist für Förderanlagen mittlerer Größe verwendet worden, neuerdings hat er für den Antrieb von Spinnereimaschinen große Bedeutung gewonnen. Er kann auch zur Kompensation des Blindstromes von Induktionsmotoren verwendet werden, vgl. (541). Bei direkter Schaltung fließt in der Läuferwicklung, da sie in Dreieck geschaltet ist, nur das $1/\sqrt{3}$ -fache des Stromes der Ständerwicklung. Da ferner die Ströme in den beiden Lagen der Ankerwicklung überall 60° Phasenverschiebung haben, ist der Strombelag nur das $1/2\sqrt{3}$ -fache des Strombelages, den er bei gleicher Phase der Ströme haben würde. Mithin muß der Läufer bei gleicher Stärke des zugeführten Stromes und bei gleicher Durchflutung eine doppelt so große Zahl Windungen wie der Ständer besitzen. Abb. 318.

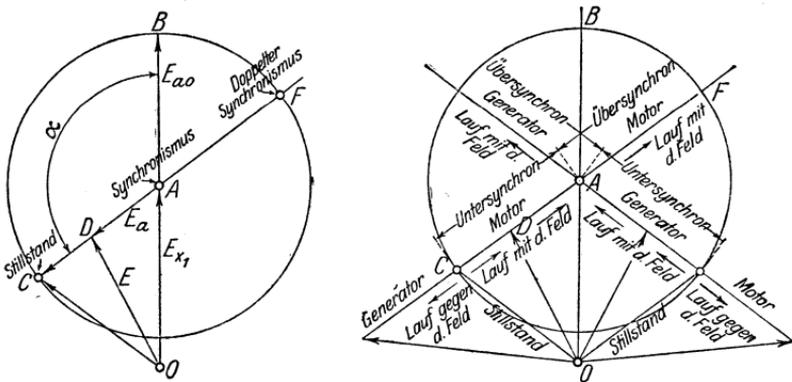


Abb. 277 a und b. Diagramme des Drehstromreihenschlußmotors.

(553) Diagramm des Drehstrom-Reihenschlußmotors. Abb. 277a u. b. Wir denken uns die Wicklungen durch Zweiphasenwicklungen ersetzt. Auf dem Ständer befinde sich eine X_1 - und eine Y_1 -Wicklung, auf dem Läufer drehbare A - und B -Wicklungen. Die X_1 - und die A -Wicklung seien in Reihe geschaltet, die in ihnen induzierten EMKe seien E_{x_1} und E_a . In der Leerstellung fallen beide in dieselbe Richtung OAB . Verdrehen wir die Bürsten bei zweipoliger Anordnung aus dieser Stellung um den Winkel α (allgemein um α°/p) im negativen Sinne, so daß der Motor ebenso wie das Feld im positiven Sinne umläuft, so schwenkt der E_a -Vektor um den Winkel α im positiven Sinne herum in die Lage AC und die resultierende EMK ist gleich OC . Beginnt nun der Motor zu laufen, so wird E_a kleiner, verschwindet bei Synchronismus und wird bei Übersynchronismus negativ. Der Endpunkt D der resultierenden EMK E wandert also auf einer Geraden

von C nach A , fällt bei Synchronismus mit A zusammen und bei Übersynchronismus in die Verlängerung von CA über A hinaus. Ist α ein spitzer oder auch ein rechter Winkel, so wird dabei OD zunächst kleiner, bei konstanter Spannung also der Strom und damit das Drehmoment größer. Der Motor ist daher bis zu einer gewissen Geschwindigkeit instabil, d. h. wenn er einmal in Bewegung gekommen ist, wächst das Drehmoment mit der Geschwindigkeit. Ist $\alpha = 90^\circ$, so wird der kleinste Wert der EMK bei Synchronismus erreicht. Um ein großes Drehmoment zu erzielen, muß man α stumpf und zwar nahezu gleich 180° wählen. Auch dann kann der Motor bei geringen Geschwindigkeiten instabil sein, wenn E_a groß im Vergleich mit E_{x1} ist. Schenkkel (Siemens-Schuckertwerke) benutzt daher Doppelbürsten, von denen der eine Satz fest steht, der andere verstellbar ist. In der Leerstellung haben die zusammengehörigen Bürsten beider Sätze dieselbe Stellung. Man hat daher bei kleinen Winkeln α auch nur wenige Windungen in der A -Wicklung und der Motor wird dadurch bei allen Bürstenstellungen stabil. Hält man die Klemmenspannung konstant, so bleibt annähernd $E = OD$ konstant und Punkt A bewegt sich dann auf einem Kreise, der durch die Punkte O und D geht (Rüdenberg, ETZ 1910, S. 1181). Bei großer Geschwindigkeit kann der Motor $\cos\varphi = 1$ erreichen (Görge, ETZ 1891, S. 699). Wenn der Motor gegen das Drehfeld läuft, ist er immer stabil, $\cos\varphi$ ist dann aber sehr gering. Der Motor kann auch als Generator laufen, auch dann muß α ein stumpfer Winkel sein. Abb. 277b gibt näheren Aufschluß über das Verhalten des Motors. Der Motor hat ausgesprochenen Reihenschlußcharakter. Das Drehmoment hängt nur von der Stromstärke und der Bürstenverstellung ab, durch die die Geschwindigkeit reguliert wird. Die Geschwindigkeit nimmt mit wachsender Belastung ab.

Der Drehstrom-Kommutatormotor in Nebenschlußschaltung ist nichts anderes als der regulierbare Induktionsmotor (555).

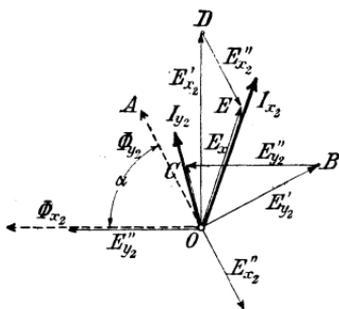


Abb. 278. Vektordiagramm des allgemeinen Induktionsmotors.

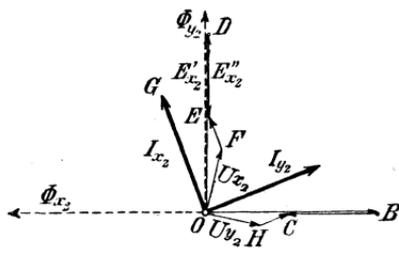


Abb. 279. Vektordiagramm des Mehrphasenmotors mit Reguliertransformator.

(554) **Der allgemeine Induktionsmotor.** Wir nehmen an, die X -Bürsten und die Y -Bürsten seien kurz geschlossen, Φ_{x2} und Φ_{y2} hätten beliebige Größen und die beliebige Phasenverschiebung α gegeneinander, Abb. 278. E_{x2}' und E_{y2}' stehen um 90° nacheinander verschoben senkrecht auf Φ_{x2} und Φ_{y2} . Bei Stillstand denke man sich induktionsfreie Anlaufwiderstände in die Läuferwicklungen geschaltet. Die Läuferströme I_{x2} und I_{y2} haben dann dieselben Phasen wie E_{x2}' und E_{y2}' . Die Drehmomente $(\Phi_{x2} I_{y2})$ und $(\Phi_{y2} I_{x2})$ sind nach (550) beide positiv, wenn Winkel $(\Phi_{x2} I_{y2})$ ein stumpfer, Winkel $(\Phi_{y2} I_{x2})$ ein spitzer ist. Wir legen nun positiven Drehungssinn zugrunde. Man kann daher jetzt E_{x2}'' und E_{y2}'' nach (549) und die resultierenden EMKE $E_{x2} = E_{x2}' + E_{x2}''$ und $E_{y2} = E_{y2}' + E_{y2}''$ zeichnen. Unter Zugrundelegung dieses Diagrammes findet man nun, wenn man

$$E_{x_2}' = \varepsilon \cdot f w_2 \Phi_{x_2} \qquad E_{x_2}'' = v \varepsilon \cdot f w_2 \Phi_{y_2}$$

$$E_{y_2}' = \varepsilon \cdot f w_2 \Phi_{y_2} \qquad E_{y_2}'' = v \varepsilon \cdot f w_2 \Phi_{x_2}$$

setzt, worin ε eine Konstante, R_2 den Widerstand einer Läuferwicklung bedeutet,

$$M = \frac{\varepsilon^2}{2\pi} \frac{w_2^2}{R_2} f [2 \Phi_{x_2} \Phi_{y_2} \sin \alpha - (\Phi_{x_2}^2 + \Phi_{y_2}^2) v]$$

$$N_{mech} = \varepsilon^2 \frac{w_2^2}{R_2} f^2 [2 \Phi_{x_2} \Phi_{y_2} \sin \alpha - (\Phi_{x_2}^2 + \Phi_{y_2}^2) v] v$$

$$N_{w_2} = \varepsilon^2 \frac{w_2^2}{R_2} f^2 [(\Phi_{x_2}^2 + \Phi_{y_2}^2) (1 + v^2) - 4 v \Phi_{x_2} \Phi_{y_2} \sin \alpha]$$

$$N_2 = \varepsilon^2 \frac{w_2^2}{R_2} f^2 [(\Phi_{x_2}^2 + \Phi_{y_2}^2) - 2 v \Phi_{x_2} \Phi_{y_2} \sin \alpha]$$

Unter N_{w_2} ist die Stromwärmeleistung im Läufer zu verstehen, $N_2 = N_{w_2} + N_{mech}$ ist die auf den Läufer übertragene Leistung. Der Ausdruck für M ist für Motorzähler wichtig. $(\Phi_{x_2}^2 + \Phi_{y_2}^2) v$ ist das Fehlerglied. Um es klein zu halten, muß v sehr klein gewählt werden.

Für Mehrphasenstrom ist $\Phi_{x_2} = \Phi_{y_2} = \Phi_2$ und $\alpha = 90^\circ$, also $\sin \alpha = 1$. Man erhält hiermit die (515) abgeleiteten Gleichungen wieder.

(555) Regulierbare Induktionsmotoren. Schließt man die Bürsten nicht kurz, sondern legt man nach Winter und Eichberg (vgl. Winter, El. und Maschb. 1903, S. 213) die gleichgroßen Spannungen U_{x_2} und U_{y_2} , die um 90° gegeneinander verschoben sind und dieselbe Frequenz wie der Primärkreis, an die Bürsten, indem man den Läufer über einen Reguliertransformator aus Netz schaltet, vgl. Abb. 276, so erhält man die mittelbare Nebenschlußschaltung. Abb. 279 zeigt das Diagramm im X_2 -Kreise. $E_{x_2}' = OD$ wird von Φ_{x_2} durch ruhende Induktion, $E_{x_2}'' = DE$ von Φ_{y_2} durch Rotation erzeugt und ist daher proportional mit v .

Soll der Motor dauernd mit dieser Geschwindigkeit laufen und dabei I_{x_2} die durch OG gegebene Größe und Phase haben, so muß zwischen den X -Bürsten die Spannung $U_{x_2} = OF$ liegen, wenn FE der Ohmsche Spannungsverlust ist. Die entsprechenden Vektoren des Y_2 -Kreises sind um 90° nach rechts gedreht. Durch die Lage von OF kann man I_{x_2} beliebig eine Voreilung oder Nacheilung gegenüber OE geben. Eine Drehung von U_{x_2} nach rechts läßt I_{x_2} voreilen und umgekehrt. Durch eine Voreilung von I_{x_2} kann man erreichen, daß der Leistungsfaktor im Primärkreise zu Eins wird. Dazu braucht man nur die Bürsten zu verschieben. Kehrt man U_{x_2} und U_{y_2} um, so daß F unterhalb O , H links von O liegt, so wird E_{x_2}'' größer als E_{x_2}' und E_{y_2}'' größer als E_{y_2}' , der Motor läuft also übersynchron; macht man $U_{x_2} = U_{y_2} = 0$, so läuft er in der Nähe des Synchronismus; bei $U_{x_2} = E_{x_2}'$ und $U_{y_2} = E_{y_2}'$ steht er still; wenn $U_{x_2} > E_{x_2}'$ und $U_{y_2} > E_{y_2}'$, so läuft er rückwärts. Statt der dem Diagramm zugrunde gelegten Zweiphasen- kann man ebensogut die Drehstromanordnung wählen.

Man kann diesen Motor so abändern (vgl. Schrage, ETZ 1914, S. 89), daß man die Netzströme über Schleifringe einer Drehstromwicklung auf dem Läufer zuführt, der außerdem eine Kommutatorwicklung besitzt (Abb. 280). Diese kann auch einen Teil der Drehstromwicklung bilden oder wie bei den Umformern völlig zu einer einzigen Wicklung mit ihr vereinigt sein. Die aus drei voneinander getrennten Teilen bestehende Ständerwicklung wird über je zwei

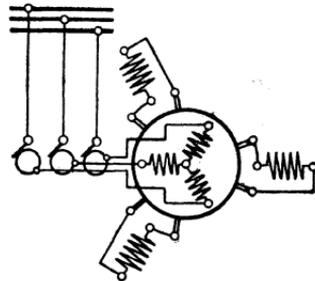


Abb. 280.

verschiebbare Doppelbürsten auf einen Teil der Kommutatorwicklung geschlossen. Bei konstanter Netzspannung ist das magnetische Feld im Läufer auch nahezu konstant, daher auch die in jeder Windung auf dem Läufer induzierte EMK. Die in einem zwischen zwei Bürstenliegenden Teil der Kommutatorwicklung induzierte EMK ist daher ebenfalls nahezu konstant, solange der Abstand der Bürsten voneinander nicht geändert wird, und zwar unabhängig von der Drehzahl des Läufers. Ist die Schaltung auf dem Läufer so getroffen, daß das Feld bei Stillstand in positivem Sinne umläuft — Drehzahl n_0 — und setzt man den Läufer mit der Drehzahl n in negativem Sinne in Bewegung, so läuft das Feld im Raume mit der Drehzahl $n_0 - n$ in positivem Sinne um. Die Frequenz der Spannung zwischen je zwei Bürsten ist daher

$$f_2 = p \frac{n_0 - n}{60}$$

Ebensogroß ist aber die Frequenz der durch das umlaufende Feld in der Ständerwicklung induzierten EMKe. Man kann daher die Ständerwicklung durch die Kommutatorwicklung schließen. Die Höhe der Spannung zwischen den Bürsten wird durch ihren Abstand voneinander, ihre Phase durch die Stellung der Bürsten bestimmt. Stehen sie nebeneinander, so ist die Ständerwicklung kurz geschlossen und der Motor läuft wie ein normaler Induktionsmotor mit voller Geschwindigkeit. Je weiter die Bürsten voneinander entfernt werden, um so geringer oder größer wird die Drehzahl des Motors, die im übrigen von der Belastung nahezu unabhängig ist. Man kann den Motor ebensogut übersynchron wie untersynchron laufen lassen, je nachdem man die Bürsten aus der Kurzschlußstellung in der einen oder anderen Richtung voneinander entfernt. Zur besseren Phasenkompensation kann man die Verschiebung der einen Bürste jedes Paares größer als die der anderen machen. Man spart bei dieser Anordnung den Reguliertransformator, außerdem ist die Kommutierung günstig, weil die Frequenz der Kommutatorströme bedeutend geringer ist, als die des Netzes. Gebaut wird der Motor von der Allmänna Svenska El. A. B. und den Siemens-Schuckertwerken.

(556) Regulierung großer Induktionsmotoren. Um große Induktionsmotoren (von z. B. 1000 kW) nicht mit Kommutator ausführen zu müssen, wenn man sie dauernd mit Schlüpfungen von 10—30% laufen lassen will, kann man nach Scherbius (Brown, Boveri & Cie.) mit dem aus dem Läuferkreise genommenen Drehstrom, der eine der Schlüpfungen proportionale Frequenz besitzt, einen Motor wie eben beschrieben treiben, indem man den Ständer direkt an die Schleifringe des ersten Motors, den Läufer über einen Reguliertransformator an sie anschließt. Man kann nun dem zweiten Motor eine solche Geschwindigkeit geben, daß eine dritte mit ihm direkt gekuppelte asynchrone oder synchrone Drehstrommaschine als Generator auf das Primärnetz zurückerarbeiten kann. Man spart dadurch den größten Teil der Leistung, die bei einem durch Widerstände regulierten Induktionsmotor in den Widerständen verloren geht, wodurch sich die zusätzliche Anlage bald bezahlt macht. Wird der Generator vom Netz abgekuppelt, so geht der Kommutatormotor durch; hiergegen müssen Vorkehrungen vorgesehen werden. Weitere solche Schaltungen siehe Meyer, Die Verwendung verlustlos regelbarer Drehstrommotoren, El. K. u. B. 1911, S. 421. — Nehlsen, ETZ 1917, S. 584.

(557) Der Phasenschieber¹⁾ dient zur Kompensation der Phasenverschiebung großer Induktionsmotoren und besteht im einfachsten Falle nur aus einem in einem Ständer ohne Wicklung umlaufenden Kommutatoranker, dem durch Bürsten Mehrphasenstrom zugeführt wird, vgl. Abb. 338. Der Ständer pflegt an den Kommutierungsstellen Aussparungen mit oder ohne Wendepole zu besitzen und muß dann mittels Schnecke und Schneckenrad verdrehbar sein, wenn die Bürsten

¹⁾ Leblanc, Ecl. él. 1⁹⁹. — Osnos, ETZ 1902, S. 919. — Rüdberg, El. K. u. B. 1914, S. 425, 469. — Nehlsen, ETZ 1917, S. 584. — Kozisek, ETZ 1920, S. 52, 327. — Scherbius, ETZ 1912, S. 1079, ETZ 1921, S. 969.

verstellbar sein sollen. Der äußere Ring kann auch ohne Luftschlitz mit dem Läufer verbunden sein und muß dann mit umlaufen. Der dem Kommutator zugeführte Mehrphasenstrom erzeugt ein Drehfeld, dessen Umlaufgeschwindigkeit im Raume durch die Frequenz des Stromes festgelegt ist, unabhängig von der Umlaufgeschwindigkeit des Läufers. Wird der Phasenschieber an die Schleifringe eines Induktionsmotors angeschlossen, so entsteht in ihm ein Drehfeld, dessen Geschwindigkeit der Schlüpfung des Induktionsmotors proportional ist. In der X_2 -Wicklung tritt daher eine EMK ε'_{x_2} auf, die dem Induktionsfluß φ_{x_2} um 90° und daher dem φ_{x_2} erregenden Strome I_{x_2} um etwas mehr als 90° nacheilt, Abb. 281, und eine EMK ε_{x_2}'' , die φ_{y_2} , also auch ε_{x_2}' entgegengesetzt gerichtet

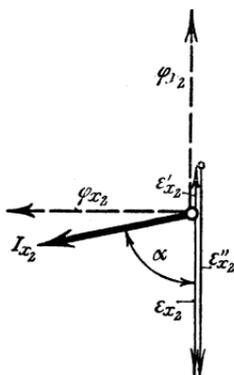


Abb. 281. Diagramm des Phasenschiebers.

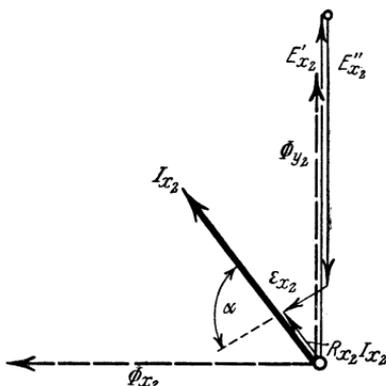


Abb. 282. Diagramm des Motors.

ist. Wenn die Schlüpfung des Motors mäßig groß ist, kann man den Phasenschieber bei hoher Geschwindigkeit weit übersynchron laufen lassen. ε_{x_2}'' ist dann bedeutend größer als ε_{x_2}' und die resultierende EMK ε_{x_2} eilt dann dem Strome I_{x_2} um einen Winkel α voraus, der nahezu gleich 90° ist. Der Phasenschieber verhält sich dann also wie ein Kondensator. Soll nun im Diagramm des Motors, Abb. 282, I_{x_2} in den linken oberen Quadranten fallen, damit die Phasenverschiebung im Primärkreis zum Verschwinden komme, so braucht man nur ε_{x_2} durch Einstellung der Geschwindigkeit des Phasenschiebers eine geeignete Größe zu geben, um

$$R_{x_2} I_{x_2} = E_{x_2}' \hat{+} E_{x_2}'' \hat{+} \varepsilon_{x_2}$$

die gewünschte Voreilung zu geben. R_{x_2} ist dabei der Widerstand im ganzen X_2 -Kreise des Motors und des Phasenschiebers. Da für das Drehmoment nur die Wirkkomponente von I_{x_2} , d. h. die Projektion auf φ_{y_2} in Frage kommt, so ist bei Phasenkompensation der Strom im Läuferkreis größer, dafür aber der Strom im Ständerkreis schwächer, ebenso die Schlüpfung etwas größer als bei dem nicht kompensierten Motor. (ε_{x_2} entspricht $-U_{x_2}$ in Abb. 279.)

Im Phasenschieber tritt, da der Ständer keine Wicklung besitzt, nur ein den Verlusten entsprechendes Drehmoment auf. Er muß daher durch einen kleinen Motor angetrieben werden.

Da der Strom I_{x_2} , von dem der φ_{x_2} -Fluß des Phasenschiebers allein abhängt, mit der Belastung des Motors wächst, die Voreilung von I_{x_2} aber bei schwacher Belastung größer als bei Vollbelastung sein muß, reicht die Kompensierung bei schwacher Belastung nicht hin, wenn sie auf volle Belastung richtig eingestellt ist.

Phasenschieber mit Netzerregung. Man kann diesem Überstande dadurch abhelfen, daß man den Phasenschieber mit Schleifringen

versieht, die mit festen Punkten der Wicklung verbunden sind, und die Schleifringe über einen Reguliertransformator an das den Motor speisende Netz anschließt. Die Höhe der Spannung zwischen den Schleifringen bestimmt dann die Größe von φ_{x_2} und φ_{y_2} , die bei allen Belastungen des Motors annähernd konstant bleiben soll. Um nun die Kommutatorbürsten des Phasenschiebers mit den Schleifringen des Motors verbinden zu können, muß die Frequenz der Spannungen zwischen den Kommutatorbürsten gleich der Schlupffrequenz $f_0 = \sigma \cdot f$ des Motors sein. Daraus folgt, daß die Drehzahl des Drehfeldes des Phasenschiebers gleich $60 \sigma f / p_2$ sein muß. Bei Stillstand des Phasenschiebers ist aber die Drehzahl des Drehfeldes gleich $60 f / p_2$. Der Phasenschieber muß daher mit einer Drehzahl n_2 gegen sein Feld laufen, die sich aus

$$\frac{60 f}{p_2} - n_2 = \frac{60 \sigma f}{p_2}$$

zu

$$n_2 = \frac{60 f}{p_2} (1 - \sigma)$$

bestimmt. Andererseits ist die Drehzahl des Motors

$$n_1 = \frac{60 f}{p_1} (1 - \sigma)$$

Hierin ist p_1 die Polpaarzahl des Motors, p_2 die des Phasenschiebers.

Daraus folgt, daß

$$n_2 = \frac{p_1}{p_2} \cdot n_1$$

sein muß. Bei dieser Drehzahl können die Kommutatorbürsten des Phasenschiebers mit den Schleifringen des Motors, die Schleifringe des Phasenschiebers über einen Reguliertransformator, der die Netzspannung auf die richtige Höhe umsetzt, an das Netz angeschlossen werden. Da n_2 und n_1 einander proportional sind, müssen Phasenschieber und Motor synchron miteinander laufen. Der Phasenschieber wird daher entweder durch Zahnräder mit ihm gekuppelt oder von einem kleinen Induktionsmotor angetrieben, dessen Primäranker an das Netz und dessen Sekundäranker an die Schleifringe des Hauptmotors angeschlossen ist. Da die Drehzahl n sich mit der Belastung nur unbedeutend ändert, sind die Induktionsflüsse φ_{x_2} und φ_{y_2} im Phasenschieber im Wesentlichen konstant, während ihre Phasen durch Verstellung der Bürsten beliebig eingestellt werden können. ε_{x_2} und ε_{y_2} sind daher ebenfalls konstant und in der Phase einstellbar. Ist der Ständer mit Aussparungen versehen, so muß er gleichzeitig mit den Bürsten verstellt werden.

Soll das Drehmoment des Hauptmotors unverändert bleiben, so müssen die Ströme und die EMKe im Läufer größer werden, mithin auch die Schlüpfung. Diese wächst bei Kompensation des Leistungsfaktors auf 1 um etwa 30%. Dafür wird der Primärstrom schwächer und vor allem das Netz vom Blindstrom entlastet (Vgl. R ü d e n b e r g, ETZ 1913, S. 807. El. K. u. B. 1914, S. 425. — S c h e r b i u s, ETZ 1915, S. 299.)

(558) Kommutatormotoren für Einphasenstrom. Der Ständer besitze stets eine X-Wicklung. Wir können dann folgende Grundformen unterscheiden.

1. Der Läufer besitzt nur eine Y-Wicklung, Abb. 283a. Als Reihenschlußmotor mit Kompensationswicklung und mit Wendezähnen, Abb. 283b, hat er große Bedeutung gewonnen.

2. Der Läufer besitzt eine kurzgeschlossene X-Wicklung und eine an einen äußeren Kreis angeschlossene Y-Wicklung, Abb. 283c. Die beiden Wicklungen bestehen in Wirklichkeit nur in einer einzigen Kommutatorwicklung, die einerseits durch die X-Bürsten kurzgeschlossen ist, andererseits durch die Y-Bürsten

von außen Strom erhält. Bei Kurzschluß der X -Bürsten kann zwischen den Y -Bürsten eine erhebliche Spannung bestehen.

Die Nebenschlußschaltung, Abb. 283d, ist zuerst von Wightman (1892), die Reihenschlußschaltung, Abb. 283e, zuerst von Latour (1900) vorgeschlagen. Die mittelbare Reihenschlußschaltung, Abb. 283f, stammt von Winter und Eichberg und eignet sich besonders für die Geschwindigkeitsregulierung des

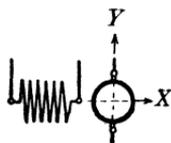


Abb. 283 a. Ständer- X - und Läufer- Y -Wicklung.

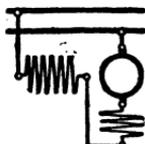


Abb. 283 b. Schaltung des Reihenschlußmotors mit Kompensationswicklung.

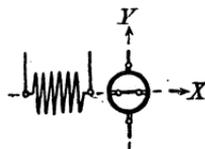


Abb. 283 c. Ständer- X -Läuferkurzschluß- X und Läufer- Y -Wicklung. X -Wicklungen sind Arbeits-, Y -Wicklung ist Erregerwicklung.

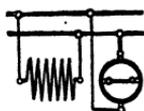


Abb. 283 d. Nebenschluß-Kurzschlußmotor (Wightman).

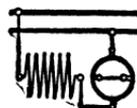


Abb. 283 e. Reihenschluß-Kurzschlußmotor (Latour).

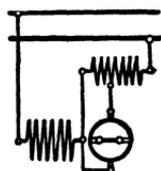


Abb. 283 f. Reihenschluß-Kurzschlußmotor mit Erregertransformator (Winter und Eichberg).

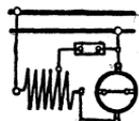


Abb. 283 g. Doppelschluß-Kurzschlußmotor (Osnos).

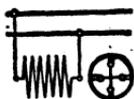


Abb. 283 h. Doppelkurzschlußmotor (Atkinson).

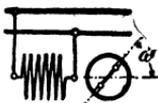


Abb. 283 i. Einfachkurzschlußmotor. (Repulsionsmotor.) (Elhu Thomson.)

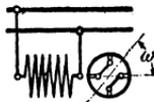


Abb. 283 k. Einfachkurzschlußmotor mit Doppelbürsten (Déri).

Motors, der im übrigen Reihenschlußcharakteristik besitzt, vgl. Abb. 287. Die mittelbare Nebenschlußschaltung ist von den Felten-Guilleaume-Lahmeyer-Werken mit Erfolg ausgeführt worden. Sie ergibt einen Motor von konstanter Geschwindigkeit, der aber nicht anläuft. Daher verwendete genannte Firma eine selbsttätige Umschaltung, indem sie den Motor in Reihenschlußschaltung anlaufen ließ. Sie sparte dabei den Transformator, indem sie die Ständerwicklung zugleich als die Wicklung eines einspaltigen Transformators benutzte, Abb. 283 g. Der Motor läuft bei geöffnetem Schalter an; wenn

die volle Geschwindigkeit erreicht ist, wird der Schalter selbsttätig durch Zentrifugalkraft geschlossen. Eine Regulierung der Geschwindigkeit ist bei dieser Schaltung unmöglich.

3. Der Läufer besitzt zwei kurzgeschlossene Wicklungen, die eine in der X -, die andere in der Y -Achse, Abb. 283 h. In Wirklichkeit ist wieder nur eine Kommutatorwicklung vorhanden, und es sind die X -Bürsten miteinander und ebenso die Y -Bürsten oder auch alle Bürsten miteinander kurzgeschlossen. Dieser von Atkinson (1898) vorgeschlagene Motor ist in seiner Wirkungsweise dem einphasigen Induktionsmotor gleichzustellen, er arbeitet jedoch weniger günstig als dieser. Hat er auf dem Ständer mehrphasige Wicklung, so ist sein Verhalten gleich dem des Mehrphasen-Induktionsmotors.

4. Der Läufer besitzt eine kurzgeschlossene Wicklung, die aber schräg zur X -Achse steht, Abb. 283 i. Die kurzgeschlossenen Bürsten sind verdrehbar angeordnet. Dieser von Elihu Thomson 1888 vorgeschlagene Motor ist von ihm Repulsionsmotor genannt worden. Erzeugt die Ständerwicklung ein X -Feld und stehen die Bürsten in der Y -Achse, Abb. 284 a, so fließt — abgesehen von den durch je eine Bürste kurzgeschlossenen Windungen — kein Strom im Läufer. Ein Drehmoment ist nicht vorhanden. Verdreht man die Bürsten aus dieser Stellung in einer beliebigen Richtung, so läuft der Motor in der entgegengesetzten Richtung an. Stellt man die Bürsten in die X -Achse, so ver-

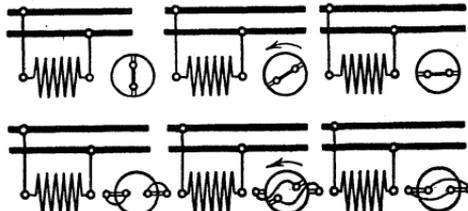


Abb. 284 a. Leerstellung. Abb. 284 b. Betriebsstellung. Abb. 284 c. Kurzschlußstellung des Repulsionsmotors (oben) und des Déri-Motors (unten).

schwindet das Drehmoment wieder, die beiden Wicklungen aber bilden jetzt einen kurzgeschlossenen Transformator, es fließen also in ihnen starke Ströme. Man unterscheidet danach Leerstellung, Betriebsstellung und Kurzschlußstellung.

Déri hat diesen Motor durch Anordnung zweier Bürstensätze verbessert (Abb. 283 k), indem er das eine Bürstenpaar in der X -Achse stehen läßt, das andere verdreht, Abb. 284 abc (Schnetzler, ETZ 1907, S. 818 u. 1097). Die in der Leerstellung neben einander stehenden Bürsten sind kurz mit einander verbunden. Die Achse der Läuferwicklung verstellt sich dann um den halben Betrag der Bürstenverstellung und die Stromwärme im Läufer ist geringer. Die Hauptvorteile dieser Anordnung sind die empfindlichere Bürsteneinstellung und das Verschwinden der Ströme in den durch die Bürsten kurzgeschlossenen Windungen in der Leerstellung, ein Nachteil liegt in der doppelten Anzahl Bürsten. Der Repulsionsmotor hat Reihenschlußcharakter und entwickelt sein größtes Moment bei etwa $80-82^\circ$ Verdrehung der Läuferachse aus der Leerstellung, also bei 10 bis 8° Verdrehung, Winkel ω , Abb. 283 j und k aus der Kurzschlußstellung. Er wird viel zum Antrieb von Spinnereimaschinen und Aufzügen verwendet.

(559) Diagramm des Einphasen-Induktionsmotors. (Görges, ETZ 1903, S. 271. — Sumec, Z. f. El. 1903, S. 517.) Infolge der Rotation des Ankers im X -Felde entwickelt sich ein Querfeld $\Phi_{y_2} = OA$, Abb. 285, das durch den Strom I_{y_2} erzeugt wird. In der kurzgeschlossenen Y_2 -Wicklung müssen die beiden EMKE $E_{y_2}' = OB$ und $E_{y_2}'' = BC$ nahezu gleich groß und einander entgegengesetzt gerichtet sein. Es ist nämlich

$$OC = I_{y_2} R_2 = E_{y_2}' + E_{y_2}'' \quad (1)$$

Die Phase von $I_{y_2} R_2$ ergibt sich daraus, daß I_{y_2} eine geringe Voreilung vor Φ_{y_2} haben muß. Φ_{x_2} hat bei positiver Drehrichtung gleiche Phase mit $BC = E_{y_2}''$. Da auch die X_2 -Wicklung kurz geschlossen ist, so ist ebenso

$$I_{x_2} R_2 = E_{x_2}' \hat{+} E_{x_2}'' \quad (2)$$

Bei positiver Drehrichtung ist $E_{x_2}'' = DE$ parallel mit Φ_{y_2} , aber entgegengesetzt gerichtet, während $E_{x_2}' = OD$ Verdrehung im Sinne des Uhrzeigers gegen Φ_{x_2} besitzen muß. Dadurch ist die Phase von $OE = I_{x_2} R_2$ und von I_{x_2} festgelegt. Die Vektoren der Induktionsflüsse Φ_{x_2} , Φ_{x_1} und Φ_{x_1} , sowie die von I_1 und U_1 der Ständerwicklung können nun nach (334) konstruiert werden.

Nimmt man an, daß I_{y_2} und Φ_{y_2} gleiche Phasen haben, so ist

$$E_{y_2}' = E_{y_2}'' \sin \alpha \quad (3)$$

und daraus folgt, da

$$E_{y_2}' = c \Phi_{y_2} \quad \text{und} \quad E_{y_2}'' = v c \Phi_{x_2} \quad (4)$$

$$\Phi_{y_2} = v \Phi_{x_2} \sin \alpha \quad (5)$$

$\sin \alpha$ ist nahezu gleich Eins. Der Querfluß Φ_{y_2} ist daher der Geschwindigkeit proportional und bei Synchronismus nahezu gleich Φ_{x_2} .

Im allgemeinen sind zwei Drehmomente vorhanden, ein großes positives ($\Phi_{y_2} I_{x_2}$) und ein kleines negatives ($\Phi_{x_2} I_{y_2}$). Nun ist

$$E_{x_2}' = c \Phi_{x_2} \quad \text{und} \quad E_{x_2}'' = v c \Phi_{y_2}, \quad (6)$$

oder mit (5)

$$E_{x_2}'' = v^2 c \Phi_{x_2} \sin \alpha = v^2 E_{x_2}' \sin \alpha. \quad (7)$$

Bei Synchronismus ist $v = 1$, also

$$E_{x_2}'' = E_{x_2}' \sin \alpha. \quad (8)$$

Der Vektor I_{x_2} fällt dann in die Richtung von OB . In diesem Falle bleibt nur das kleine negative Drehmoment ($\Phi_{x_2} I_{y_2}$) bestehen. Mit wachsender Schlüpfung wird E_{x_2}'' proportional mit v^2 kleiner, infolgedessen wächst I_{x_2} , während der Winkel β kleiner wird. Das positive, vom Querfluß Φ_{y_2} erzeugte Drehmoment wächst daher schnell bis zu einem Maximum, das eintreten muß, weil zugleich Φ_{y_2} mit v abnimmt. Von da an nimmt das Drehmoment bis zum Werte Null ab, der bei Stillstand erreicht wird. Der Widerstand im Läufer muß möglichst gering sein, damit sich ein starker Querfluß ausbilden kann.

Mit Vergrößerung des Widerstandes sinkt das Drehmoment schnell, eine Regulierung der Drehzahl durch Einschaltung von Widerständen in den Sekundäranker, wie bei Mehrphasenstrom, ist daher unmöglich. Bei Übersynchronismus läuft der Motor als Generator. Die Ankerstromwärme ist prozentual bei normalem Betriebe etwa gleich der doppelten Schlüpfung und geht bei Synchronismus durch ein Minimum. Die Leistung ist etwa 60—70% von der eines gleich großen Drehstrommotors, der Wirkungsgrad einige Prozent geringer. Sumec hat aus diesem Diagramm ein Kreisdiagramm abgeleitet.

Setzt man in den Gleichungen (554) $\sin \alpha = 1$ und $\Phi_{y_2} = v \Phi_{x_2}$, so erhält man

$$M = \frac{\varepsilon^2 w_2^2}{2\pi R_2} f \Phi_{x_2}^2 (1 - v^2) v$$

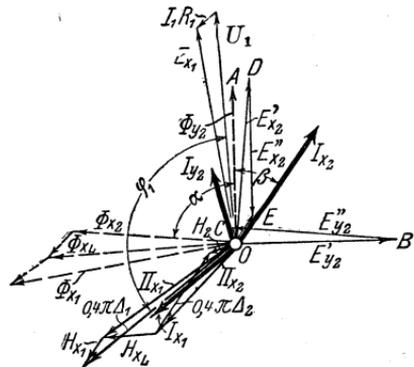


Abb. 285. Vektordiagramm des Einphaseninduktionsmotors.

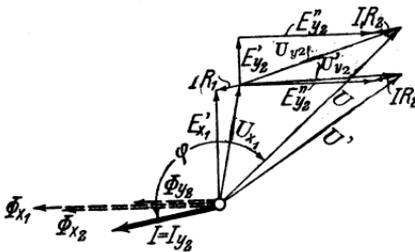
$$N_{w_2} = \varepsilon^2 \frac{\omega_2^2}{R_2} f^2 \Phi_{x_2}^2 (1 - v^2)^2$$

$$N_{mech} = \varepsilon^2 \frac{\omega_2^2}{R_2} f^2 \Phi_{x_2}^2 (1 - v^2) v^2$$

$$N_2 = \varepsilon^2 \frac{\omega_2^2}{R_2} f^2 \Phi_{x_2}^2 (1 - v^2)$$

Hieraus folgt $N_{w_2}/N_2 = (1 - v^2) = (1 + v)(1 - v)$ oder, wenn v nahezu gleich 1, $N_{w_2}/N_2 \approx 2(1 - v)$, d. h. die Stromwärme im Läufer ist prozentual gleich der doppelten Schlüpfung, also doppelt so groß wie beim Mehrphasenmotor.

(560) Diagramm des Reihenschlußmotors¹⁾. (Abb. 286). Der Strom I erzeugt in der X -Richtung die Induktionsflüsse Φ_{x_1} im Ständer und Φ_{x_2} im Läufer, die um den Streufluß voneinander verschieden sind; ferner in der Y -Richtung Φ_{y_2} im Läufer. Diese Flüsse haben alle dieselbe Phase wie I , wenn man von der Hysteresse und den Wirbelströmen im Eisen, sowie von der Wirkung der Kurzschlußströme in der Kommutierungszone absieht. Diese haben zur Folge, daß I eine Voreilung vor Φ_{x_1} , Φ_{x_2} und Φ_{y_2} erhält. Das Drehmoment $(I_{y_2}, \Phi_{x_2}) = (I, \Phi_{x_2})$ ist bei Stillstand bedeutend, da beide Vektoren dieselbe Richtung haben, und nach (550)



negativ. Der Motor läuft daher im Sinne des Uhrzeigers mit großer Kraft an. Φ_{x_1} erzeugt im Ständer die EMK E_{x_1}' mit 90° Phasenverschiebung gegen Φ_{x_1} , Φ_{x_2} im Läufer E_{y_2}'' mit 180° Phasenverschiebung gegen Φ_{x_2} , Φ_{y_2} im Läufer E_{y_2}' mit 90° Phasenverschiebung gegen Φ_{y_2} . Die Vektordifferenz $E_{x_1}' \hat{=} IR_1$, ist gleich der Klemmenspannung U_{x_1} des Ständers, die Vektorsumme

Abb. 286. Vektordiagramm des Reihenschlußmotors.

$$E_{y_2}' \hat{+} E_{y_2}'' \hat{=} IR_2$$

gleich der Klemmenspannung U_{y_2} des Läufers. Die Vektorsumme $U_{x_1} \hat{+} U_{y_2}$ ist gleich U . Durch eine Kompensationswicklung, die vom Strome I gespeist wird, kann man Φ_{y_2} aufheben und zugleich auch ein geeignetes kommutierendes Feld schaffen. Die Klemmenspannung sinkt dann von U auf U' und die Phasenverschiebung von φ auf φ' . Die Kompensationswicklung kann auch kurz geschlossen werden, sie ist dann aber nicht so wirksam. Zur Verbesserung der Kommutierung werden gewöhnlich noch Wendezähne angebracht. Die Anordnung entspricht dann ungefähr der Abb. 190 (393).

Zur Erzielung eines großen Leistungsfaktors ist es nötig, daß $E_{x_1}' \hat{+} E_{y_2}'$ klein, E_{y_2}'' dagegen möglichst groß sei. Die Frequenz ist daher gering (15 bis 25 Per/s), die Geschwindigkeit groß zu wählen. Der Motor wird daher zweckmäßig mit so viel Polen gebaut, daß er mit mehr als dem Doppelten der synchronen Geschwindigkeit läuft. Dies ergibt dünne Joche, daher geringes Gewicht und bei gegebenem Raum größeren Ankerdurchmesser, also erhöhte Leistung.

Das Drehmoment ist wie beim Gleichstrom nur von der Stromstärke abhängig und nimmt bei konstanter Spannung mit zunehmender Drehzahl ab, jedoch wegen der Blindkomponenten der EMK nicht in so starkem Maße wie bei Gleichstrom. Umgekehrt ändert sich die Geschwindigkeit mit dem Drehmoment in noch stärkerem Maße als beim Gleichstrommotor.

Mit Rücksicht auf gute Kommutierung wird der Motor nur für Spannungen bis etwa 300, bei den größten Leistungen bis 500 V gebaut, Abb. 316 und 319.

¹⁾ Heubach, Der Wechselstrom-Serienmotor. Voitsche Samml. 1903.

(561) Verhalten des Motors von Latour, Winter u. Eichberg. Im einfachsten Falle ist der die Ständerwicklung durchfließende Strom I zugleich der Strom I_{y_2} in der Y -Wicklung des Läufers, Abb. 283e. Er erzeugt einen Induktionsfluß in der Y -Achse, den Hauptfluß, während die kurzgeschlossene X_2 -Wicklung nur schwache Induktionsflüsse Φ_{x_1} und Φ_{x_2} aufkommen läßt.

Bei Stillstand kann der Y -Fluß nicht induktiv auf die X -Wicklungen wirken, weil die Achsen des Induktionsflusses Φ_{y_2} und der X -Wicklungen senkrecht aufeinander stehen. Die X -Wicklungen bilden einen kurzgeschlossenen Transformator, dessen Diagramm nach (334) gezeichnet werden kann. Es ergeben sich dann zwei negative Drehmomente, ein geringes und ein großes. Der Motor läuft daher mit großer Kraft im Sinne der Uhrzeigerdrehung an. Φ_{x_2} ist sehr klein, da die von ihm erzeugte EMK, vgl. (549), $a=1$ gesetzt,

$$E_{x_2}' = \sqrt{2} \cdot f w_2 \Phi_{x_2} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

nur den Spannungsverlust $I_{x_2} R_2$ zu decken hat. Φ_{x_1} unterscheidet sich nur um die Streuung von Φ_{x_2} , demnach ist die Spannung an der Ständerwicklung gering. Die Y -Wicklung des Läufers erzeugt einen starken Induktionsfluß und wirkt wie eine Drosselspule. In ihr tritt daher eine große EMK auf. Die Phasenverschiebung ist bedeutend.

Wenn der Motor läuft, tritt in der kurzgeschlossenen X_2 -Wicklung noch eine EMK

$$E_{x_2}'' = v \cdot \sqrt{2} \cdot f w_2 \Phi_{y_2} \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

auf. Diese muß, da die resultierende EMK wieder nur $I_{x_2} R_2$ zu decken hat, nahezu ebenso groß wie E_{x_2}' und entgegengesetzt zu ihr gerichtet sein. Es ist also nahezu bei allen Geschwindigkeiten

$$\Phi_{x_2} = v \cdot \Phi_{y_2}$$

dabei müssen Φ_{x_2} und Φ_{y_2} stets nahezu 90° Phasenverschiebung gegeneinander besitzen. Diese Beziehung haben wir schon bei dem einphasigen Induktionsmotor (559) kennen gelernt. Ist $E_{x_2}'' > E_{x_2}'$, oder $\Phi_{x_2} < v \Phi_{y_2}$, so ist das Drehmoment negativ, der Motor läuft dann als Generator. Es bildet sich also ein umlaufendes magnetisches Feld aus, das bei Synchronismus ($v=1$) am besten ausgebildet ist. Daher ist dann auch die Kommutierung am besten. Der Motor läuft daher am günstigsten in der Gegend der synchronen Geschwindigkeit.

Bei Stillstand ist die Spannung am Ständer sehr gering, am Läufer groß; mit zunehmender Geschwindigkeit wird die Ständerspannung größer, die Läuferspannung geringer. Letztere erreicht etwa bei Synchronismus ihren geringsten Wert und wird dann wieder größer.

Der Motor hat ausgesprochenen Reihenschlußcharakter. Er läuft mit großer Kraft an. Sein Drehmoment ist nur von der Stromstärke abhängig und wird mit wachsender Stromstärke geringer.

Wird durch Anwendung eines Transformators nach Winter und Eichberg (Abb. 283f) der Erregerstrom abgeschwächt, was durch Vergrößerung der sekundären Windungszahl des Transformators geschieht (die Durchflutungen müssen primär und sekundär stets nahezu gleich groß bleiben), so kann man statt dessen annehmen, die Stromstärke I_{y_2} sei dieselbe geblieben, die Windungszahl w_2 der Y_{y_2} -Wicklung aber verkleinert worden. Vergl. (547).

Verkleinert man das Übersetzungsverhältnis w_1/w_2 des Transformators, so wird bei konstanter Spannung die Stromstärke im Ständer und das Drehmoment größer oder bei gleichem Drehmoment die Geschwindigkeit größer. Man kann den Reguliertransformator so abstimmen, daß man bei verschiedenen Geschwindigkeiten immer mit einem sehr hohen Leistungsfaktor arbeitet. Dreht sich der Motor in umgekehrter Richtung, so wird die aufgenommene Leistung bei einer bestimmten Geschwindigkeit zu Null und darüber negativ. Der Motor ver-

wandelt sich dann in einen Generator. Er erregt sich dabei sogar selbst, die Frequenz hängt von den elektrischen und magnetischen Größen des Motors ab. (Schmitz, S. 353.)

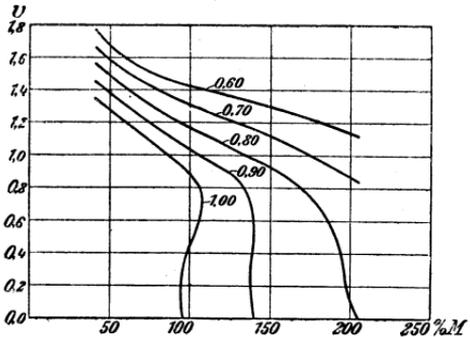


Abb. 287. Verhalten des Latour-Winter-Eichberg-Motors, bei konstanter Spannung und verschiedenen Übersetzungsverhältnissen w_1/w_2 des Transformators.

Φ_{x_2} nahezu 90° miteinander einschließen müssen und daß $\Phi_{x_2} \approx v \Phi_{y_2}$ ist, bestehen. Der Motor läuft dann nur in der Nähe des Synchronismus, er hat also Nebenschlußcharakteristik. Dabei ist, wie wir gesehen haben, U_{x_1} verhältnismäßig groß, U_{y_2} verhältnismäßig klein.

(563) Diagramm des Repulsionsmotors¹⁾. Abb. 288. Denkt man sich den Repulsionsmotor, Abb. 283i mit einer X_2 - und einer Y_2 -Wicklung (548) auf dem

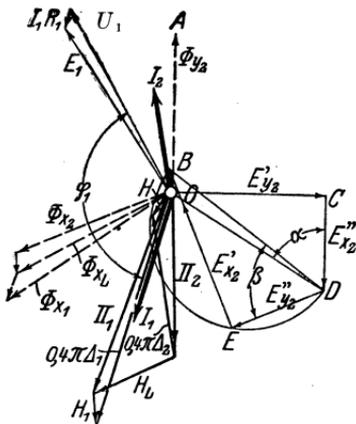


Abb. 288. Vektordiagramm des Repulsionsmotors.

Motor in Nebenschlußschaltung, so bleiben die Bedingungen, daß Φ_{y_2} und Φ_{x_2} nahezu 90° miteinander einschließen müssen und daß $\Phi_{x_2} \approx v \Phi_{y_2}$ ist, bestehen. Der Motor läuft dann nur in der Nähe des Synchronismus, er hat also Nebenschlußcharakteristik. Dabei ist, wie wir gesehen haben, U_{x_1} verhältnismäßig groß, U_{y_2} verhältnismäßig klein.

Der Motor läßt sich für Spannungen von etwa 300 bis 900 V ausführen, je nach seiner Größe. Er ist dem Reihenschlußmotor gegenüber im Nachteil, weil er bei gleicher Geschwindigkeit mit weniger Polen gebaut werden muß und daher ein größeres Gewicht erhält. Abb. 317.

(562) Verwendet man diesen Motor in Nebenschlußschaltung, so bleiben die Bedingungen, daß Φ_{y_2} und Φ_{x_2} nahezu 90° miteinander einschließen müssen und daß $\Phi_{x_2} \approx v \Phi_{y_2}$ ist, bestehen. Der Motor läuft dann nur in der Nähe des Synchronismus, er hat also Nebenschlußcharakteristik. Dabei ist, wie wir gesehen haben, U_{x_1} verhältnismäßig groß, U_{y_2} verhältnismäßig klein.

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{w_{y_2}}{w_{x_2}}$$

Bei Stillstand treten in der ganzen Läuferwicklung nur die beiden EMKe E_{x_2}' und E_{y_2}' auf, die wegen des Kurzschlusses der Wicklung nahezu gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sein müssen. Dasselbe gilt von den Induktionsflüssen Φ_{x_2} und Φ_{y_2} . I_2 hat aber mit Φ_{y_2} nahezu gleiche Phase, weil es der einzige Strom ist, der für die Erzeugung von Φ_{y_2} in Betracht kommt.

Die Drehmomente $(\Phi_{y_2} I_2)$ und $(\Phi_{x_2} I_2)$ sind daher beide positiv und fast gleich groß. Der Motor läuft daher mit großer Kraft in positiver Richtung an. Die Bürsten sind dazu aus der Kurzschlußstellung um den positiven Winkel ω , aus der Leerstellung also in negativer Richtung verschoben worden.

¹⁾ Literatur siehe S. 353.

Wenn der Motor läuft, treten noch E_{x_2}'' und E_{y_2}'' infolge der Rotation auf. Es muß nun

$$E_{y_2} \widehat{+} E_{x_2}'' \widehat{+} E_{y_2}'' \widehat{+} E_{x_2}' = I_2 R_2$$

sein. $I_2 R_2 = OB$ ist klein und hat wegen der Eisenverluste eine geringe Vor-eilung vor Φ_{y_2} , $E_{y_2}' = OC$ steht rechtwinklig auf $OA = \Phi_{y_2}$, $E_{x_2}'' = CD$ ist parallel zu OA und ihm entgegengesetzt gerichtet, weil der Drehungssinn positiv ist.

Die beiden EMKe E_{y_2}'' und E_{x_2}' müssen die Katheten eines rechtwinkligen Dreiecks über BD als Hypotenuse bilden. Nun ist

$$\begin{aligned} OC = E_{y_2}' &= c w_{y_2} \Phi_{y_2} & CD = E_{x_2}'' &= v \cdot c w_{x_2} \Phi_{y_2} \\ DE = E_{y_2}'' &= v \cdot c w_{y_2} \Phi_{x_2} & EB = E_{x_2}' &= c w_{x_2} \Phi_{x_2} \end{aligned}$$

Daher

$$\operatorname{tg} ODC = \operatorname{tg} \alpha = \frac{OC}{CD} = \frac{w_{y_2}}{v w_{x_2}} = \frac{\operatorname{tg} \omega}{v}$$

$$\operatorname{tg} BDE = \operatorname{tg} \beta = \frac{EB}{DE} = \frac{w_{x_2}}{v w_{y_2}} = \frac{1}{v \operatorname{tg} \omega}$$

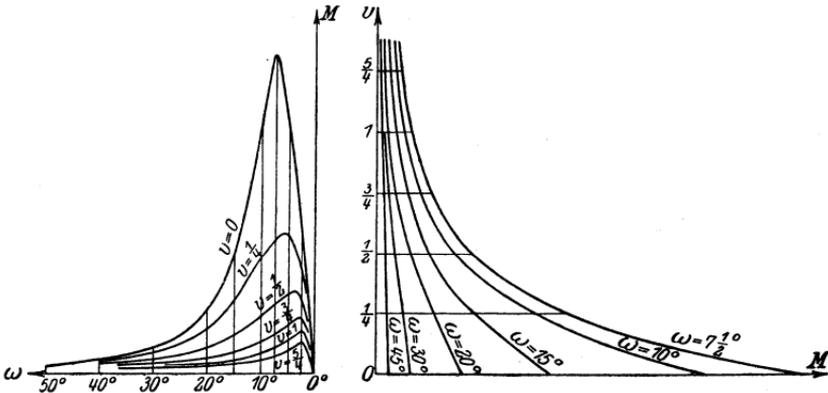


Abb. 289. Verhalten des Repulsionsmotors.

Der Punkt E auf dem Halbkreis über BD kann daher leicht gefunden werden. Die Vektoren von Φ_{x_2} und Φ_{x_1} sowie von E_1 und U_1 können dann wie im Transformator-Diagramm (334) konstruiert werden.

Besonders übersichtlich wird das Diagramm, wenn man $I_2 R_2$ vernachlässigt und B mit O zusammenfallen läßt. Dann ist

$$(w_{y_2}^2 + v^2 w_{x_2}^2) \Phi_{y_2}^2 = (w_{x_2}^2 + v^2 w_{y_2}^2) \Phi_{x_2}^2$$

oder

$$(\operatorname{tg}^2 \omega + v^2) \Phi_{y_2}^2 = (1 + v^2 \operatorname{tg}^2 \omega) \Phi_{x_2}^2$$

Bei beliebigem ω folgt hieraus für

$$\text{Synchronismus } (v=1) \Phi_{x_2} = \Phi_{y_2}$$

$$\text{Stillstand } (v=0) \Phi_{x_2} = \Phi_{y_2} \cdot \operatorname{tg} \omega$$

Für $\omega=45^\circ$ ist bei jeder Geschwindigkeit $\Phi_{x_2} = \Phi_{y_2}$. In diesem Falle haben Φ_{x_2} und Φ_{y_2} außerdem bei Synchronismus 90° Phasenverschiebung, es besteht dann also ein Drehfeld, das in demselben Sinne umläuft wie der Anker, so daß die Kommutierungsverhältnisse günstig werden. Mit zunehmender Geschwindigkeit dreht sich, bei fester

Lage von Φ_{v_2} , Φ_{x_2} im Sinne des Uhrzeigers. Bei Stillstand sind Φ_{x_2} und Φ_{v_2} einander genau entgegengerichtet, bei Synchronismus schließen sie einen Rechten miteinander ein und bei unendlich großer Geschwindigkeit fallen sie in dieselbe Richtung. Das Drehmoment ($\Phi_{x_2} I_2$) wird dabei immer kleiner, ist bei Synchronismus gleich Null und wird dann negativ. Das Gesamtdrehmoment sinkt daher von Stillstand bis zum Synchronismus bis auf die Hälfte und wird bei unendlich großer Geschwindigkeit zu Null. Eine Phasenverschiebung bleibt in der Ständerwicklung zwischen Spannung und Stromstärke immer bestehen, der Leistungsfaktor kann daher nie den Wert Eins erreichen.

Aus dem Diagramm ergibt sich, wenn man den Widerstand des Läufers R_2 gleich Null setzt, für das Drehmoment der Ausdruck

$$M = C \cdot \Phi_{x_2}^2 \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \omega}{(v^2 + \operatorname{tg}^2 \omega) \operatorname{tg} \omega}$$

der, abgesehen von kleinen Werten für ω , gute Übereinstimmung mit den wahren Werten zeigt. Abb. 289 zeigt links den Verlauf des Drehmoments als Funktion der Bürstenstellung ω bei verschiedenen Geschwindigkeiten, rechts die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Drehmoment bei verschiedenen Bürstenstellungen.

In der Betriebsstellung müssen die Bürsten sehr weit, um 75° bis 82° bei einfachen Bürsten, aus der Leerstellung verschoben sein.

(564) Elektrische Verstellung der magnetischen Achse. Die Bürstenverstellung ergibt ein sehr einfaches Mittel, den Motor stoßfrei in Gang zu setzen und seine

Geschwindigkeit zu regeln. Bei kleinen Motoren kann man statt dessen die magnetische Achse des Ständers auf elektrischem Wege verstellen. Schüler benutzt dazu, Abb. 290, eine in Stern geschaltete Drehstromwicklung auf dem Ständer, von denen mit Hilfe eines Umschalters entweder die Zweige I und III oder die Zweige II und I,III eingeschaltet werden. Dadurch wird die magnetische Achse des Ständers um $\pm 30^\circ$ aus der Mittelstellung verstellt, in der sie mit der Verbindungslinie der Bürsten zusammenfällt. Wählt man die Windungs- und Nutenzahlen für die Zweige I und II geringer, so kann man auch um kleinere Winkel verstellen. Derartige Motoren werden viel für Aufzüge verwendet. (Vgl. Schüler, ETZ 1903, S. 565. — Thomälen, Z. f. el. B. u. B. 1913, S. 453).

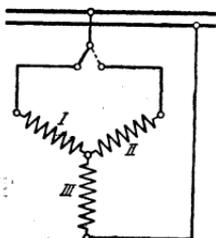


Abb. 290. Elektrische Verstellung der magnetischen Achse im Ständer des Repulsionsmotors.

(565) Kommutierung. Für die Kommutierung gelten die früher entwickelten Gesichtspunkte, vgl. besonders auch (404). Es kommt aber folgende Schwierigkeit hinzu. Der Induktionsfluß Φ_{x_2} induziert in den bei der Kommutierung durch die Y-Bürsten kurzgeschlossenen Windungen eine EMK E_{kx}' , die 90° Phasenverschiebung gegen Φ_{x_2} besitzt; ebenso entsteht eine EMK E_{ky}' , wenn X-Bürsten vorhanden sind. Um diese EMKe zu kompensieren, benutzt man EMKe E_k'' , die durch besondere Wendeleitungsflüsse Φ_k von gleicher Phase mit E_k'' erzeugt werden. Im vollkommenen Drehfeld findet diese Kompensation ohne besondere Wicklungen statt. Der Latoursche Motor und der Repulsionsmotor laufen daher besonders gut in der Nähe des Synchronismus. Bei jenem sind es besonders die kurz miteinander verbundenen X-Bürsten, die zum Feuern neigen, während die Y-Bürsten Windungen kurzschließen, deren Achse mit der Achse der dauernd kurzgeschlossenen X_2 -Wicklung zusammenfällt, und deswegen nicht zum Feuern neigen. (Vgl. Richter, ETZ 1911, S. 1258.) Man wendet daher für die Beseitigung des Feuers an den X-Bürsten dieses Motors ebenso wie an den Y-Bürsten des Reihenschlußmotors Wendeleitungen an und erregt diese so, daß sie einen Wendefluß von 90° Phasenverschiebung gegen

den rechtwinklig dazu gerichteten Induktionsfluß erzeugen, was durch verschiedene Schaltungen möglich ist, z. B. dadurch, wenn auch nur unvollkommen, daß man einen Widerstand parallel zur Wicklung der Wendezähne schaltet. Bei Stillstand und geringer Geschwindigkeit sind diese Wendezähne natürlich ohne Wirkung, in diesen Fällen ist daher Feuer an den Bürsten nicht zu vermeiden.

Ein weiteres Mittel, das Feuer an den Bürsten zu vermindern, besteht in Widerstandsverbindungen zwischen der Wicklung und dem Kommutator. Sie gestatten, eine höhere EMK e_s der Selbstinduktion in den kurzgeschlossenen Spulen (403) zuzulassen, und machen die Verwendung höherer Spannungen möglich, woraus wieder geringere Stromstärke und geringere Kommutatorlänge und die Zulässigkeit der Verwendung dickerer, mehrere Kommutator-teile bedeckender Kohlen folgt. Dagegen geben die Widerstandsverbindungen durch starke Erwärmung auch zu Störungen Veranlassung. Die von Brown, Boveri u. Cie. für die Gotthardbahn gelieferten Motoren sind mit Widerstandsverbindungen versehen, die mäanderbandartig fest verpackt zwischen dem Ankerkörper und dem Kommutator liegen (ETZ 1922, S. 183). Die Motoren sind für 550 Volt, dauernd 510 Volt, 550 Uml./min, 700 PS Stundenleistung, 580 PS Dauerleistung gebaut. Beim Latour-Winter-Eichberg-Motor dürfen sie nicht angebracht werden, weil dadurch der Winkel Φ_{α_2} und Φ_{ν_2} verkleinert und die Wirkung des Motors stark beeinträchtigt wird.

(567) Bauausführung der Wechselstrommotoren. Wenn die Y-Komponente des Induktionsflusses für den Betrieb nicht erforderlich ist oder durch Kompensationswicklungen beseitigt wird, wie beim Reihenschlußmotor, kann der Ständer mit ausgeprägten Polen gebaut werden, er kann aber auch in diesem Falle als Ring mit innerer Nutung ausgeführt werden, vorausgesetzt, daß eine Kompensationswicklung angebracht ist, was praktisch immer geschieht. Beim Reihenschlußmotor wird die Erregerwicklung häufig konzentriert in je zwei größeren Nuten, die Kompensationswicklung verteilt in einer größeren Anzahl Nuten untergebracht. Außerdem findet man die vorher erwähnten Wendezähne. Der Ständer ist daher nach Abb. 190 gebaut. In allen Fällen, wo die Y-Komponente zum Betriebe notwendig ist, muß der Ständer als ein den Läufer möglichst ohne Unterbrechungen umschließender Ring gebaut werden. Dies ist bei den Mehrphasenmotoren, dem Latour-Winter-Eichberg- und dem Repulsionsmotor der Fall. Bei den Einphasenmotoren kann die Nutung da, wo der Φ_2 -Fluß aus- und eintritt, fehlen, doch befinden sich beim Latour'schen Motor an diesen Stellen Wendezähne. Die Wicklung des Ständers wird konstruktiv ähnlich wie die der Induktionsmotoren ausgeführt. Der Läufer der Kommutatormotoren besitzt in der Regel Schleifenwicklung, unter Umständen mit besonders ausgebildeten Widerstandsverbindungen. Der Kommutator wird meist mit sehr viel Teilen ausgeführt, so daß jedes Wicklungselement nur aus einer Windung besteht.

Polzahlen. Der Latour-Winter-Eichberg- und der Repulsionsmotor laufen in der Nähe des Synchronismus am besten, beim Reihenschlußmotor kommt es dagegen wesentlich darauf an, daß er möglichst schnell läuft, damit E_{ν_2} groß ist. Seine Geschwindigkeit darf daher ohne Bedenken den Synchronismus weit überschreiten, d. h. er kann eher mit einer größeren Zahl Pole ausgeführt werden als die anderen Motoren.

(568) Frequenz. Die Kommutatormotoren lassen sich für niedrigere Frequenzen vorteilhafter als für höhere bauen. Motoren nach Latour laufen mehrfach im Eisenbahnbetrieb mit 42 Per/s, doch werden sie auch besonders für niedrigere Frequenzen gebaut. Als normale Frequenzen sind 25 und $16\frac{2}{3}$ Per/s anzusehen. Für den Bahnbetrieb sind vielfach $16\frac{2}{3}$ Per/s als normal festgesetzt worden. Die Motoren können dann mit starker Sättigung in den Zähnen, bis zu etwa 16000 Gauß, arbeiten; die Bleche können dicker, bis zu 1 mm Stärke, genommen werden.

Stromumformungen.

(569) Arten der Umformer. Während die Transformatoren als ruhende Apparate auf Wechselstrom beschränkt sind und nur Spannung, Stromstärke und allenfalls die Phase des Stromes, aber, abgesehen von den Frequenztransformatoren, nicht den Charakter des Stromes als Wechselstrom von bestimmter Frequenz ändern, sind die Motorgeneratoren und die Umformer umlaufende Maschinen, die nicht auf Wechselstrom und die Änderung der Spannung beschränkt sind.

Die Motorgeneratoren dienen zur Umwandlung eines elektrischen Stromes in einen beliebigen andern und bestehen aus zwei miteinander direkt gekuppelten Maschinen, nämlich einem Motor für den primären und einem Generator für den sekundären Strom. Bei primärem Wechselstrom kann der Motor ein Synchron- oder ein Induktionsmotor sein. Im Gegensatz zu ihnen versteht man unter Einanker-Umformern Maschinen, bei denen die Umformung des Stromes in einem gemeinsamen Anker stattfindet. Man unterscheidet Einanker-Umformer mit zwei voneinander getrennten Wicklungen, z. B. von Gleichstrom in Gleichstrom anderer Spannung, und solche mit einer einzigen Wicklung, meist einer Kommutatorwicklung, an die zugleich 2—6 Schleifringe angeschlossen sind, zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom und umgekehrt. (Weger der Spaltpolformner vgl. Fleischmann, ETZ 1908, S. 685 und Hallo, Arbeiten aus d. Elektrotechn. Inst. d. T. H. Karlsruhe, Bd. 2.)

Erregt werden die Einanker-Umformer stets durch eine Nebenschluß- oder eine Doppelschlußwicklung, die von der Gleichstromseite aus oder von einer fremden Gleichstromquelle gespeist wird. Am verbreitetsten ist der Einanker-Umformer mit einer geschlossenen Kommutatorwicklung zur Umformung von Mehrphasenstrom in Gleichstrom.

Der Einanker-Umformer kann auch als Doppelgenerator zur gleichzeitigen Erzeugung beider Stromarten oder auch gleichzeitig als Umformer und Motor benutzt werden.

Der Kaskadenumformer ist eine Vereinigung eines Induktionsmotors mit einem Einanker-Umformer durch direkte Kuppelung und eine besondere Schaltung.

Der Frequenzumformer wandelt Wechsel- oder Mehrphasenstrom auf eine andere Frequenz und Spannung um. Man denke sich den mit Gleichstrom erregten Feldmagnet ohne ausgeprägte Pole und ebenso den zugehörigen Anker mit je zwei Wicklungen für zwei verschiedene Polzahlen versehen. Den Bergmann-El.-Werken ist es gelungen, die beiden Wicklungen jedes Teiles zu einer einzigen zu vereinigen. Hierzu sind insbesondere zwei Mittel benutzt worden, nämlich erstens eine Polumschaltung (530) mit der Änderung, daß zwei Schaltungen für verschiedene Polzahlen gleichzeitig benutzt werden, also gleichzeitig zwei äußere Erregerkreise und zwei äußere Ankerkreise vorhanden sind, und zweitens eine Brückenschaltung derart, daß der eine äußere Kreis an solche Punkte der Wicklung angeschlossen ist, die in bezug auf den anderen äußeren Kreis dasselbe Potential haben, und umgekehrt, so daß die Ströme einander nur in den Wicklungen überlagern, in den äußeren Stromkreisen aber unabhängig voneinander verlaufen. Man kann dann der Ankerwicklung entweder Ströme verschiedener Frequenz entnehmen oder auch Leistungen von einer gegebenen Frequenz — etwa 50 Per/sec — in die einer anderen Frequenz — etwa $16\frac{2}{3}$ Per/sec — umformen. Vgl. ETZ 1921, S. 1062.

(570) Verhalten der Einanker-Umformer. Die Einanker-Umformer haben im allgemeinen ein festes, von Drehzahl und Belastung unabhängiges Übersetzungsverhältnis, weil nur ein magnetisches Feld vorhanden ist. Das Verhältnis der Spannungen ändert sich daher nur infolge des ohmschen Spannungsverlustes in der Ankerwicklung und der Verzerrung des magnetischen Feldes ein wenig. Wenn nur eine eingängige Wicklung für Gleichstrom und Wechselstrom vorhanden ist,

so werden die Schleifringe bei m -Phasenstrom an $m p$ oder m gleichmäßig über sie verteilte Punkte angeschlossen, je nachdem es sich um Schleifen- oder Wellenwicklung handelt. Gewöhnlich wird die eingängige Schleifenwicklung gewählt. Je p Punkte gleichen Potentials, werden dann miteinander verbunden und an einen Schleifring angeschlossen. Die EMKe können aus der Gleichung in (461) berechnet werden.

Bei sinusartig verteiltem Felde verhalten sich daher die EMKe zwischen den Schleifringen zueinander wie die Sehnen zwischen den Anschlußpunkten. Setzt man die EMK bei Gleichstrom gleich Eins, so sind die EMKe E aus folgender Tabelle zu entnehmen.

Umformer für	Bei sinusförmig verteilttem Felde		Bei Polbreite zu Polteilung wie			
	E	N%	1:2		2:3	
			E	N%	E	N%
Einphasenstrom . . .	$1/\sqrt{2} = 0,707$	85	0,82	95	0,75	88
Drehstrom	$\sqrt{3}/2\sqrt{2} = 0,612$	134	0,71	144	0,65	138
Vierphasenstrom . . .	$1/2 = 0,500$	164	0,58	170	0,53	167
Sechphasenstrom . . .	$1/2\sqrt{2} = 0,354$	196	0,42	190	0,37	198

Wenn der primäre Strom Gleichstrom ist, so läuft die Maschine als Gleichstrommotor und daher je nach der Erregung verschieden schnell. Die Frequenz des Wechselstromes ist daher veränderlich und von der Art und Größe der Belastung abhängig, da die Ankerrückwirkung des Wechselstromes je nach der Phasenverschiebung sehr verschieden ist (463). Bei starker Phasenverschiebung ist sogar ein Durchgehen des Umformers nicht ausgeschlossen. Unter Umständen sind daher selbsttätige Geschwindigkeits-Regulatoren erforderlich.

Ist der Wechselstrom oder Drehstrom die primäre Stromart, so läuft der Einanker-Umformer als Synchronmotor und teilt dessen Eigenschaften. Er kann z. B. gegen den Generator ins Schwingen geraten. Man versieht ihn daher mit Dämpfungswicklung (487) oder mit einem Schwungrade.

(571) Der **Bau der Einanker-Umformer** (vgl. auch ETZ 1912, S. 1014 u. ETZ 1913, S. 291) gleicht im wesentlichen dem der Gleichstrommaschinen. Der Kommutator wird auf der einen Seite, die Schleifringe werden auf der anderen Seite des Ankers angeordnet. Beide erhalten entsprechend der großen Leistung im Vergleich zum Anker große Abmessungen. Bei der Benutzung für einphasigen Wechselstrom entsteht ein so stark pulsierendes Feld, daß in massiven Polen große Verluste durch Wirbelströme und starke Erwärmung auftreten. Die Frequenz wird, wenn möglich, gleich 25 Per/s gewählt, da bei höherer Frequenz die Kommutierung und der Parallelbetrieb schwieriger und die Maschine teurer wird. Von Dämpferwicklung (487) und Wendepolen (393) wird viel Gebrauch gemacht.

Der Höchstwert der Gleichstromspannung liegt bei der üblichen Schleifenwicklung für 50 Per/s in der Gegend von 1200 Volt, bei niedrigerer Frequenz höher (Kade, ETZ 1922, S. 104.)

(572) Die **Leistung der Einanker-Umformer** ist wesentlich durch die Erwärmung begrenzt. Die Übereinanderlagerung des Gleichstromes und des Wechselstromes in derselben Ankerwicklung hat eine andere Stromwärmeleistung zur Folge, als wenn derselbe Gleichstrom allein im Anker fließt. Setzt man die Leistung im letzten Falle gleich Hundert, so ergibt sich die Leistung N des Ankers bei gleicher Stromwärmeleistung, wenn die Maschine als Umformer benutzt wird, und $\cos \varphi = 1$ ist, nach K a p p aus obiger Tabelle. Weicht der $\cos \varphi$ von 1 ab, so wird die Stromwärmeleistung größer.

Die Leistung ist bei Einphasenstrom geringer, bei Drehstrom und noch weit mehr bei Sechspannenstrom größer als bei Entnahme von Gleichstrom. Es empfiehlt sich daher, Sechspannenstrom zu verwenden; vgl. (462). Dies ist fast immer möglich, da die Umformer, meistens zur Umwandlung von hochgespanntem Drehstrom in Gleichstrom benutzt werden, und dann wegen des festen Übersetzungsverhältnisses im Umformer die Vorschaltung von Transformatoren nötig ist. Anfang und Ende eines jeden Zweiges der Sekundärwicklung werden dann an Schleifringe angeschlossen, die mit gegenüberliegenden Punkten der zwei-polig angenommenen Ankerwicklung verbunden sind, Abb. 291. Eine Verteuerung durch die größere Zahl von Schleifringen tritt nicht ein, weil die Summe der ihnen zugeführten Stromstärken und daher die gesamte Bürstenzahl bei gleicher Leistung ungefähr dieselbe bleibt wie bei Drehstrom mit drei Schleifringen, andererseits aber die Ausnützung der Maschine selbst bedeutend besser ist. Die Größe der zugeführten Stromstärke ergibt sich aus der Überlegung, daß jedes Schleifringpaar den dritten Teil der Leistung aufzunehmen hat und die Spannung zwischen zwei

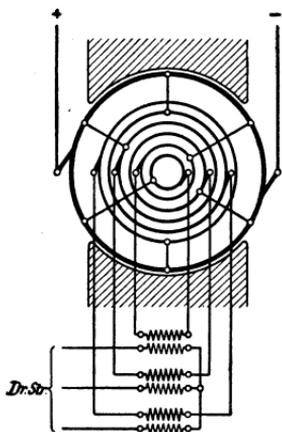


Abb. 291. Schaltung des Umformers mit Transformator.

Schleifringen gleich dem $1/\sqrt{2}$ fachen der Gleichstromspannung ist. Der Leistungsfaktor kann nahezu gleich Eins gehalten werden, da der Umformer als synchroner Motor läuft.

(573) Der Wirkungsgrad der Elnanker-Umformer mit einer Wicklung ist sehr hoch und beträgt einschließlich der Verluste im Transformator bei Vollbelastung je nach der Größe 90 bis 95 %, bei halber Last ist er 1 bis 1,5 %, bei Viertelast 5 bis 6 % geringer.

(574) Spannungsregulierung der Elnanker-Umformer. Die Spannung des umgeformten Stromes kann, da das Übersetzungsverhältnis des Umformers selbst konstant ist, nur dadurch geändert werden, daß entweder die Spannung auf der Primärseite oder die auf der Sekundärseite geändert wird. Wenn, wie gewöhnlich, der Wechselstrom der primäre Strom ist, kann dies, wie folgt, geschehen.

1. Durch Veränderung der Erregung. Die Phasenverschiebung ist in Synchronmotoren nämlich bei einer bestimmten Erregung gleich Null, bei stärkerer Erregung eilt der Strom vor, bei schwächerer nach (497). Dadurch ändert sich aber bei konstanter Primärspannung des Transformators (572), dessen Sekundärspannung und zwar um so mehr, je größer dessen Streuung ist (332). Man kann auf diese Weise die Gleichstromspannung um etwa $\pm 7\%$ verändern und diese Grenzen durch Einschalten einer Drosselspule in den Primär- oder den Sekundärkreis des Transformators auf $\pm 15\%$ erweitern. Verstärkung der Erregung erhöht die Gleichstromspannung, Abschwächung erniedrigt sie. Bei schwacher Erregung wird Blindstrom aus dem Netz aufgenommen und der Umformer neigt zum Schwingen, bei starker Erregung wird Blindstrom abgegeben. In beiden Fällen erhöht sich die Stromwärmeleistung im Anker nicht unbeträchtlich. Zur selbsttätigen Änderung der Erregung kann man den Umformer auch mit einer Doppelschlußwicklung versehen.

2. Durch Vorschalten eines Dreh- oder Schiebetransformators, vgl. (327) und (328) und Abb. 327.

3. Durch eine Zusatzmaschine entweder auf der Wechselstrom- oder auf der Gleichstromseite. Die AEG schaltet zwischen Transformator und Umformer einen direkt mit letzterem gekuppelten Synchrongenerator mit veränderlicher

Erregung, durch dessen Anker der dem Umformer zugeführte Strom fließt. Ordnet man eine Zusatzmaschine auf der Gleichstromseite an, so kann man die Reguliergrenzen besonders weit wählen.

(575) Anlassen der Umformer. Wenn Gleichstrom zur Verfügung steht, wird der Umformer von der Gleichstromseite aus mit einem Anlasser angelassen; für die Wechselstromseite gelten dann die Regeln des Parallelschaltens wie für Wechselstromgeneratoren (491). Steht kein Gleichstrom zur Verfügung, so muß der Umformer wie ein Wechselstromsynchronmotor in Gang gesetzt werden (500).

Insbesondere kommen folgende Verfahren in Betracht (vgl. Linke, ETZ 1915, S. 133):

1. Benutzung eines Anlaufmotors, der dem Umformer eine etwas größere als die synchrone Geschwindigkeit verleiht: Gleichstrommotor oder Induktionsmotor mit einer um 1 geringeren Polpaarzahl, als der Umformer besitzt.

2. Benutzung eines Asynchronmotors mit gleicher Polzahl. Sobald dieser die volle Geschwindigkeit erreicht hat, wird

a) entweder der Umformer über Schutzwiderstände oder Drosselspulen bei schwacher Selbsterregung ans Netz gelegt, so daß der Umformer in Tritt fällt, oder

b) der Induktionsmotor durch Gleichstromerregung des Läufers synchronisiert. Letzterer erhält zweckmäßig zwei Wicklungen, von denen die eine auf Anlaufwiderstände geschlossen, die andere bei normaler Geschwindigkeit durch Gleichstrom erregt wird.

3. Anlassen durch Anlegen eines Bruchteiles der normalen Spannung, etwa 20 bis 40 Hundertstel, an die Schleifringe. Der vorgeschaltete Transformator wird dazu mit geeigneten Anzapfungen versehen. Bürstenfeuer am Kommutator ist dabei nicht zu vermeiden. Um es zu vermindern, ist die Wendepolwicklung kurz zu schließen. Die Erregerwicklung ist über den Regulierwiderstand an den Anker zu legen. Auf der Primärseite des Transformators sind bei mittelgroßen Umformern (200 bis 600 kW) etwa 70 bis 100 Hundertstel des normalen Stromes erforderlich. Das Umschalten auf volle Spannung muß entweder sehr schnell oder mit einem Schalter mit Vorkontakt und Widerstandsstufe langsam in 1 bis 2 Sekunden geschehen.

Auf richtige Polarität des Umformers ist zu achten. Gegebenenfalls ist das Einschaltverfahren ein oder mehrere Male zu wiederholen.

(576) Der Kaskadenumformer von Bragstad und la Cour (vgl. Arnold und la Cour, Samml. elektrotechn. Vorträge, Bd. VI. — Hallo, D. Eigenschaften des Kaskadenumformers u. seine Anwendung. Dissertation, Karlsruhe 1910. ETZ 1910, S. 575) besteht aus einem asynchronen Motor und einem Umformer, deren Läufer auf derselben Welle sitzen (Abb. 326). Der Läufer des Motors speist den Anker des Umformers. Besitzen beide Teile gleiche Polzahl, so laufen sie mit der halben Geschwindigkeit des Drehfeldes; die eine Hälfte der dem Motor zugeführten Leistung wird in mechanische Leistung verwandelt und als solche dem Umformer zugeführt; die andere Hälfte wird in elektrische Leistung von der halben Frequenz des Primärstromes transformiert und im Umformer in Gleichstrom umgesetzt. Diese Kombination gestattet, dem Umformer bequeme Abmessungen zu geben, und eignet sich besonders für höhere Frequenz (50 bis 60 Per/s), da die Polzahl geringer gewählt werden kann.

Die Läuferwicklung A des Induktionsmotors wird als Sechs- oder Zwölfphasenwicklung ausgeführt, Abb. 292; die Anfänge der Wicklungsabteilungen werden direkt mit geeigneten Punkten der Läuferwicklung B des Umformers verbunden,

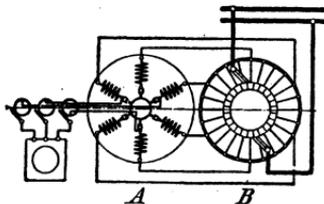


Abb. 292. Schaltung der Läufer des Kaskadenumformers.

die Enden zu mitlaufenden Klemmen geführt, die während des Ganges kurz geschlossen werden können. Zum Anschluß eines Anlagers werden außerdem drei Wicklungsabteilungen, die über die Wicklung des Umformers zusammenhängen und miteinander eine Drehstromwicklung bilden, zu drei Schleifringen geführt. Wenn der Induktionsmotor die Hälfte des Synchronismus, d. h. die normale Geschwindigkeit überschritten hat, wird der Umformer voll erregt. Die Geschwindigkeit sinkt dann wieder, und wenn ein an zwei Schleifringe angeschlossener Spannungszeiger auf Null zeigt, werden die Wicklungsabteilungen durch den mitlaufenden Kurzschließer zu einer Sternschaltung vereinigt. Der Umformer kann mit Selbsterregung ausgeführt werden, doch darf, damit er sich sicher erregt, der Nebenschlußregulierwiderstand keinen Kurzschlußkontakt besitzen. Andernfalls könnte die Geschwindigkeit bis auf das Doppelte steigen.

In Dreileitersystemen kann man den Ausgleich dadurch herstellen, daß man den Nullpunkt des Induktionsmotors über einen Schleifring mit dem Mittelleiter verbindet. Die Gleichstromspannung kann durch die Erregung um etwa $\pm 15\%$ verändert werden, weil die Streuung des Induktionsmotors ebenso wie die des Transformators beim Einanker-Umformer wirkt. Der Wirkungsgrad erreicht etwa 91 bis 92 %.

(577) Vergleich zwischen Motorgenerator, Einanker- und Kaskaden-Umformer (vgl. Kade, ETZ 1922, S. 104). Einanker-Umformer verlangen fast immer einen besonderen Transformator, Motor-Generatoren und Kaskaden-Umformer können dagegen bis zu ziemlich hohen Spannungen — 3000 bis 5000 Volt bei größeren Leistungen — unmittelbar ans Netz angeschlossen werden. Der Einanker-Umformer hat den größten, der Motor-Generator den geringsten Wirkungsgrad, auch nimmt dieser bei letzterem besonders schnell mit abnehmender Leistung ab. Zur Abgabe von Blindstrom, also zum Phasenschieber, eignet sich besonders der sychrone Motor-Generator. Der asynchrone Motor-Generator ist der gegebene Umformer für solche Betriebe, in denen starke Stöße und Leistungsschwankungen auftreten, die nicht aufs Netz übertragen werden sollen (Ilgner-Umformer (436)). Die Gleichstromspannung kann bei beiden Arten zwischen einem positiven und einem negativen Maximum reguliert werden. Kaskaden-Umformer läßt man mit Vorliebe auf Bahnen, Einanker-Umformer auf Netze für Licht und Kraft arbeiten. Der Kaskaden-Umformer ist bei höheren Frequenzen bequemer als der Einanker-Umformer zu bauen. Spannungsteilung ist bei allen Umformern wie in Gleichstromanlagen, also z. B. durch Spannungsteiler nach Dobrowolsky (429) möglich, beim Kaskaden-Umformer kann der Mittelleiter aber einfacher an die Anfahrtschleifringe des Induktionsmotors angeschlossen werden.

(578) Gleichrichter sind Apparate, die auf mechanischem oder chemischem Wege ein- oder mehrphasigen Wechselstrom in gleichgerichteten Strom verwandeln.

Umlaufende Gleichrichter sind von Liebenow (DRP Nr. 73053) und Pollak (ETZ 1894, S. 109) vorgeschlagen worden. Sie bestehen aus einem Kommutator in Verbindung mit Schleifringen, die auf einer gemeinsamen Welle sitzen und von einem kleinen Synchronmotor angetrieben werden. Bei dem Drehstrom-Gleichrichter der Siemens-Schuckertwerke (ETZ 1912, S. 56) ist die sechsphasige Sekundärwicklung eines Drehstromtransformators an 12 Schleifringe angeschlossen. Der Kommutator besitzt 24 Teile, von denen der 1. und der 13. mit dem ersten, der 2. und der 14. mit dem zweiten Schleifring usw. verbunden ist. Der Synchronmotor ist vierpolig und läuft von selbst an. Der Gleichrichter wird bis zu etwa 6 kVA Drehstromleistung bei 120, 220 und 500 V und 50 Per/s gebaut.

Oszillierende Gleichrichter werden für kleine Leistungen gebaut (System Koch, ETZ 1901, S. 853 u. 1903, S. 841, gebaut von Nostiz u. Koch, Chemnitz u. Koch u. Sterzel, Dresden; System Falkenthal, (Deutsche Telephonwerke, Berlin); System Hydrarwerk EAG. Charlotten-

burg). Sie bestehen aus einem durch Gleichstrom magnetisierten Anker, der durch einen Wechselstromelektromagnet in synchrone Schwingungen versetzt wird, oder in einer durch Wechselstrom magnetisierten Zunge, die zwischen den Polen eines Gleichstrommagnets schwingt. Die Phase der Schwingungen wird so eingestellt, daß der Stromkreis in den Zeitpunkten der Stromlosigkeit geöffnet und geschlossen wird. Stromstärke bei 110 V Gleichstrom etwa bis 1,5 A, bei 4 V etwa 60 A.

(579) Elektrolytische Gleichrichter¹⁾. Eine Aluminiumanode polarisiert sich in einem Elektrolyt — es kommen besonders Lösungen der Borate, z. B. des sauren borsauren Ammoniums (NH_4HBO_2) in Betracht — so stark, daß sie dem Stromdurchgang bis zu einem kritischen Werte der Spannung, etwa 450 bis 530 V je nach der Beschaffenheit des Elektrolyten, einen sehr großen Widerstand entgegensetzt. Es bildet sich nämlich auf der Anode eine isolierende Haut von Aluminiumhydroxyd $\text{Al}_2(\text{HO})_6$ und eine sehr dünne Gasschicht. Als Kathode dagegen bietet die Aluminiumplatte keinen erheblichen Widerstand. Solche Zellen wirken daher wie Ventile, indem sie den Strom nur in einer Richtung durchlassen, vorausgesetzt, daß die Spannung den kritischen Wert nicht überschreitet.

Der Wirkungsgrad dieser Gleichrichter ist sehr mäßig (60 bis 75 %), die Haltbarkeit begrenzt, größere Anwendungen haben sie daher kaum gefunden. Dagegen werden solche Zellen in steigendem Maße als elektrische Ventile benutzt. Diese Zellen besitzen zugleich eine sehr erhebliche elektrostatische Kapazität.

(580) Quecksilberdampfgleichrichter (Cooper Hewitt²⁾). — Man unterscheidet Glasgleichrichter für kleinere Leistungen und aus Stahlblech hergestellte Großgleichrichter für größere Leistungen. Ein hoch evakuierter, oben mit einer Kühlkammer versehener Glaskolben enthält in seinem untersten Teile die Quecksilberkathode *D*, in mehreren Seitenarmen die aus Graphit oder Eisen hergestellten Anoden *A*, *B*, *C* und eine Hilfsanode *E* aus Quecksilber. *E* ist über einen Widerstand und einen Schalter mit einer der Anoden verbunden. Die Schaltung für Drehstrom zeigt Abb. 293, die für Einphasenstrom Abb. 294. Wenn die Kathode dauernd sehr heiß bleibt, so daß sie genügend viel Ionen zur Ionisierung des Gasweges aussenden kann, und die Anoden genügend gekühlt werden, so daß sie nicht zu Kathoden werden können, wirkt die Vorrichtung wie ein Ventil, das nur Strom in der Richtung von den Graphitelektroden zum Quecksilber durchläßt. Zum Zünden wird die Lampe so oft gekippt, bis das von der Hilfsanode zur unteren Quecksilberelektrode überfließende Quecksilber einen Lichtbogen zieht, der sodann auf eine der Hauptanoden überspringt. Zu dem Gleichrichter gehört ein Transformator — häufig wird ein solcher mit Sparschaltung verwendet — von dessen Mittelpunkt man über den Stromaufnehmer zur Quecksilberkathode gelangt, während die äußeren Enden unmittelbar mit den Graphitanoden verbunden sind. Bei Einphasenstrom ist noch eine Drosselspule *S* in der Kathodenleitung erforderlich, damit der Strom an der Kathode nie verschwindet. Wenn der von *A* nach *D*, Abb. 294 fließende Strom abnimmt, so wird in der Drosselspule *S* eine EMK gleicher Richtung erzeugt, die auch dann noch den Strom von *A* nach *D* eine Zeitlang aufrecht erhält, wenn *B* bereits Anode geworden ist. Die von

¹⁾ Pollak, C. R. Bd. 124, S. 1443, ETZ 1897, S. 358. — Graetz, Wied. Ann. Bd. 62, S. 323, ETZ 1897, S. 423. — Wilson, ETZ 1898, S. 615. — Norden, Zeitschr. f. Elektrochemie, 6. Jhrg., S. 159, wo auch die ältere Literatur angegeben ist. — Günther Schulze, El. u. Masch.-Bau, Wien 1909, Heft 11; Arch. f. El. Bd. 3, S. 43, Helios, Fachzeits.-hr. f. Elektrotechnik, 1920, S. 125. — Siegl, ETZ 1913, S. 970.

²⁾ Literatur: Günther Schulze, ETZ 1909 S. 295; 1910, S. 28. — Tschudy, Diss. Zürich 1912, besprochen von Günther Schulze, ETZ 1912, S. 1088. — v. Keller, ETZ 1909, S. 1180, 1225. — Hechler, ETZ 1910, S. 1053. — Béla Schäfer, ETZ 1910, S. 55; 1911, S. 2; 1912, S. 1164; 1914, S. 282. — Epstein, ETZ 1913, S. 1415. — Hartmann-Kempff, ETZ 1913, S. 253. — Nielsen, ETZ 1919, S. 224. — Arons, Wiedem. Ann. Bd. 47, 1899, S. 767. — Hewitt, Proc. Am. Inst. El. Eng. 12. 4. 1901.

A und B nach D fließenden Ströme überlagern einander daher eine kurze Zeit. Auch bei Drehstrom wird diese Drosselspule vielfach angeordnet. Bei Dreiphasenstrom sind die Stromschwankungen viel geringer, noch geringer bei Sechsphasenstrom. Der Quecksilberdampf schlägt sich an den Wandungen der Kühlkammer nieder und rinnt von dort wieder nach unten. Der Spannungsverlust beträgt unabhängig von der Stromstärke 15 bis 20, im Mittel 18 Volt, der Wirkungsgrad ist von der Belastung nahezu unabhängig und um so höher, je höher die Betriebsspannung ist. Verluste treten außerdem nur noch im Transformator und in der Drosselspule auf. Sinkt die Stromstärke bis auf etwa 3 A, so erlischt der Lichtbogen und der Stromkreis wird unterbrochen, was für Akkumulatorenladung angenehm ist. Größere Gleichrichter werden, um auch schwache Belastungen zuzulassen, mit Hilfsregung ausgestattet, die aus zwei kleinen Anoden

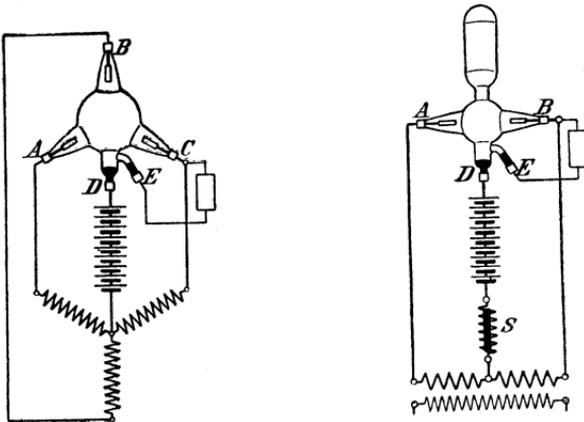


Abb. 293 u. 294. Quecksilberdampf-Gleichrichter von Cooper Hewitt.
Abb. 293 für Drehstrom. Abb. 294 für Einphasenstrom.

im Anschluß an einen Erregertransformator und Drosselspulen in den Anodenleitungen und der Kathodenleitung besteht. Der Verbrauch dafür beträgt bei 4 A etwa 100 W. Der Glasgleichrichter wird für Stromstärken bis zu 250 A, neuerdings sogar (AEG) bis zu 500 A und Spannungen bis etwa 1000 V hergestellt. Die AEG verwendet Borosilikatglas von Schott u. Gen., Jena, und benutzt Molybdändraht zur Stromdurchführung, die Gleichrichter-Ges. m. b. H. eine Platinkappe, deren Rand mit dem Glase verschmolzen ist, mit angeschweißtem Eisendraht, der die Graphitanode trägt und Kupferdraht für die Zuleitung. Künstliche Kühlung des Glaskolbens durch einen Ventilator, der bei schwacher Belastung abgestellt werden kann, erlaubt, die Stromstärke auf das Dreifache zu steigern. Eine Sicherung liegt im Luftstrom des Ventilators, so daß sie durchschmilzt, wenn dieser stillsteht und der Strom dabei eine Stärke hat, bei der Rückzündungen zu erwarten sind. Sollen mehrere Gleichrichter parallel geschaltet werden, so erhalten auch die Anodenleitungen noch je eine Drosselspule.

Da der Strom pulsiert, muß man die gewonnene Leistung, wenn es sich um Wärmewirkungen (Glühlampen) handelt, mit einem Dynamometer bestimmen; wenn es sich um elektrolytische Wirkungen (Akkumulatoren) handelt, aus dem Produkt der mit Drehspulengeräten gemessenen Werte der Spannung und der Stromstärke berechnen. Bei Akkumulatorenladung muß der Maximalwert der nützlichen Ladespannung U_{max} die EMK der Akkumulatoren um den Spannungsverlust U_v im Verbrauchskreis einschließlich der Drosselspule übertreffen.

Es ist also $U_{max} = E + U_p$. Rechnet man hierzu den Spannungsverlust von 18 V im Kolben, so folgt für die Amplitude der Spannung $U_0/2$ vom Nullpunkt bis zur Außenklemme der Sekundärwicklung des Transformators $\frac{1}{2} U_0 = U_{max} + 18$ oder $U_0 = 2(E + U_p + 18)$ und für den Effektivwert der Spannung $U = \sqrt{2} \cdot (E + U_p + 18)$. Rechnet man als Ladespannung einer Zelle 2,50 V, und nimmt man den Spannungsverlust in der Drosselspule zu 15 V an, so ist die Einphasenspannung der ganzen Sekundärwicklung zu $\sqrt{2} \cdot (150 + 15 + 18) = 257$ V anzunehmen.

Großgleichrichter sind zuerst von Béla Schäfer hergestellt worden. Nach der Bauart von Brown Boveri u. Cie. besitzen sie einen Brennraum und einen Kondensationsraum, die aus Stahlblech hergestellt sind. Beide sind mit einem Kühlmantel für Wasserkühlung versehen. Zur Abdichtung des Gefäßes dient Quecksilber zwischen Asbest und teilweise zwischen Gummi. Die starken eisernen Bolzen der Anoden sind in Porzellanisolatoren durch den Deckel des Brennraumes geführt, die Anoden selbst bestehen aus kräftigen Stahlstücken, die auf die Bolzen aufgeschraubt sind; zur Kühlung dienen bei größeren Gleichrichtern Rippenkörper. Die Kathode ist durch einen Porzellanring isoliert im Boden des Brennraumes eingelassen. Der Gleichrichter erfordert eine Verdünnung von 0,01 bis 0,05 mm Quecksilbersäule, wozu eine rotierende Ölluftpumpe dient. Diese braucht nur während der ersten Betriebszeit dauernd mitzulaufen, da nach einigen Monaten alle Restgase aus dem Innern entfernt sind. Zur Messung der Verdünnung kann ein Spannungszeiger dienen, da ja der Widerstand der verdünnten Luft von der Verdünnung abhängig ist. Zur Zündung dient eine in der Mitte angeordnete Zündanode, die elektromagnetisch durch einen Hilfspolestrom heruntergezogen und bei dessen Unterbrechung durch eine Feder wieder hinaufgezogen wird. Der Zündlichtbogen benötigt etwa 5 A. Sinkt die Stromstärke im Gleichrichter unter 10 A, so erlischt der Lichtbogen, wenn nicht Fremderregung vorgesehen ist. Diese besteht in einer besonderen Erregeranode, die z. B. durch eine kleine Akkumulatorenbatterie dauernd auf einem höheren Potential als dem der Anode gehalten wird. Das Einschalten ist nur unter Last möglich; es wird daher ein besonderer Belastungswiderstand für etwa 100 A vorgesehen. Drosselspulen dienen zur besseren Verteilung der Stromstärke, wenn mehrere Zylinder miteinander parallel geschaltet werden oder auch ein Zylinder mit anderen Stromerzeugern parallel arbeiten soll. Auf die Vermeidung der Rückzündung ist besonderer Wert zu legen, die Anoden dürfen nur in Rotglut geraten, während die Kathode weißglühend wird (Temperatur etwa 3000°). Die Lichtbogen werden in Metallrohren geführt, so daß die Anoden nicht von herabbrinnenden Quecksilbertropfen benetzt werden können.

Die normalen Stromstärken sind 250 und 500 A. Bei höherem Strombedarf schaltet man 2 oder mehr Gleichrichter parallel. Gegen Belastungsstöße sind die Gleichrichter unempfindlich; sie haben sich z. B. sehr gut beim Betriebe elektrischer Bahnen bewährt. Der Wirkungsgrad beträgt bei 110 V etwa 84 %, bei 500 V 96 %, bei 1000 V 98 % und ist von der Belastung unabhängig. Daraus ergibt sich bei zeitweise schwacher Belastung ein guter Jahreswirkungsgrad. Abb. 339 zeigt den Großgleichrichter der AEG.

Regulierwiderstände und Anlasser.

(581) Aufbau der Regulierwiderstände. Die Widerstände werden aus Spiralen von Rheotan-, Nickel-, Kruppin-, Chromnickeldraht oder mäanderbandartig gestalteten gußeisernen Elementen hergestellt, die mit Porzellanrollen oder durch Schieferplatten an einem Eisengestell befestigt werden. Dünne Drähte werden auf Porzellanzyylinder gewickelt, die mit Gewinde versehen sind. Die Widerstandskörper werden in einem Gehäuse aus gelochtem Blech untergebracht, das der Luft freien Zu- und Austritt gewährt, oder in Öl versenkt. An der vorderen Seite wird in der Regel der *S t u f e n s c h a l t e r* angeordnet, der aus den auf einem Kreis-

bogen oder ganz im Kreise angeordneten, häufig auf einer Schieferplatte montierten Kontaktknöpfen besteht, über die die Schaltkurbel hinweggleitet. Beim Einbau in Schaltanlagen wird der Widerstand mit dem Stufenschalter zweckmäßig hinter der Schalttafel angeordnet und von vorn durch ein Handrad bedient. Außer dieser einfachsten Anordnung gibt es zahlreiche andere Konstruktionen, z. B. Stufenschalter, die nach Art eines flachen oder auch zylindrischen Kommutators gebaut sind.

Die Beanspruchung des Drahtmaterials ist so zu bemessen, daß für ein Watt bei freier Ausspannung in der Luft etwa 6 bis 7 cm² und bei Aufwicklung auf Porzellanzyylinder etwa 5 cm² Drahtoberfläche vorhanden sind. Bei Widerständen, die in Öl versenkt sind, ist die Oberfläche des Gehäuses reichlich (15 cm² für 1 Watt) zu bemessen, was z. B. durch Wellblechgehäuse erreicht wird; vgl. auch (323).

Bei der Konstruktion der Stufenschalter sind bei Luftkühlung brennbare Stoffe zu vermeiden. Die Grundplatte wird aus Marmor, Schiefer, Porzellan oder dgl. hergestellt. Die Abmessungen sind so zu wählen, daß keine schädliche Erwärmung im Betriebe eintreten kann. Man beanspruche die Berührungsflächen bei Blattfedern mit höchstens 0,8 A/mm², die von massiven federnden Klötzen mit höchstens 0,16 A/mm². Massive Kontakte verbrennen weniger leicht, weil sie die entstehende Wärme leichter aufnehmen und abführen. Etwa auftretende Lichtbogen müssen mit Sicherheit gelöscht werden, wozu vielfach magnetische Funkenlöschung angewendet wird. Blanke stromführende Teile sind abzudecken. Von dieser Regel darf nur bei niedrigen Spannungen und auch nur dann abgesehen werden, wenn sich aus dem Wegfall des Schutzes erhebliche Vorteile ergeben. Die Leitungen werden am besten mit Kabelschuhen angeschlossen; die Verschraubung der Anschlüsse ist besonders zu sichern, damit sie sich auch bei dauernder Erschütterung nicht lösen kann. Die Kontaktschrauben sind mit Rücksicht auf Strombelastung nach den Normalien des VDE über Kontaktgrößen und Schrauben zu bemessen.

Über Flüssigkeitsregulierwiderstände vgl. (589).

(582) Selbsttätige Regler¹⁾. — Man unterscheidet träge, Eilregler und Schnellregler. Die trägen und die Eilregler schalten entweder direkt oder indirekt, durch einen Steuerapparat — ein sog. Spannungsrelais — gesteuert, Widerstandsstufen im Erregerkreise ein und aus. Da aber wegen der großen Induktivität der Erregerwicklung die Stromstärke sich nur langsam ändert, so darf der Regulator nicht zu schnell arbeiten, weil er sonst überreguliert und dann dauernd starke Spannungsschwankungen hervorruft. Bei großen Maschinen braucht der Reguliervorgang vielleicht 20 s, eine Zeit, die viel zu lang ist, so daß die Spannungsschwankungen erheblich stören. Diesen Übelstand vermeiden die Schnellregler. Will man nämlich den Erregerstrom bei einer Zunahme der Belastung schnell auf die erforderliche größere Stärke bringen, so muß man der Erreger Spannung auf kurze Zeit einen viel zu hohen Wert geben und sie in dem Augenblicke, wo der Erregerstrom den richtigen Wert erreicht hat, auf den richtigen Wert herabsetzen. Da das letztere sehr schwierig ist, kann man so verfahren, daß man der Erreger Spannung in schnellem Wechsel eine Zeitlang einen viel zu hohen und wieder einen viel zu kleinen Wert erteilt. Der Erregerstrom stellt sich dann auf einen mittleren Wert ein, der um so höher liegt, je größer das Verhältnis der Zeit, in der die Erreger Spannung einen zu großen Wert hat, zu der Zeit ist, in der sie einen zu kleinen Wert hat. Ein Hauptvertreter der Schnellregulatoren ist der Tirrill-Regler. Zum Durchlaufen der ganzen Kontaktbahn gebraucht der träge Regler etwa 45 s, der Eilregler 6 bis 15 s. Der Schnellregler stellt die richtige Spannung in etwa 1 s her.

¹⁾ Vgl. Natalis, D. selbsttät. Regulierung d. elektr. Generatoren. Vieweg & Sohn. 1908. — Schwaiger, D. Regulierproblem in d. Elektrotechnik. Teubner, 1909. — Großmann, Tirrill-Regler, ETZ 1907, S. 4202. — Seidner, D. automat. Regulierungen der Wechselstromgeneratoren, ETZ 1909, S. 4116. — Thieme, Autom. Reguliervorrichtungen, ETZ 1908, S. 538 (Apparate von Dr. Paul Meyer A.-G.). — Grau, D. Schnellregler u. d. Eilregler d. S. Sch. W. ETZ 1915, S. 63.

(583) **Träge und Eilregler.** Der Steuerapparat ist eine mit Vorschaltwiderstand und nach Art der Spannungsmesser geschaltete Spule, deren beweglicher Eisenanker eine Kontaktzunge oder -scheibe schwebend zwischen zwei Kontaktschrauben hält. Bei zu geringer Spannung kommt die Zunge mit der einen, bei zu hoher mit der anderen Kontaktschraube in Berührung. Durch den Stromschluß wird entweder eine Klinke eines Schaltwerkes, das dauernd hin- und hergeht, eingerückt, oder ein kleiner Elektromotor in Gang gesetzt, und dadurch die Schleifkurbel auf der Kontaktbahn bewegt. Durch besondere Vorkehrungen wird dabei der Funke an den Kontakten des Steuerapparates vermieden oder auch bei starken Strömen ein Zwischenrelais eingeschaltet, das vom Steuerapparat

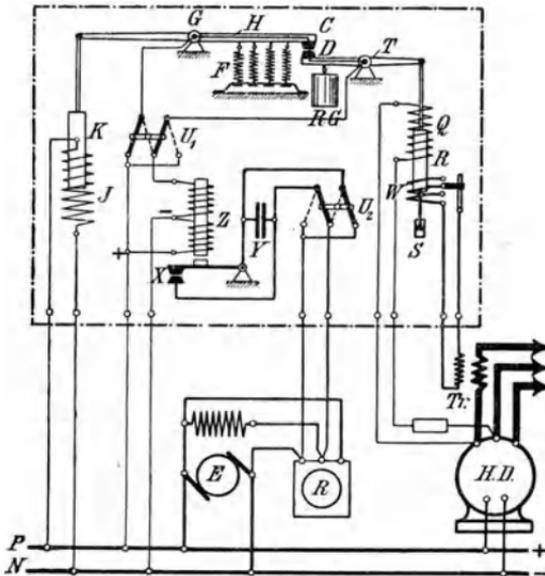


Abb. 295. Schaltung des Tirrillregulators.

in Tätigkeit gesetzt wird und seinerseits die Stromkreise für die stärkeren Ströme schließt. Bei dem Eilregler der Siemens-Schuckertwerke (vgl. Gra u, ETZ 1915, S. 63) wird für Gleichstromanlagen eine Hilfswicklung auf dem Steuerapparat angebracht, die dem Verstellmotor parallel geschaltet ist. Setzt sich dieser in Bewegung, so erhält die Hilfswicklung einen mit der Geschwindigkeit wachsenden Strom, der den Kontakt am Steuerapparat vorzeitig wieder zu öffnen sucht. In Wechselstromanlagen ist dem Verstellmotor ein Hilfsmotor parallel geschaltet, der mittels einer Wirbelstrombremse in demselben Sinne wie eben beschrieben auf den Steuerapparat einwirkt und ihn vorzeitig öffnet. Diese Vorrichtung wird so eingestellt, daß die Schleifkurbel ungefähr in der richtigen Stellung stehen bleibt.

Thieme (Dr. Paul Meyer A.-G.) vermeidet das Zwischenrelais, indem er den Steuerapparat in zwei kräftige Elektromagnete zerlegt, wobei durch eine sinnreiche Schaltung jeweils nur einer von ihnen in Tätigkeit treten kann.

(584) **Der Tirrill-Regler** wird von der AEG gebaut (Abb. 295). Ein Schüttelmagnet JK , der an die Erregerschienen PN angeschlossen ist, hält den um G drehbaren Hebel H dauernd in Schwingungen. Dadurch wird der Kontakt CD

abwechselnd geschlossen und geöffnet. Dies Arbeiten wird durch ein Relais Z auf den stärker gebauten Kontakt X übertragen. Der Kontakt X schließt abwechselnd den ganzen im Erregerkreis der Erregermaschine E liegenden Regulierwiderstand R kurz und öffnet ihn wieder. Das Verhältnis der Kurzschlußzeit zur Öffnungszeit wird durch die Lage des Kontaktes D bestimmt, der an dem mit dem regulierbaren Gewicht RG versehenen Hebel T sitzt und durch den von der Spannung der Wechselstrommaschine HD gespeisten Steuerapparat QR gehoben und gesenkt wird. Der Kern R muß bei richtiger Spannung der Wechselstrommaschine in jeder Höhenlage im Gleichgewicht sein, der Kern K taucht dagegen, indem er die Federn F stärker spannt, um so tiefer in seine Spule J ein, je höher die mittlere Erregerspannung ist. Der Steuerapparat QR besitzt noch eine von der Sekundärwicklung eines Stromtransformators Tr gespeiste regulierbare Hauptschlußwicklung W zur Erzielung einer Compoundwirkung. S ist eine Dämpfung, Y ein Kondensator zur Verminderung der Funken an X , die Umschalter U_1 und U_2 dienen dazu, etwa alle Tage einmal die Polarität an den Kontakten umzukehren, weil der positive Kontakt stärker als der negative abgenutzt wird. Der Kontakt X darf nicht einen im Erregerkreis der Wechselstrommaschine selbst liegenden Widerstand kurz schließen, weil die Schwingungen dann zu langsam vor sich gehen, und Spannungsschwankungen an der Wechselstrommaschine bemerkbar werden würden. Für größere Maschinen werden mehrere Kontakte X parallel geschaltet.

Die Schnellregler gestatten, mit größerem Spannungsabfall zu arbeiten, d. h. die Maschinen stärker auszunutzen. Außerdem ist ein großer Spannungsabfall bei Kurzschlüssen günstig, weil der Strom nicht so stark anwachsen kann, und endlich erleichtert er den Parallelbetrieb. Selbstverständlich können diese Regler auch bei Gleichstrommaschinen verwendet werden.

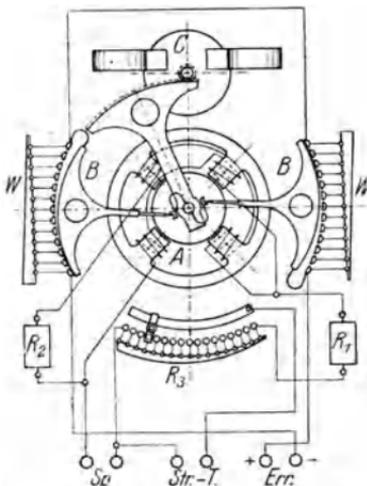


Abb. 296. Schnellregler von Brown, Boveri u. Cie.

(585) Schnellregler von Brown, Boveri

u. Cie. Abb. 296. Der Apparat besitzt einen Steuerapparat — ein Drehspulenmeßgerät bei Gleichstrom, ein Ferrarismeßgerät bei Wechselstrom — der eine Achse verdreht. Diese Achse ist federnd mit einer in ihrer Verlängerung liegenden Steuerachse gekuppelt. Die Bewegungen dieser Steuerachse sind durch eine mittels Zahnradsektor und Zahnrad mit ihr verbundene Wirbelstrombremse C gedämpft. Sie trägt zwei (oder auch vier) paarweise im Durchmesser federnd gelagerte Pfannen, die den Spitzen von Kontaktsektoren BB als Widerlager dienen. Die Kontaktsektoren wälzen sich bei einer Drehung der Steuerachse auf je einer in einem Kreisbogen angeordneten Reihe von Kontakten ab. Hierzu brauchen die Pfannen nur einen kleinen Weg zurückzulegen. Die Steuerachse ist mit der Grundplatte so durch ein Federsystem verankert, daß das von diesem herrührende Drehmoment in jeder Lage der Achse dieselbe Größe hat. Bei einer

Abweichung der Spannung von ihrem richtigen Werte stellt sich der Steuerapparat sofort in die neue Lage ein, die Steuerachse folgt infolge der Dämpfung mit einer gewissen Verzögerung, wobei sich die Kontaktsektoren auf den Kontaktbahnen abwälzen. Bei richtiger Spannung bleiben sie und die Steuerachse in jeder Lage stehen. Der Apparat stellt sich so schnell ein, daß ein Überregulieren nicht schadet, sondern geradezu vorgesehzt ist.

(586) Bau der Anlasser. Die Anlasser werden als Metallwiderstände oder als Flüssigkeitswiderstände ausgeführt. Wie bei allen Regulierwiderständen sind die Schaltvorrichtungen und der Widerstand zu unterscheiden. Beide sind meistens in einem Apparat vereinigt, häufig aber auch getrennt, z. B. bei elektrischen Fahrzeugen. Die Schaltvorrichtungen sind häufig ähnlich wie die der Regulierwiderstände gebaut und weisen die mannigfaltigsten Formen auf. Sie bestehen zum Beispiel aus einer Anzahl Metallkontakte, die in einem Kreisbogen auf einer Steinplatte angeordnet sind und von der Schleifkurbel bestrichen werden. Mitunter werden die Kontakte nach Art eines zylindrischen oder flachen Kommutators zusammengebaut. Für größere Motoren müssen Schalter mit Metallkontakten sehr viele Stufen erhalten, wenn nicht Feuer an den Kontakten auftreten soll. Man hat daher zu Kohlenkontakten gegriffen, die entweder fest angeordnet und von einer Kupferrolle bestrichen werden oder federnd nebeneinander gestellt und der Reihe nach unter starkem Druck mit Kupferschienen in Berührung gebracht werden. Walzenschalter siehe (588).

Mitunter, z. B. für Kranbetriebe, werden die Anlasser für mehrere Motoren durch einen einzigen in verschiedenen Richtungen umlegbaren Hebel bedient, so daß die Richtung der Umlegung zugleich andeutet, welche Bewegung die Last ausführen soll (Universalsteuerung).

Häufig werden die Anlasser mit selbsttätiger Auslösung für Maximalstrom oder Minimalspannung oder für beides gleichzeitig ausgestattet. Im ersten Fall wird eine in den Ankerkreis geschaltete Spule angeordnet, die bei zu starkem Strom den Schalthebel freigibt, worauf ihn eine Feder in die Ausschaltstellung zurückführt; im letzteren Falle wird ein kleiner Elektromagnet in den Erregerkreis geschaltet, der den Hebel in der Betriebsstellung festhält, solange die Spannung nicht unter einen geringsten zulässigen Wert sinkt.

Die Anlasser sollen in der Regel so ausgeführt werden, daß alle stromführenden Teile, also auch die Kontaktbahn gegen Berührung durchaus abgedeckt sind; sie müssen in dieser Weise ausgeführt werden, sobald sie nicht für elektrische Betriebsräume bestimmt sind, und die Spannung gegen Erde 250 V überschreitet. An den Schleifringen von Induktionsmotoren ist die Spannung bei Stillstand am größten.

Um einen niedrigen Preis des Anlassers zu erzielen, beansprucht man das Widerstandsmaterial hinsichtlich Erwärmung hoch; Dauereinschaltung des Anlassers zur Regulierung der Drehzahl ist also nur möglich, wenn der Anlasser für diesen Zweck ganz besonders berechnet worden ist — *Regulieranlasser*. Motoren, die nur mit geringer Belastung anzulaufen haben, werden mit besonders stark beanspruchten, viel billigeren „Anlassern für halbe Last“ versehen.

Bei Bemessung des Widerstandsmaterials ist zu unterscheiden, ob der Anlasser für Anlauf unter voller Last oder für Anlauf bei verminderter Last oder für Leerlauf bestimmt ist, ferner, in welcher Zeit der Motor auf die volle Geschwindigkeit kommt. Große Motoren laufen im allgemeinen langsamer an als kleine. Bei Transmissionsantrieben u. dgl. rechnet man auf 20 bis 30 Sekunden, bei Zentrifugen muß man mit 5 Minuten und mehr, bei Schwungradumformern mit noch längeren Zeiten rechnen. Man unterscheidet ferner Anlasser für Dauerbetrieb der Motoren und Anlasser für aussetzenden Betrieb. Erstere können für langsame Abkühlung gebaut werden und erhalten bei großen Leistungen eine große Wärmekapazität, letztere sind für schnelle Abkühlung zu berechnen, wobei ein Betriebsplan zugrunde gelegt werden muß (305).

(587) Bei den Induktionsmotoren werden die drei Zweige des Anlaßwiderstandes zweckmäßig in Stern geschaltet (Abb. 264). Dreieckschaltung ist bei Draht-Anlassern zu vermeiden, weil die Schaltbahn dabei weniger einfach ist. In der Regel wird die Kontaktbahn so ausgebildet, daß sie drei Reihen von Kontaktknöpfen enthält, entsprechend den drei Zweigen des Sekundärankers, der meistens, auch bei Zweiphasenmotoren, dreiphasig gewickelt wird. Die Kontaktbürsten sitzen dann unisoliert an einer drehbaren Metallscheibe, die den äußeren Nullpunkt der Stromkreise bildet.

Zur Verbindung zwischen den Bürsten und dem Anlasser dienen starke Leitungen, weil der Spannungsverlust mit Rücksicht auf Wirkungsgrad und Schlüpfung auf ein Minimum herabgedrückt werden muß. Die Stromstärke in diesen Leitungen kann nur bestimmt werden, wenn die Anlaßspannung, d. h. die Spannung an den Bürsten bei Stillstand bekannt ist; diese muß daher für jeden Motor angegeben werden. Ist sie U_2 , so ist $I_2 = N_2 / U_2 \sqrt{3}$, wenn N_2 die Leistung des Sekundärankers bei Stillstand ist.

Mitunter läßt man die Widerstände mit umlaufen und durch einen selbsttätigen Kurzschließer kurz schließen, sobald der Motor eine bestimmte Geschwindigkeit erreicht hat. In diesem Falle hat der Widerstand nur eine Stufe.

(588) Walzenschalter werden bei elektrischen Straßenbahnen und schweren Betrieben angewendet, ferner häufig in solchen Fällen, wo der Motor fortwährend aus- und eingeschaltet wird. In diesem Falle trägt eine vertikal oder horizontal angeordnete, aus Isoliermaterial (getränktem Holz) hergestellte oder mit Isolation umkleidete Walze eine Anzahl nebeneinander angeordneter, bei höheren Spannungen durch Scheidewände voneinander getrennter Ringe oder Ringstücke, auf denen kräftige abklappbare Bürsten schleifen. Statt der Walze wird besser eine vierkantige eiserne Spindel benutzt, auf der die gußeisernen Halter der Ringstücke mit Schellen isoliert festgeklemmt werden. Mittels dieser Walzen, deren einzelne Stellungen durch eine federnde, in Vertiefungen einer Rastenscheibe einfallende Rolle fühlbar gemacht und gesichert werden, lassen sich nicht nur die einzelnen Stufen des Widerstandes bequem abschalten, sondern es können auch noch Schaltungen zum Umsteuern und Bremsen hergestellt werden. Die Walzenschalter sind in der Regel mit magnetischen Gebläsen ausgestattet, um Stehfeuer, d. h. Stehenbleiben des Lichtbogens an den Kontakten, zu vermeiden.

(589) Flüssigkeitsanlasser bilden eine besondere Gattung der Anlasser; sie bestehen in der Regel aus schmalen gußeisernen, mit Sodälösung gefüllten Gefäßen, in die passend zugeschnittene Eisenbleche eingetaucht werden. Wenn das Blech völlig eingetaucht ist, wird meistens durch einen Metallschalter der Flüssigkeitsanlasser kurz geschlossen. Man kann auch die Bleche ein für allemal in die Gefäße eingesenkt lassen und den Widerstand durch Heben der Flüssigkeit verringern. Für große Leistungen benutzt die AEG eine Pumpe, die die erwärmte Flüssigkeit durch ein Kühlgefäß laufen läßt. Die Flüssigkeitsanlasser zeichnen sich besonders bei größeren Motoren durch Billigkeit aus, doch gestatten sie nicht, den Motor so stoßfrei anzulassen wie die Metallanlasser; der metallische Kurzschluß erzeugt nämlich in der Regel einen stärkeren Stoß. Wegen der Gefahr der Knallgasentwicklung müssen sie bei Gleichstrom gut gelüftet sein.

Für reinen Motorenbetrieb und für Fahrzeugbetrieb, bei denen die Rücksichtnahme auf Beleuchtungseinrichtungen zurücktritt, haben sie aber trotzdem große Bedeutung gewonnen, wobei die leichte Bedienbarkeit aus der Entfernung (Heben der Flüssigkeit durch Druckluft) und die Möglichkeit beliebiger Abstufung als besonders wertvoll erscheinen.

Derartige Flüssigkeitswiderstände werden auch als Schlupfwiderstände im Sekundärkreis von Induktionsmotoren bei Leonardschaltung (436) zur dauernden Regelung der Leistungsaufnahme dieser Motoren angewendet.

(590) Selbsttätige Anlasser. Für Aufzüge und Motoren, die aus der Ferne bedient werden sollen, werden selbsttätige Anlasser verwendet, die nach Schluß des Stromkreises den Ankerwiderstand allmählich ausschalten. Dies kann beispielsweise durch einen Fliehkraftregler geschehen, der bei wachsender Geschwindigkeit mehr und mehr Widerstand abschaltet. Damit der Motor sicher anläuft, darf die gesamte Größe des durch ihn abzuschaltenden Widerstandes nur so groß bemessen werden, daß die volle Ankerstromstärke auftritt. Bei anderen Konstruktionen gleiten die Bürsten, durch ihre Schwere oder eine Feder getrieben und in ihrer Geschwindigkeit durch eine Luftpumpe, eine Ölbremse oder ein Echappement geregelt, über die Kontakte; wieder bei anderen Konstruktionen wird die Klem-

menspannung des Ankers benutzt, um mit Hilfe von Relais die Bewegung der Bürsten zu beeinflussen.

Nach einem Vorschlage von Kallmann (ETZ 1907, S. 495 ff.) baut die AEG Anlasser mit wenig Stufen, die aus Eisendrahtwiderständen in einer Wasserstoffatmosphäre bestehen, sog. Variatoren. Diese haben, wenn sie bis zu schwacher Rotglut belastet sind, die Eigenschaft, daß sich ihr Widerstand bei geringen Änderungen der Stromstärke sehr stark ändert. Beim Einschalten sinkt die anfänglich hohe Stromstärke daher schnell auf den Wert, bei dem der Motor anlaufen soll. Sobald dann mit wachsender Geschwindigkeit die Stromstärke zu sinken beginnt, nimmt der Widerstand des Variators stark ab. Man braucht daher zum Anlassen von kleineren Motoren nur ein bis zwei Variatoren, die nacheinander kurzgeschlossen werden.

(591) Das **Widerstandsmaterial** (Nickelin, Rheotan, Kruppin, Chromnickel, Eisen, Gußeisen u. dgl.) besteht in der Regel aus Draht, Band oder Blech und wird in einfachen gut ventilierten Gehäusen (Massenfabrikation) untergebracht, und zwar entweder in Spiralen oder gewellten Bändern frei ausgespannt (empfehlenswert, wenn gute Kühlung wegen häufiger Benutzung erwünscht ist) oder in geeigneter Weise zwischen Asbest, Glimmer oder dgl. eingepackt (empfehlenswert, wenn hohe Wärmekapazität erwünscht ist). Vielfach wird das Widerstandsmaterial auch unter Öl angeordnet. Überall, wo die Anlasser Erschütterungen ausgesetzt sind, muß dafür gesorgt werden, daß nicht durch Schwingungen Kurzschlüsse der einzelnen Teile miteinander auftreten können. Drahtspiralen sind nur bei starkem Draht und geringer Länge zulässig, dünne Drähte sind auf Porzellanzylinder oder dgl. zu wickeln. Festgepackte Widerstände für schwache Ströme werden aus Blechstreifen hergestellt, die abwechselnd von beiden Längsseiten aus eingeschnitten sind, so daß eine Art Mäanderband entsteht. Ähnlich sind auch die Widerstandselemente aus Gußeisen gestaltet. Schneewindtsche Widerstandsbänder s. (70).

(592) **Materialbeanspruchung.** Wenn das Widerstandsblech oder der Draht frei in der Luft ausgespannt ist, so daß die kühle Luft stets zutreten und die erwärmte frei abziehen kann, so kann man

$$I^2 R = a \cdot F \Delta \vartheta \text{ Watt}$$

setzen, worin a eine Konstante, F die gesamte Oberfläche in cm^2 , $\Delta \vartheta$ die Temperaturdifferenz zwischen dem Material und der Luft in $^\circ \text{Cels.}$ ist. Daraus folgt:

$$\frac{F}{I^2 R} = \frac{1}{a \cdot \Delta \vartheta} = c \frac{\text{cm}^2}{\text{Watt}}$$

c ist die für 1 Watt zur Verfügung stehende Oberfläche in cm^2 . Hieraus folgt für Länge l und Breite b von Blechen bei gegebener Stromstärke

$$b = I \sqrt{\frac{\rho c}{2d}} \text{ cm} \quad \text{und} \quad l = \frac{bd}{\rho} R \text{ cm}$$

wenn d die Blechstärke in cm ist; ferner für die Drahtstärke δ

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{4 \rho c I^2}{\pi^2}} \text{ cm}, \quad \text{woraus} \quad I = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\delta^3}{\rho c}} \text{ Ampere}$$

wenn ρ der spezifische Widerstand in Ωcm ist. Die Größe a steigt mit der Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta$, weil der Luftzug dann stärker wird. Unterhalb 500° kann a gleich $1/150 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ \text{Cels.}$ gesetzt werden, so daß $c = 150/\Delta \vartheta \text{ cm}^2/\text{W}$.

Bei niedrigen Temperaturen — 100 bis 200°C — wird die Wärme hauptsächlich durch die Berührung mit der Luft und nur zum geringen Teile durch Strahlung abgegeben. Bei Widerständen, die eine größere Zahl nebeneinander angeordneter Widerstandskörper enthalten, kommt letztere fast gar nicht in Betracht. Da dann auch die Lüftung geringer ist, so ist zu empfehlen, c etwas größer zu nehmen, als obiger Formel entspricht.

(593) Beispiele ausgeführter Maschinen und Transformatoren.

Übersicht:

I. Stromerzeuger.

- a) Gleichstromgeneratoren, Abb. 297 und 298.
 b) Wechselstromgeneratoren, Abb. 299 bis 306.

II. Motoren.

- a) Gleichstrommotoren, Abb. 307 und 308.
 b) Induktionsmotoren, Abb. 309 bis 315.
 c) Wechselstrom-Kommutatormotoren, Abb. 316 bis 320.

III. Motorgeneratoren, Abb. 321 bis 325.**IV. Einanker-Umformer, Abb. 326 bis 329.****V. Kaskaden-Umformer, Abb. 330.****VI. Transformatoren, Abb. 331 bis 337.****VII. Phasenschieber, Abb. 338.****VIII. Quecksilber-Gleichrichter, Abb. 339.**

Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Abb. 304, 313, 317, 323, 325, 337, 339.

Bergmann-Elektrizitätswerke, Abb. 300, 301, 308, 319.

Brown, Boveri & Co., Abb. 306, 320, 324.

Deutsche Elektrizitätswerke Garbe, Lahmeyer u. Co., Abb. 297.

Elektromotorenwerke Heidenau, Abb. 307.

Fabrik elektr. Masch. u. App. Dr. Max Levy, Abb. 315.

Koch & Sterzel, Abb. 331, 332, 334.

Maffei-Schwartzkopffwerke, Abb. 302, 305.

Maschinenfabrik Eßlingen, Abb. 303, 312, 327.

Maschinenfabrik Örlikon, Abb. 309, 333.

Pöge Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, Abb. 321.

Sachsenwerk, Licht- und Kraft-Aktiengesellschaft, Abb. 310, 314, 329.

Siemens & Halske, Abb. 336.

Siemens-Schuckertwerke, Abb. 298, 299, 311, 316, 318, 322, 326, 330, 335, 338.

Ziehl-Abbegg Elektrizitätsgesellschaft, Abb. 328.

η = Wirkungsgrad, d_a = äußerer Durchmesser, d_i = innerer Durchmesser des aktiven Eisens, l = Gesamtlänge des aktiven Eisens einschließlich Isolation und Luftschlitze, dahinter mit einem Minuszeichen in Klammern die Gesamtlänge der Luftschlitze, v_a , v_k , v_f Umfangsgeschwindigkeiten des Ankers, des Kommutators und der Feldmagnete. J = Trägheitsmoment im absoluten Maßsystem in kgm^2 oder tm^2 (gleich dem vierten Teile des häufig benutzten Schwungmomentes GD^2).

Abb. 297. Gleichstromgenerator der DEW. Garbe, Lahmeyer & Co., A.-G.

500 kW, 450 V, 1110 A, 120 U/min, $\eta = 0,93$. Maßstab 1 : 50.

Anker: Kern d 2250 mm, l 260 (—12) mm, d_i 1780 mm; 324 off. Nuten, (11 × 42) mm² zu 8 Drähten von je 2 × 4,2 mm \odot bl.; Schleifenwicklung, Bandagen Bronzedraht v_a 14,1 m/s.

Kommutator: d 1400 mm, l 310 mm, 648 Stege, 12 × 4 Bürsten v_k 8,8 m/s.

Feldmagnete: 12 Hauptpole, Blech je (30 × 25) cm², je 750 N., 30 H.-Wdg. von je 3,5 mm \odot , bzw. 65 mm² bl.; 12 Wendepole, Blech je 148 H.-Wdg. von je 65 mm² bl.; N.-Wdg. in Reihe, H.-Wdg. parallel; Luftspalt: Hp. u. Wp. je 5 mm; Polbog./Teilg. 0,75.

Gewichte: Feldmagne. 9,8 t. — Anker 7,2 t, $J = 7 \text{ tm}^2$.

I. Stromerzeuger. a) Gleichstromregeneratoren.

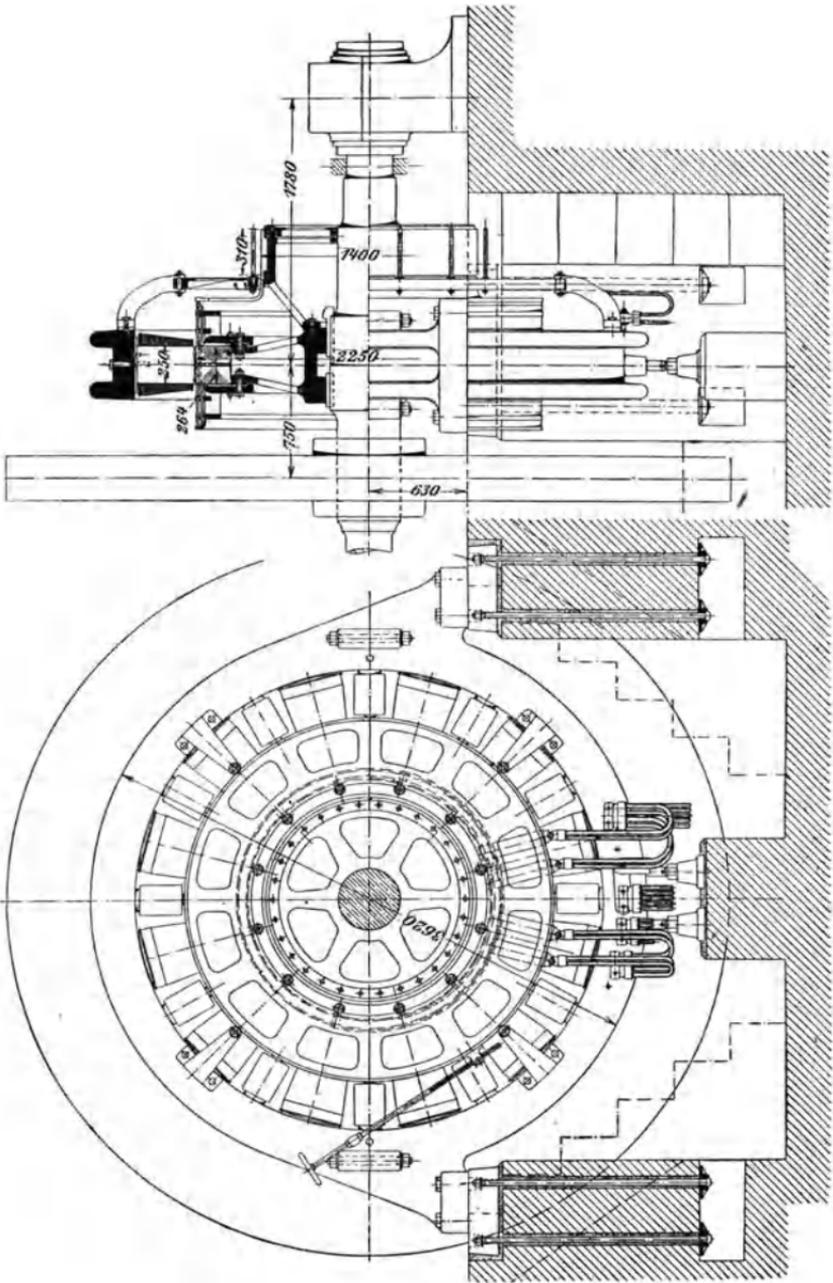


Abb. 297. Gleichstromgenerator der DEW. Garbe, Lahmeyer & Co., A.-G., mit besonderem Schwungrad. (Text s. S. 388.) Maßstab 1 : 50.

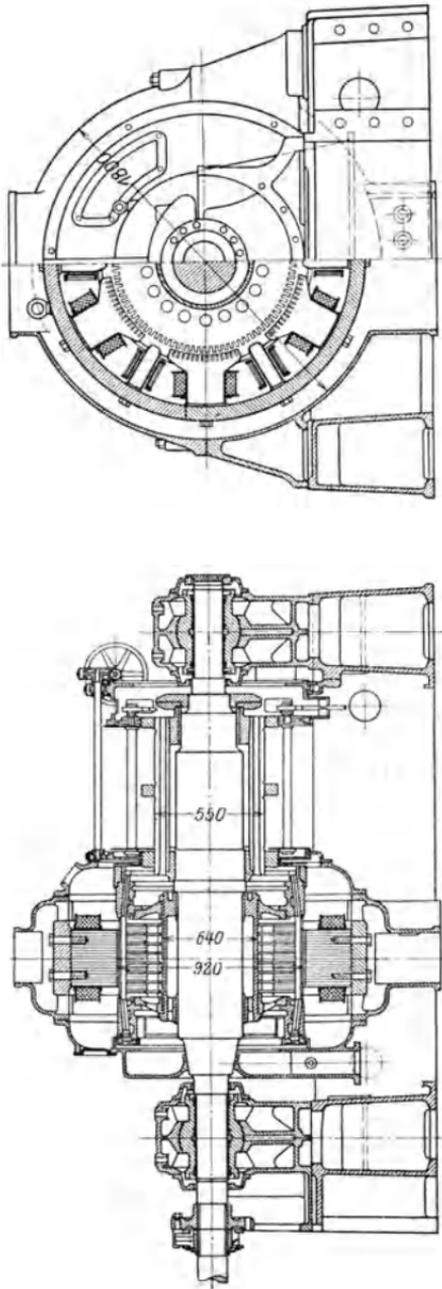


Abb. 298. Gleichstrom-Turbogenerator der Siemens-Schuckertwerke. Modell TG. 370.

700 kW, 580 V, 4210 A, 1500 U/min, $\tau_{71} = 0,928$, Maßstab 4:40.
 Anker: Kern \varnothing 920/640 mm, l 330 mm mit 6 Luftschlitzen von 10 mm, 93 offene Nuten mit Keilverschluß, hoch 40 mm, breit 13,6 mm, Schleifenwicklung mit Äquipotentialverb., 186 Windungen. φ_a 72 mm/s.
 Kommutator: \varnothing 550 mm, l 2 x 250 mm, 486 Stege. 16 Bürsten parallel, Graphit 21 x 22 mm. φ_k 43 m/s.
 Feldmagnete: Joch Stahlguß. Pole aus Blech von 1 mm; in jedem Pol 14 geschlossene Kompensationsnuten (35 mm hoch, 11 mm breit), Nutenteilung $\pi D/126$, 7 Windungen auf 1 Pol, Pole 2fach ||, Kupfer 27 x 8 mm. Erregung 2,1 kW. 6 Hauptpole in Reihe, je 2000 Windungen aus Draht 1,8 mm bl., 2,1 mm isol., Widerst. 16,5 Ω ; 6 Wendepole in Reihe, je 31/2 Wind. aus Kupferblech 130 x 4 mm bl., Widerst. 0,0001 Ω .
 Luftspalt: Hauptpole 10 mm, Wendepole 18 mm. Wendepol- und Kompensationswicklung mit Parallelwiderstand zum Einstellen der besten Kommutierung. — Polbog./Fig. 0,7.

b) Wechselstromgeneratoren.

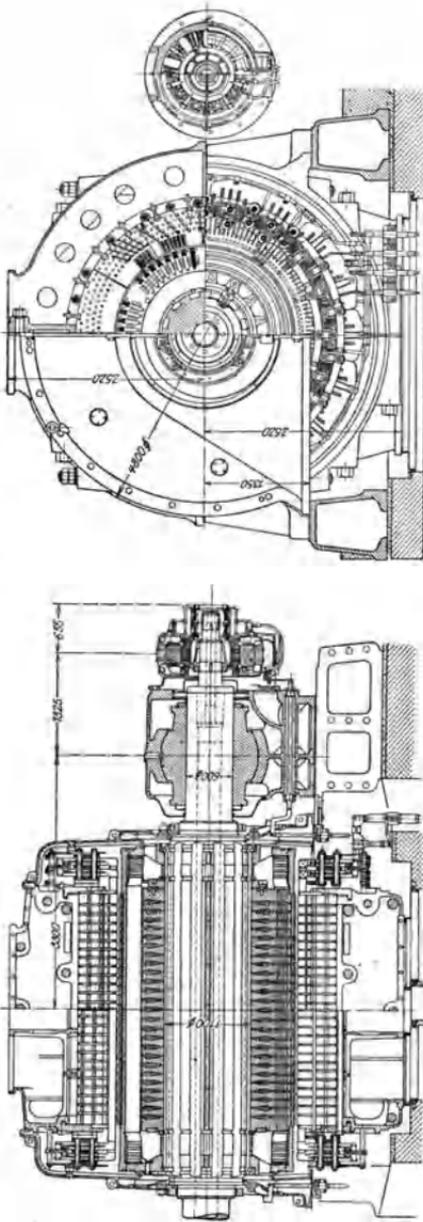


Abb. 299. **Drehstrom-Turbogenerator der Siemens-Schuckertwerke.**

60 000 kVA, 6600/7000 V, 5250/4950 A, 1000 U/min, 50 Per/s. Maßstab 1 : 100.
 Ständer: vierteilig, Kern aus hochlegierten Blechen, 148 halboffene Nuten, einfache Stabwicklung aus unterteilten Leitern mit massiven Verbindungs-
 bügeln. Isolation aus Mikanit. Gewicht des Gubgehäuses 45 000 kg, der Bleche 63 500 kg, der Wicklung 10 000 kg, im ganzen
 145 000 kg.

Läufer: 26 Platten, zusammen 76 000 kg schwer, die beiden äußeren stärker als die übrigen. Kappen aus Chromnickelstahl, aufgeschrumpt.
 Gew. 5000 kg. Stahlschleifringe für 1000 A Erregerstrom. Gewicht der Wicklung 11 000 kg. Welle: \varnothing 4100 mm, 18700 mm, mit Bohrung
 von 300 mm Weite, Gewicht 36 000 kg. Gewicht des fertigen Läufers 104 000 kg. ω 118 m/s. Trägheitsmoment $J = 82,5 \text{ tm}^2$.

Lüftung des Läufers durch Nuten auf der Welle radiale Schlitze und Löcher in den Zähnen, des Ständers durch etwa 400 axiale Löcher, radiale Schlitze
 im Ständer sowie durch Kanäle unter den Ständernuten. Mittlerer Teil des Ständerrückens besonders belüftet. 45 m³/sec Kühlluftbedarf.
 Erregermaschine fliegend angeflanscht, für 220 V, 1000 A.

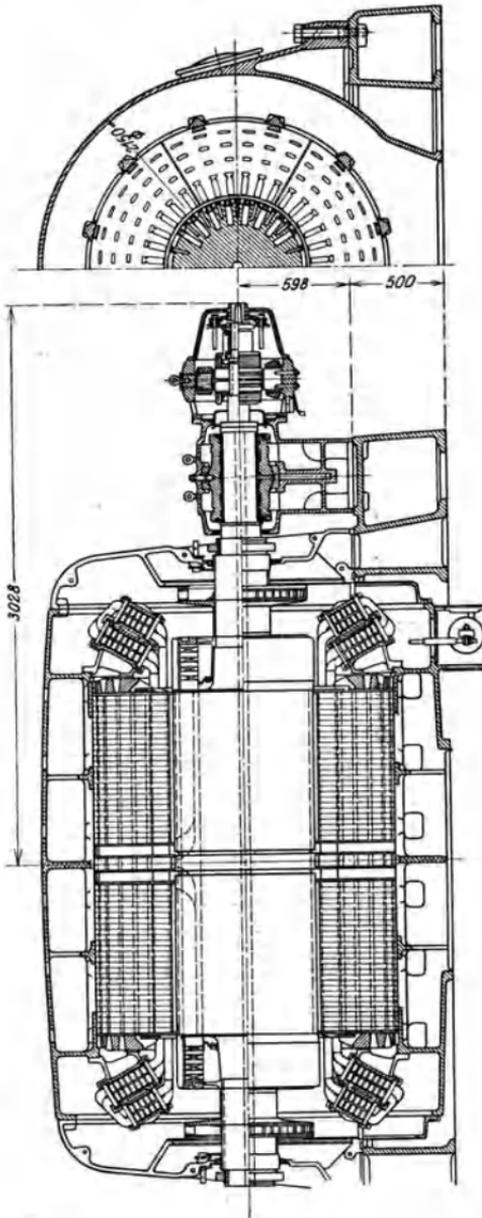


Abb. 300. Drehstrom-Turbogenerator der Bergmann-Elektricitäts-Werke A.-G. Modell T 6250/3000.

6250 kVA, 5500 V, 3000 U/min. 50 Per/s. Maßstab 1 : 42.

Anker: d_a 1600, d_i 784, l 1860 mm. 36 halboffene Nuten (80 mm hoch, 29 mm breit).

Feldmagnet: 40 offene Nuten auf 1 Pol, Widerstand 0,47 Ω /Pol. v_f 120 m/s.

Luftpalt: 19,5 mm.

Gewicht: Feldmagnet 7,5 t, Anker 29,4 t. — $J = 0,55 \text{ tm}^2$.

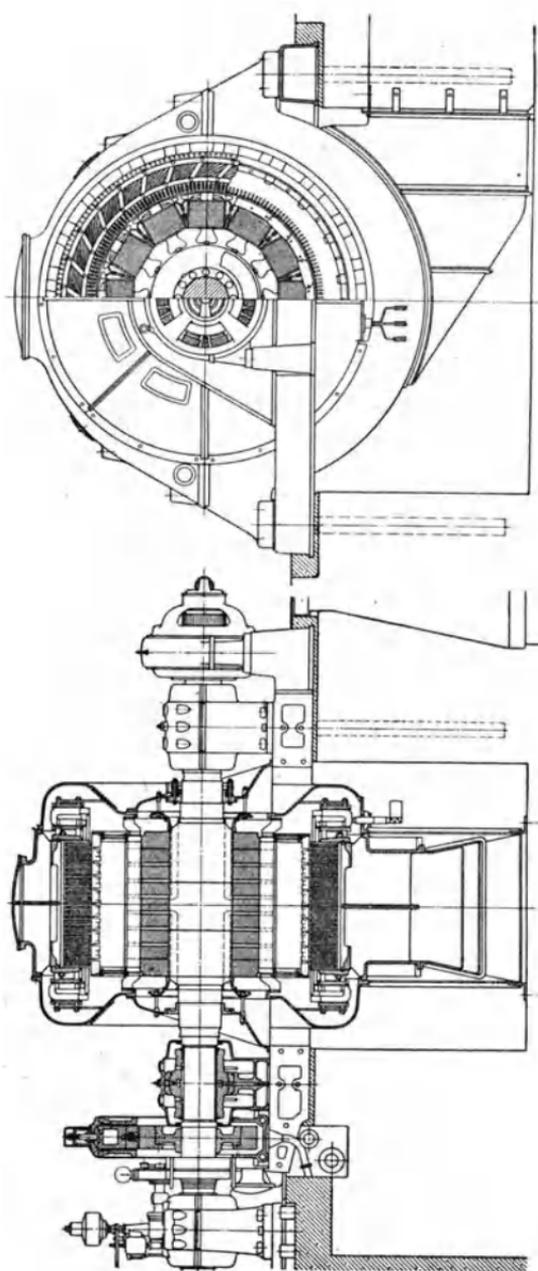


Abb. 301. Schnellaufender Drehstromgenerator der Bergmann-Elektricitäts-Werke A.-G. für das Walchenseewerk.

20 000 kVA, 6600 V, 1750 A, 500 U/min, 50 Per/s. Maßstab 1:100. 12 Pole.

Läufer: 9 Stahlplatten, Pole mit Schwalbenschwänzen befestigt. φ_f 72,5 m/s.

Lüftung: durch Schlitze und Flügel.

Ständer: 180 Nuten.

An der linken Seite hydraulische Backenbremse mit Bremscheibe von 1500 mm \varnothing und 6 Zylindern, deren Kolben mit 18 at auf die Bremscheibe drücken, zum Stillsetzen der Maschine von der Drehzahl beim Durchgehen binnen etwa 1 min.

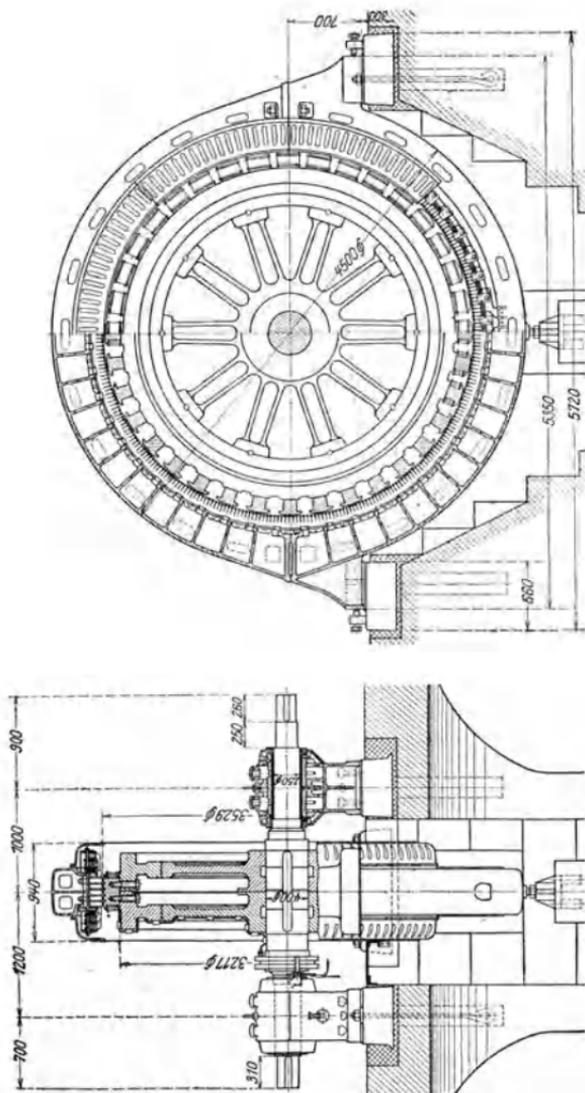


Abb. 302. Schwungrad-Drehstromgenerator der Maffei-Schwarzkopf-Werke. Modell MDG 1150/167.

1150 kVA, 5000 V, 167 U/min, 50 Per/s, Maßstab 1:75.

Anker: Kern d_1 3800 mm, l 280 mm einschl. 4 Luftschlitzen, 324 offene Nuten (50 mm hoch einschl. 6 mm Keil, 15 mm breit). Stabwicklung 6 Stäbe/Nut 31,4 mm² Querschnitt, 324 Windungen, 324 Windungen/Zweig. Formspulenwicklung, kompondierte Spulenseiten mit Glimmerpapier, einseitig 2 mm stark, unpreßt und umbäcken.

Feldmagnete: 36 massiv, Stahlguß, d_1 3529 mm, Polkern: 125 x 270 mm² 60 Windungen/Pol aus 6,5 x 9 mm² blank, 7 x 9,5 mm² isoliert. Widerstand kalt 0,0151 Ω /Pol, Pole in Reihe, Erregung 120 V, 157 A bei $\cos \varphi$ 0,74, Polbogen/Teilung 0,67, φ 31 m/s.

Luftspalt: In Polmitte 5,5 mm, an den Polschuhkanten 13 mm. Die Polschuhe sind nach einer besonderen Kurvenform bearbeitet, um eine praktisch sinusförmige Feldkurve zu erreichen, Polschuhkanten axial schräg gestellt.

Gewichte: Ständer 9,72 t (Kupfer 0,5 t), Läufer 22,5 t (Kupfer 0,95 t).
Trägheitsmoment des Läufers J 150 tm².

Schwungrad aus Stahlguß, senkrecht zur Welle geteilt. — Gebaut und geprüft mit dem 2,6fachen der normalen Drehzahl.

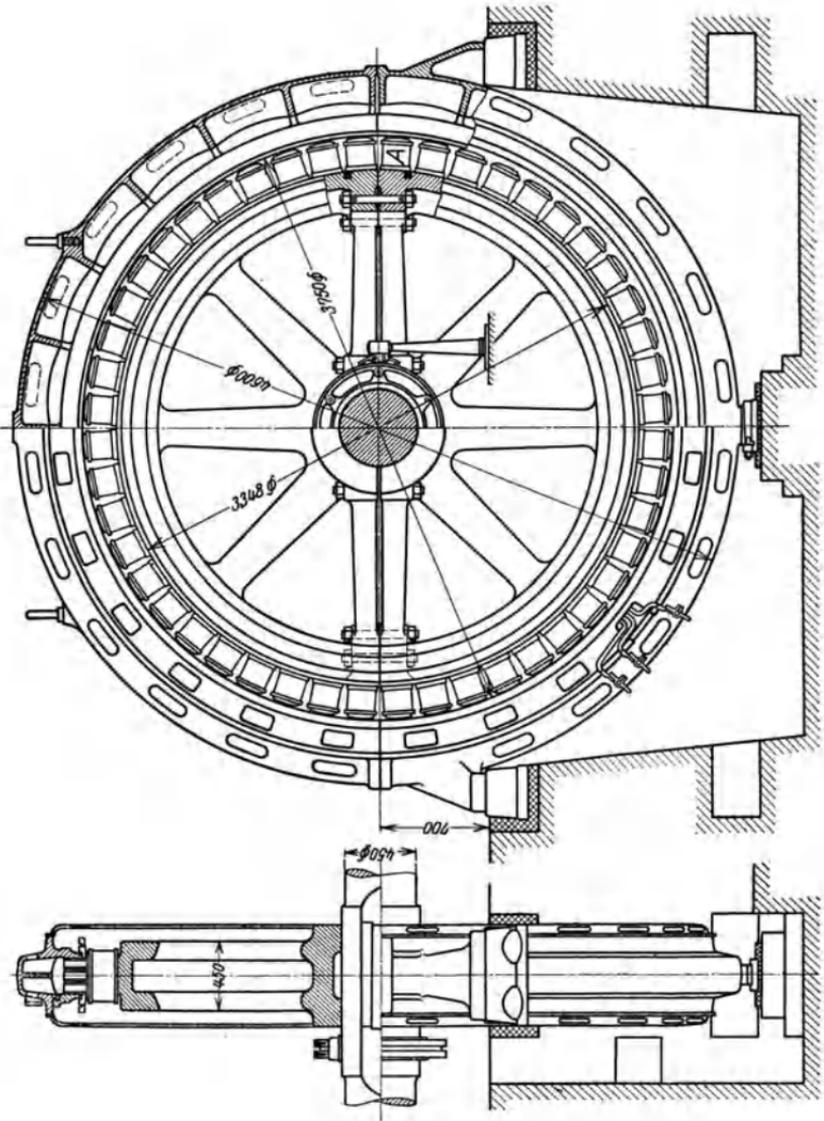


Abb. 303. Schwungrad-Drehstromgenerator der Maschinenfabrik Eßlingen.

700 kVA, 525 V, 770 A, 125 U/min, $\eta = 0,94$ bei $\cos \varphi = 1$, 0,924 bei $\cos \varphi = 0,8$; Maßstab 1 : 50.

Ständer: Kern d_a 4000 mm, d_i 3750 mm, l 240—(2 x 10) mm; 288 halbhohle Nuten, 8,5 mm \varnothing Stabwickelg., 1 Stab je Nut.

Läufer: d_a 3739 mm; 140 Wind./Pol. 2,3 Q/Pol. Erregung 15 kW, 220 V. φ 24,5 m/s.

Luftpalt: 545 mm. — Polbog./Tlg. 0,65. Gewicht: Läufer 13,6 t, Ständer 9,1 t. — $J = 27,2 \text{ tm}^2$.

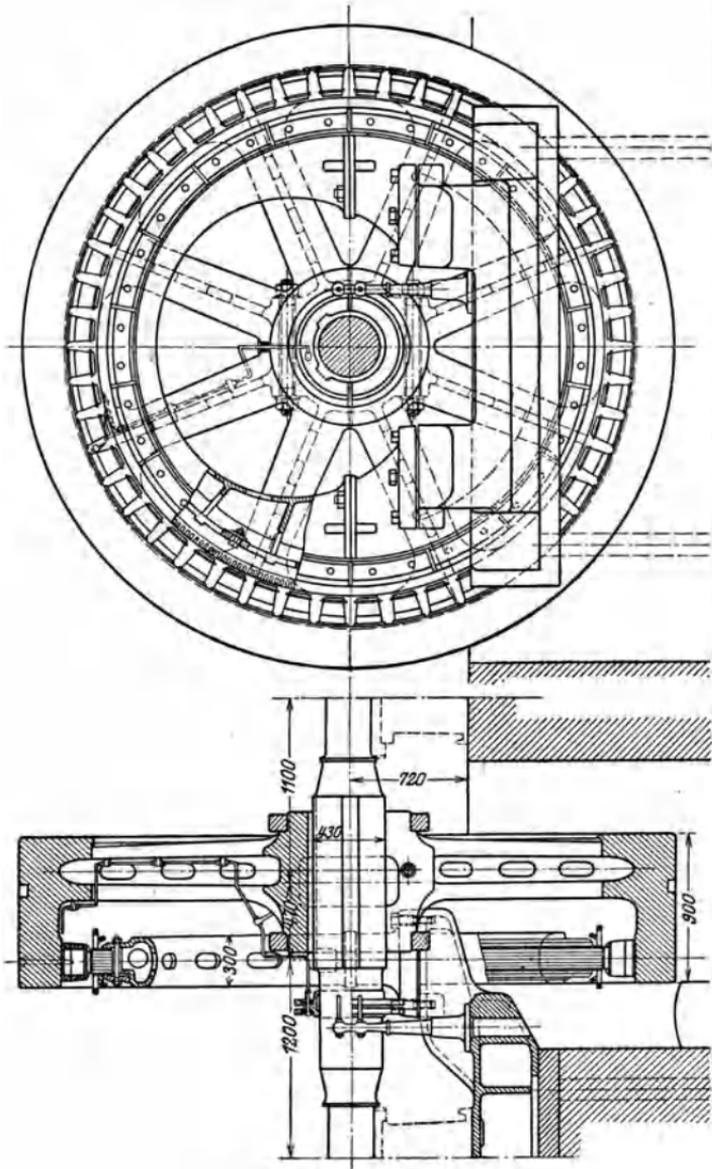


Abb. 304. Schwungrad-Drehstromgenerator der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft mit Außenpolen. Modell AKED 125/190.

228 kVA, 2300 V, 57,2 A, 150 U/min, 60 Per/s, $\eta = 0,915$ bei $\cos \varphi = 1$; Maßstab 1: 47.
 Anker: d_a 3000 mm, d_i 2750 mm, 288 geschlitzte Nuten (40 mm hoch, 15 mm breit), abwechselnd 7 u. 8 Wind/Nut, Sternschaltung.
 Feldmagnet: Ring d_i 3850 mm, d_a 3370 mm, Pole Stahlguß (150 x 98 mm), Joch Gubeisen. Hauptpole 80 Wind/Pol aus 4,6 x 6,4 mm blank, 5,3 x 7,1 mm
 isol., 0,0258 Ω /Pol. Erregung 7,7 kW bei 110 V. φ 30 m/s⁴

Luftpalt: 5 mm. — Polbog./Fig. 0.71.
 Gewichte: Magnetring 550 kg Kupfer, Anker 471 kg Kupfer. — $J = 75 \text{ tm}^2$. Antrieb durch Körtingischen Zwillings-4-Takt-Gasmotor, 2 Zylinder,
 1 Explosion/Umdr. Maschine ohne Dämpfungswicklung.

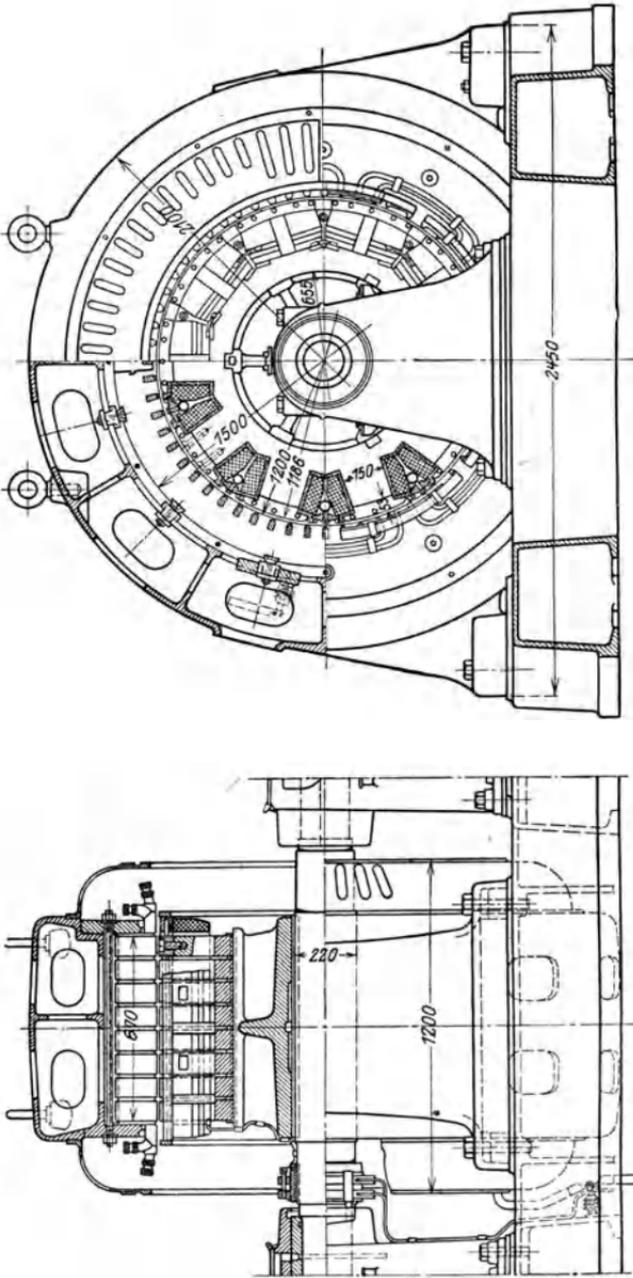


Abb. 305. Drehstromgenerator der Maffel-Schwartzkopff-Werke. Modell DG 1100/600.

1300 kVA bei $\cos \varphi = 0,8$, 2000 V (verkettet), 375 A, 600 U/min, 50 Per/s, $\eta = 0,955$ bei $\cos \varphi = 0,8$, Maßstab 1:28.
 Ständer: d_a 1500 mm, d_i 1200 mm, l einsch. 7 Lüftschl. von 10 mm 670 mm, 60 geschlitzte Nuten (47 mm hoch, 23 mm breit), Stabwicklung mit Verbindungsbügel, 4 Stäbe/Nut, jeder Stab aus 4 Bändern, zus. 120 mm², 40 Windungen/Zweig.
 Läufer: d_a 1186 mm, d_m 1080 mm, d_i 655 mm, l 670 mm, Polkern 900 cm², 120 Wind./Pol aus 5 × 9 mm bl., 5,5 × 9,5 mm isol., Widerst. 0,091 Ω /Pol; Pole in Reihe, Erregung 110 V, 84 A bei $\cos \varphi = 0,8$, η 37,3 m/s.
 Luftspalt: 7 mm. — Polbog./Flg. 0,67.
 Gewichte: Ständer 6,75 t (0,94 t Kupfer), Läufer 4,4 t (0,38 t Kupfer). — $J = 0,7$ tm². Dämpferwicklung, Eigenlüftung, Läufer aus Stahl-scheiben zusammengesetzt.

Abb. 306. Stehender Drehstromerzeuger von Brown, Boveri & Cie. A.-G.
Modell B 6000/42. Maßstab 1:80.

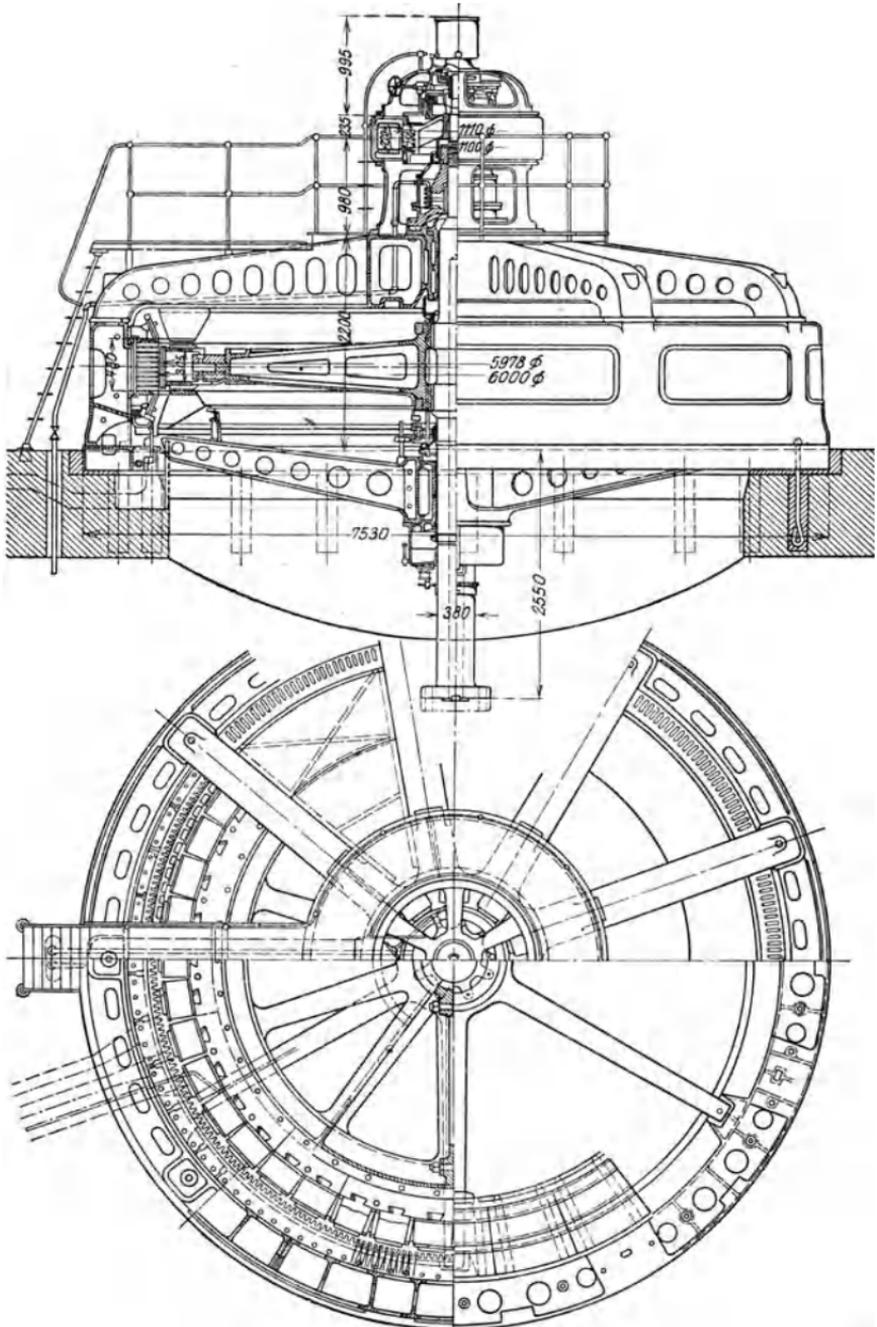


Abb. 306. Text s. S. 399.

II. Motoren. a) Gleichstrommotoren.

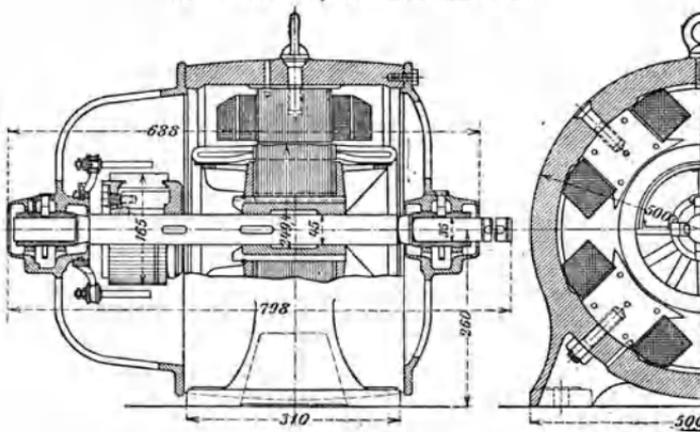


Abb. 307. Gleichstrommotor der Elektromotorenwerke Heidenau G. m. b. H.

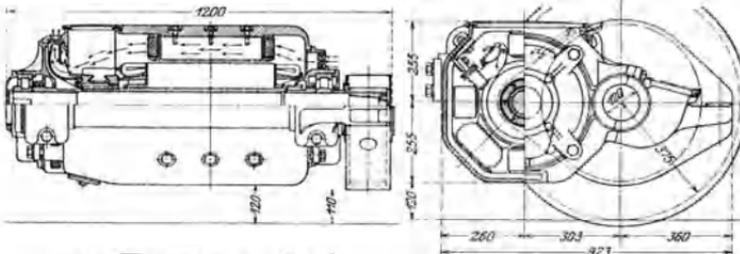
7,36 kW, 110 bis 500 V, 980 U/min, $\eta = 0,98$. Maßstab 1:12,5.Anker: Kern $d_a 249,4$ mm, $l 112$ mm, $d_i 95$ mm; off. Nuten; bei 110 V Schleifenwicklung, bei 220, 440 u. 500 V Wellenwicklung mit Reihenschaltung.Kommutator: $d 165$ mm, $l 85$ mm, 135 Stege, 4 Stifte mit Kohlenbürsten.Feldmagnete: 4 Hauptpole Blech (11×10) cm²; Luftspalt 2,3 mm; Polbog./Tlg. 0,7.

Abb. 308. Gelüfteter Straßenbahn-Gleichstrommotor der Bergmann-Elektrizitäts-Werke A.-G.

40 kW, 550 V, 82 A, 575 U/min, $\eta = 0,88$. Maßstab 1:25.Anker: $d 360$ mm, $l 270$ mm, 37 Nuten, zweigängige Wellenwicklung.Kommutator: $d 320$ mm, $l 100$ mm, 185 Stege, 2 Stifte mit Kohlenbürste $40 \times 12,5$ mm.Feldmagnete: 4 Hauptpole, halb Stahlguß, halb aus Blechen, 10×29 cm².4 Wendepole aus Eisen, 4×23 cm².
Luftspalte: Hauptpole 3,5 mm, Wendepole 9 mm.

Text zu Abb. 306.

5700 kVA, 3200 V, 1030 A, $\cos \varphi = 0,85$, 128 U/min; $\eta = 0,95$. Maßstab 1:80.Anker: Kern $d_a 6480$ mm, $d_i 6000$ mm, $l 480$ mm; 315 off. Nuten (65 mm hoch, 26 mm breit), Stabwicklung, 2 Wind./Nut.Feldmagnet: $d_a 5200$ mm, $d_i 4500$ mm, $l 255$ mm. 38 Wind./Pol aus $5,3 \times 45$ mm, alle in Reihe, $0,16 \Omega$ /Pol. Erregung 55 kW. $v 35$ m/s.

Luftspalt: 11 mm. — Polbog./Tlg. 0,63.

Gewichte: Feldmagnet 34 t, Anker 35 t. — $J = 165$ tm².

II b. Induktionsmotoren.

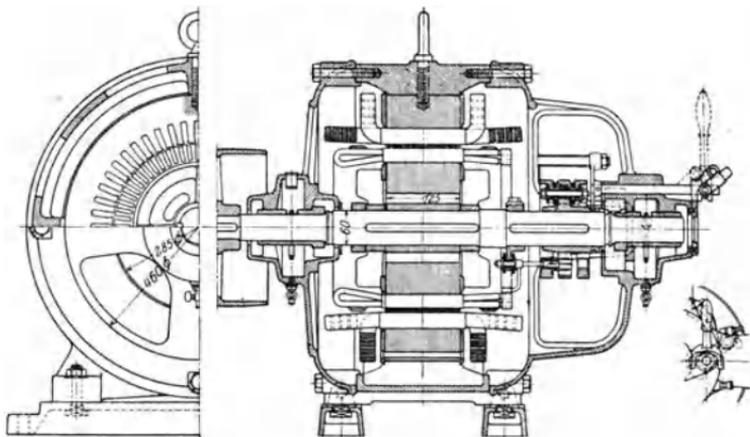


Abb. 309. Drehstrommotor der Maschinenfabrik Örlikon. Modell Gr 24.

22 kW, 500 V, 33 A, 1450 U/min, $\eta = 0,88$. Maßstab 1:13,5.

Ständer: d_a 460 mm, d_i 286,4. 48 halboff. Nuten (30 mm hoch, 10,5 mm br.). Sternschaltung. 14 Drähte (3,4/3,8) in der Nut.

Läufer: d_a 285 mm, d_m 229 mm, d_i 60 mm, l 125 mm; 60 halboff. Nuten (28 mm hoch, 7 mm breit), Wellenwicklung, 3×40 Windungen.

Schleifringe: d 175 mm, breit 22 mm. 3 Bürsten 40×18 mm.

Luftspalt: 0,7 mm.

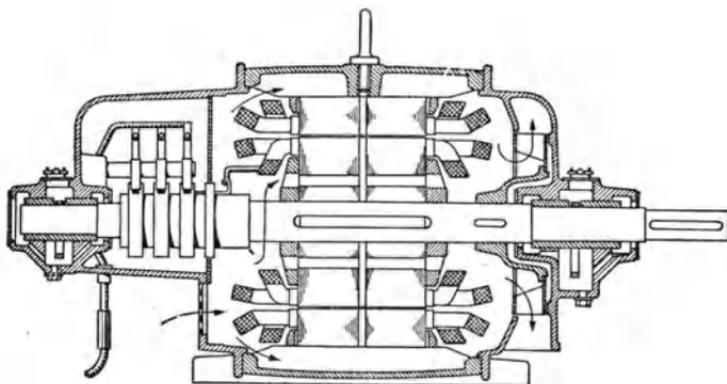


Abb. 310. Drehstrommotor mit gekapselten Schleifringen des Sachsenwerks.

DRP, Typ UD. 3,7 kW, 220/380 V, 14/8,2 A, 1500 U/min weniger Schlüpfung, 50 Per/s, 4 Pole, $\eta = 0,84$, $\cos \varphi = 0,82$, Schlüpfung 0,04. Maßstab: 1:8.

Ständer: d_a 255 mm, d_i 165,8 mm, l 130 mm, 36 halboffene Nuten (Schlitz 2,5 mm, 17 mm hoch, 10 mm breit) mit je 29 Drähten (d 1,6 mm blank), Kupfergewicht 7,0 kg. Stern-Dreieck-Schaltung.

Läufer: d_a 165 mm, 24 halboffene Nuten (Schlitz 2,5 mm, 21 mm hoch, 9,5 mm breit) mit je 2×15 Drähten (d 1,7 mm blank), Kupfergewicht 5 kg. Sternschaltung.

Schleifringe: d 75 mm, Breite 16 mm, Kohlenbürsten 16×15 mm, vollständig gekapselt.

Luftspalt: 0,4 mm. Lüftung durch Flügel.

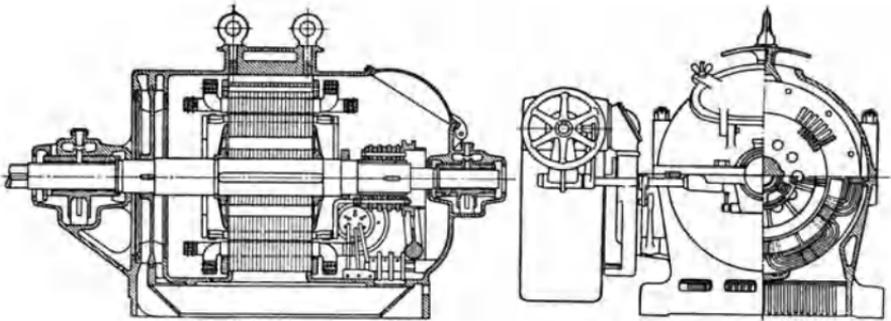


Abb. 311. Gekapselter Drehstrommotor der Siemens-Schuckertwerke mit angebautem Anlasser und Umlaufkühlung.

Länge zwischen den Lagermitten 1200 mm, an der Grundplatte 925 mm, Achsenhöhe 450 mm. Maßstab 1 : 25.

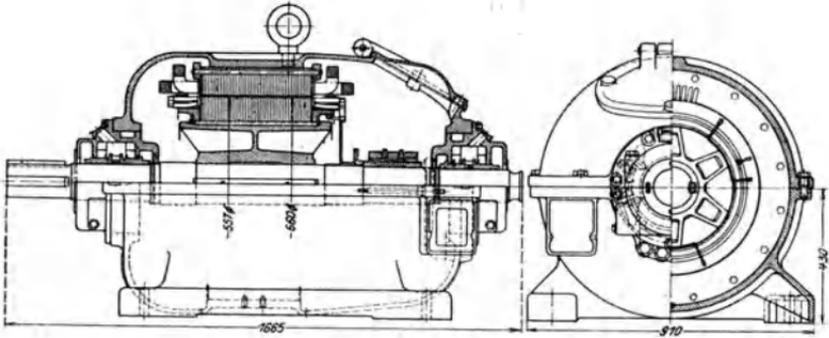


Abb. 312. Drehstrom-Rollgangmotor der Maschinenfabrik Eßlingen, gekapselt.

110 kW, 220/380 V, 400/233 A, 585 U/min, 50 Per/s. Maßstab 1 : 25.

Ständer: Kern d_a 750 mm, d_i 560 mm, l 360 mm, 120 Nuten (hoch 50 mm, breit 8 mm), halb offen, mit je 8 Leitern (4 Drähte ||), d 5,0 mm blank.

Läufer: Kern d_a 557 mm, d_i 400 mm, 150 Nuten (hoch 30 mm, breit 5,5 mm), geschlossen, mit je 2 Leitern, 2 Gruppen || (d 3,5 × 13) mm² blank.

Gewichte: Ständer 1550 kg, Läufer 750 kg.

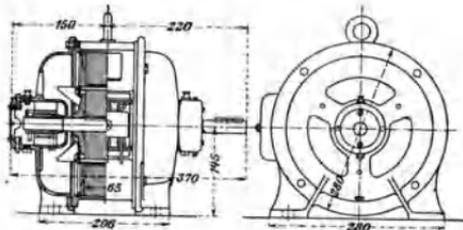


Abb. 313. Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer der Allgemeinen Elektr.-Ges.

0,75 kW, 220 V, 2,86 A, 1420 U/min, 50 Per/s, $\eta = 0,83$, $\cos \varphi = 0,83$. Maßstab 1 : 12,5.

Ständer: Kern d_i 125 mm, l 65 mm, d_a 230 mm.

Läufer: Kern d_i 21 mm, Luftspalt 0,3 mm; Käfiganker.

Gewichte: Ständer 33 kg, Läufer 7,5 kg.

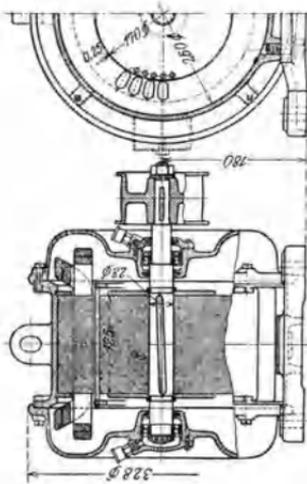


Abb. 314. Drehstrom-Webstuhlmotor mit Kurzschlußläufer des Sachsenwerks.

1,4 kW, 380 V, 2,35 A, 1000 U/min, $\eta = 0,86$ bei $\cos \varphi = 0,83$. Maßstab 1:10.

Ständer: Kern d_a 260 mm, d_i 170,6 mm, l 125 mm, 36 halboff. Nuten (25 mm hoch, 10/12 mm breit). Dreiphasenwicklung, 56 Leit./Nut.

Läufer: Kern d_a 170 mm, d_i 28 mm, l 125 mm; 43 halboff. Nuten (5,8 mm \varnothing). Käfigwicklung.

Luftpalt: 0,25 mm. Gewicht des Motors 82 Kg.
Kugellager und legiertes Eisenblech.

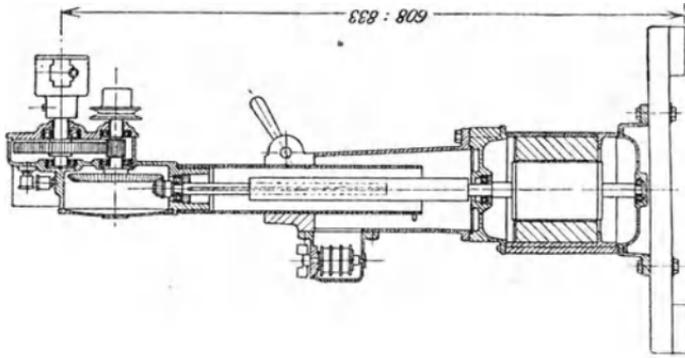


Abb. 315.

Abb. 315. Paßmotor für Drehstrom oder Einphasenstrom der Fabrik elektrischer Maschinen und Apparate Dr. Max Levy.

Maßstab 1:10; mit verstellbarem Vorgelege von 608 mm bis 833 mm Höhe über Boden zur direkten Kuppelung mit Arbeitsmaschinen von beliebiger Wellenhöhe, 0,33 KW, für alle üblichen Spannungen, 1500 U/min weniger Schlüpfung, 50 Per/sec. Die senkrechte Welle ist teleskopartig ausziehbar. Kuppelung mit der Arbeitsmaschine durch eine von 2 Vorlegewellen mit 60 und 300 U/min.

IIc. Wechselstrom-Kommutatormotoren.

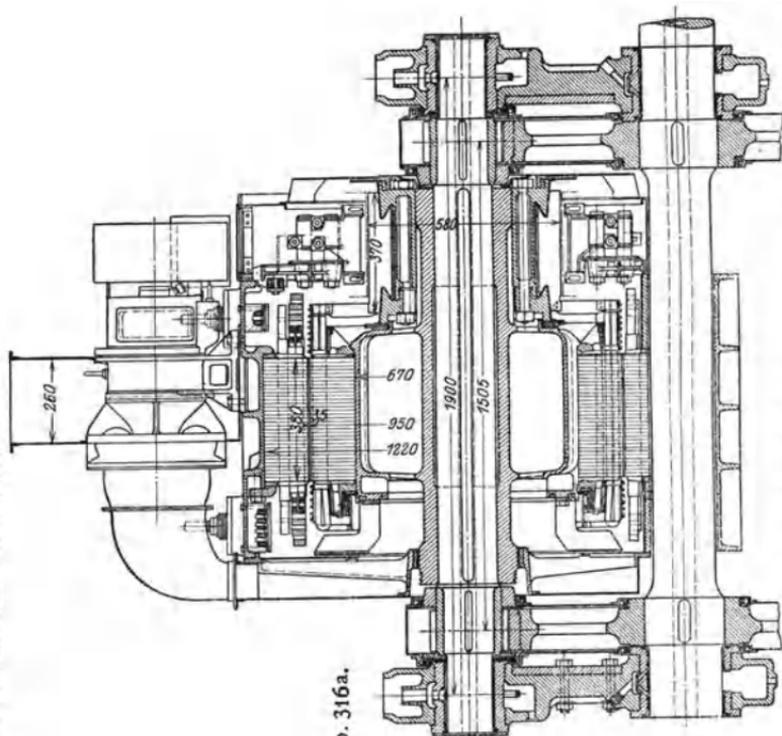


Abb. 316a.

Abb. 316. Einphasen-Reihenschluß-Kommutatormotor für Vollbahnbetrieb der Siemens-Schuckertwerke mit angebaute Ventilator. Modell WBM 800b. Dauerdrehd $445 \text{ kg}^{\text{m}}/\text{min}$ bei $767 \text{ U}/\text{min}$, 348 kW , $16^{\text{A}}/\text{A}$ Per/5, 31.5 V , 1360 A . Maßstab $1:24$. Übersetzung $1:5,19$; Kühlluft $1,5 \text{ m}^3/\text{a}$. Ständer mit Kompensationswicklung und Wendepolen nach Abb. 190, S. 269.

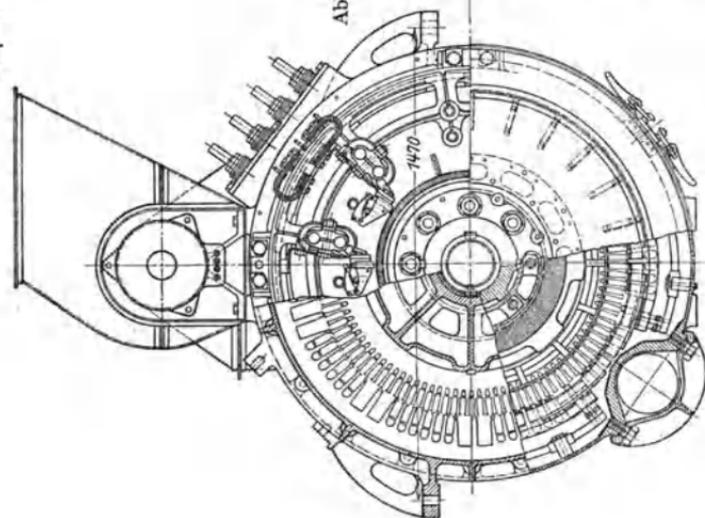


Abb. 316b.

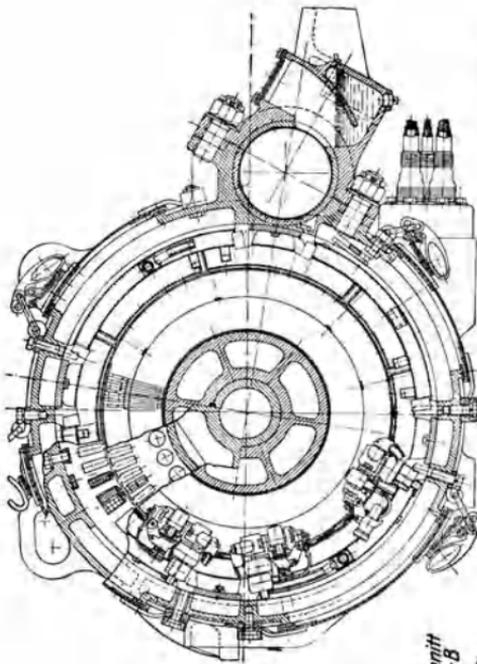


Abb. 317. Einphasen-Hauptstrom-Bahnmotor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. Maßstab 1:23.

186 kW dauernde, 223 kW Stundenleistung, 242/260 V, 320 U/min, 25 Per/s, 8 Pole, 32 Bürsten 11 x 50 mm.

Durchmesser außen	605	796	490
" innen	340	610	
Breite	375	375	225

Läufer Ständer Kollektor
 Schaltung in Reihe mit Parallelwiderstand an der Wendwicklung.

Zu Abb. 318.

Drehstrom-Reihenschluß-Kommutatormotor der Siemens-Schuckertwerke mit Doppelbürsten und Transformator.

Vgl. Abb. 275, S. 358.

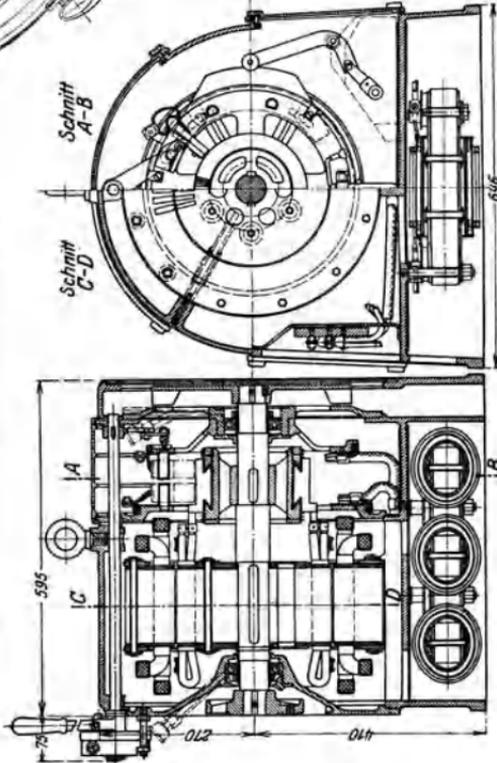
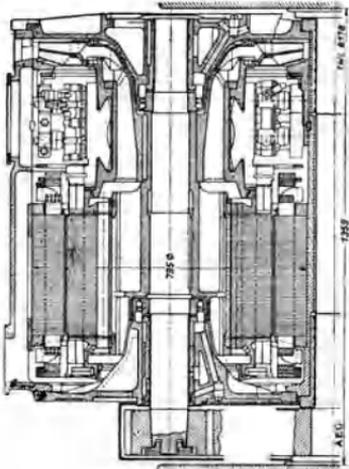


Abb. 318.

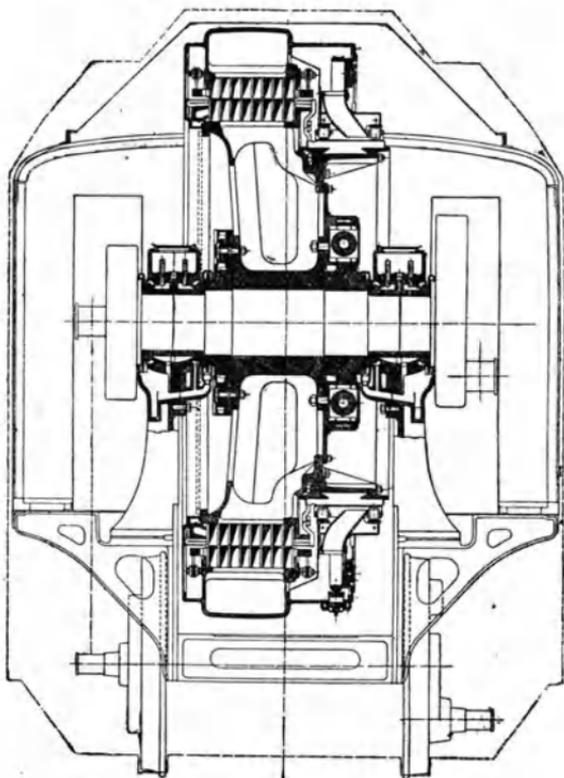


Abb. 319. Vollbahn-Reihenschluß-Einphasen-Kommutatormotor der Bergmann-Elektricitäts-Werke A.-G.

Typ EL 1500. Stundenleistung 2200 kW, 295 V, Stundenstrom 9000 A, Regeldrehzahl 240 U/min, höchste Drehzahl 380 U/min, $16\frac{2}{3}$ Per/s, 36 Pole, Maßstab 1 : 45.

Ständer: zweiteilig, außen d 3350 mm, Bleche d_a 2800 mm, l 400 mm. Nutenabstände nach einem Sinusgesetz wechselnd.

Anker: d_a 2580 mm, l 400 mm.

Kommutator: d 2100 mm, l 450 mm, 216 Kohlenbürsten $12 \times 60 \times 70$ mm.

Gewichte: Ständeroberhälfte 3600 kg, Unterhälfte 3800 kg, Bleche 1900 kg, Wickelkupfer 900 kg. Bürstenring mit Haltern und Kohlen 1500 kg. Anker 9800 kg, Bleche 2000 kg, Wickelkupfer 500 kg. Federung und Dämpfung 2100 kg. Gesamtgewicht mit Federung und Dämpfung 20,8 t.

Lüftung: 7 Schlitze im Läufer und im Ständer.

Anker federnd mit Welle verbunden. Federung (rechts) bestehend aus 12 Satz Pufferfedern, die bei $1\frac{1}{2}$ fachem Stundendrehmoment voll angespannt sind und am Ankerumfang gemessen eine Verschiebung von 20 mm ergeben.

Dämpfung (links) bestehend aus flachen Blechscheiben, die abwechselnd mit dem Ankerstern und der Welle verbunden sind und durch Federn aufeinander gedrückt werden.

Umsteuerung lediglich durch Bürstenverschiebung. — Regelung der Geschwindigkeit im unteren Gebiet durch Spannungsänderung, im oberen durch Bürstenverschiebung.

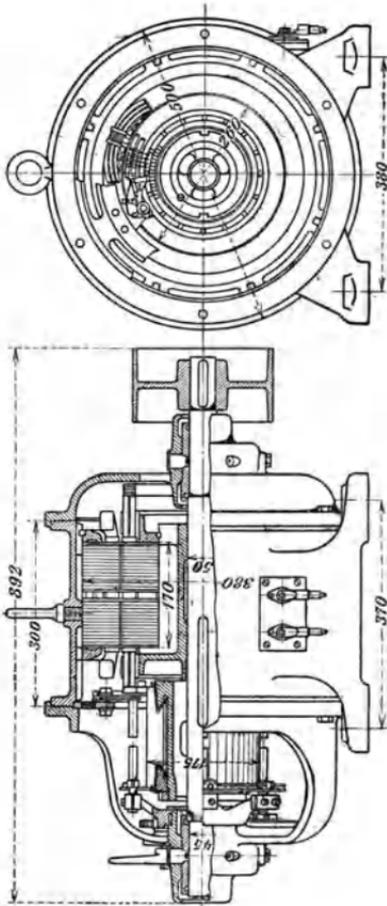


Abb. 320. Einphasenkommutatormotor nach Déri der Brown, Boveri & Cie. A.-G.

Offene Ausführung.

5,15 kW, 400 V, 20 A, 100 U/min, 50 Per/s, $\eta = 0,8$, $\cos \varphi = 0,85$.

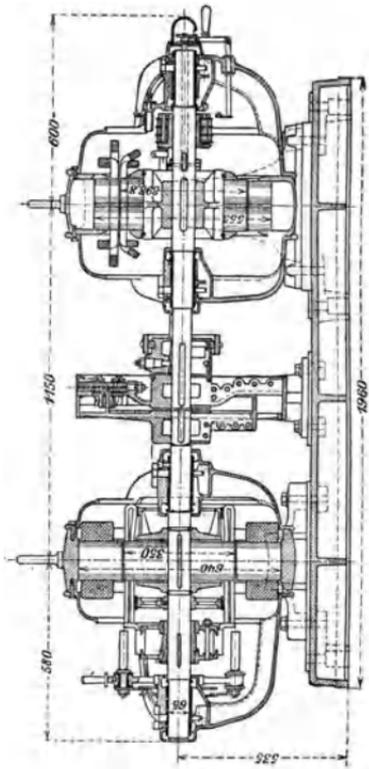
Maßstab 1 : 12,5.

Anker: Kern $\varnothing 258,5$ mm, l 170 mm, d_1 140 mm; 47 halb. Nuten zu 4 Drähten, Wellenwicklung in 2 Stromkreisen; Leerlaufstr./Norm. Str. = 1 : 3.

Kommutator: \varnothing 175 mm, 160 mm, 94 Stege, 12 Bürstenbolzen, davon 6 verstellbar.

Ständer: 6-polig, verteilte Wicklung, Kern \varnothing 380 mm, Luftspalt 0,75 mm.

Schaltung Déri, vgl. S. 365, Abb. 283 k.



III. Motor-Generatoren.

Abb. 321. Asynchroner Drehstrom-Gleichstrom-Motorgenerator der Püge Electricitäts-Akt.-Ges. Maßstab 1 : 25.

I. Drehstrom-Asynchronmotor: 22 kW, 120 V, 133 A, 960 U/min, 50 Per/s, $\cos \varphi = 0,89$.

Ständer: Kern \varnothing 400 mm, l 150 (—10) mm; d_a 555 mm; 54 halb. Nuten zu 7 Drähten.

Läufer: 6-polig, Kern \varnothing 250 mm, Schleifringe Bronze, mit Kurzschl.-Vorr.; Luftspalt 0,6 mm.

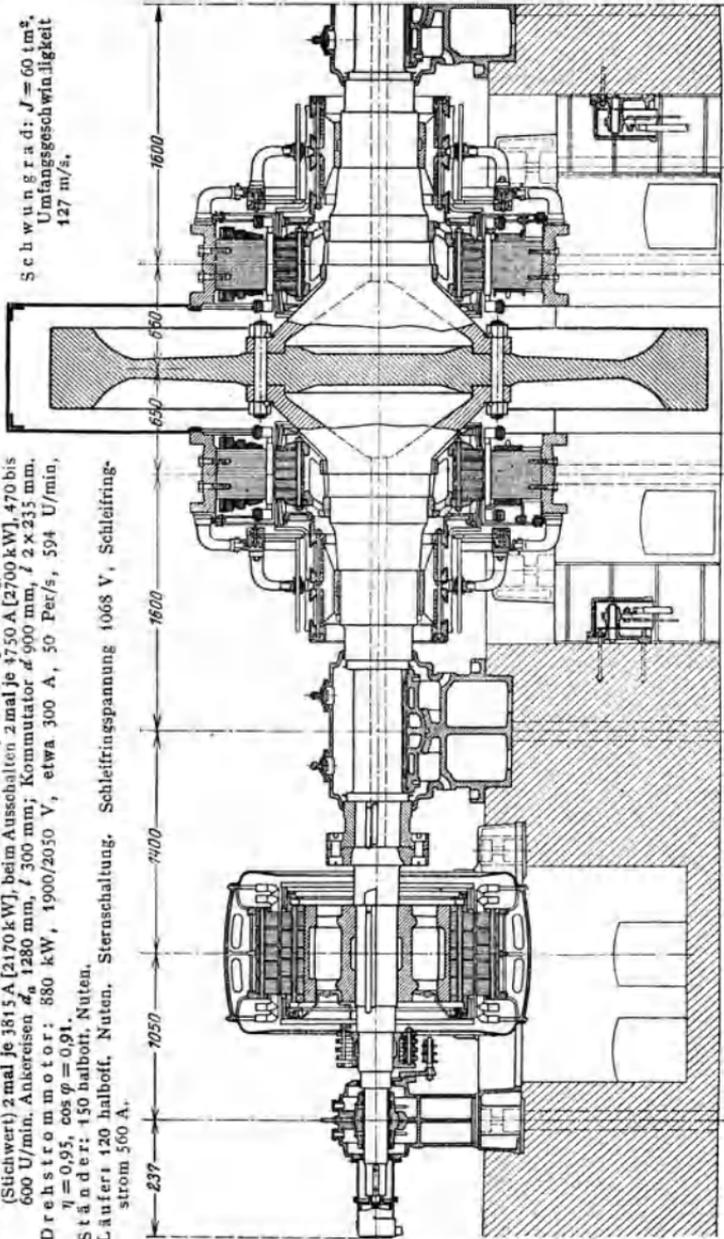
II. Gleichstromgenerator: 21,5 kW, 230 V, 94 A. Anker: Kern \varnothing 350 mm, l 125 mm; d_1 70 mm; 53 halb. Nuten zu je 16 Drähten Schleifenwicklung.

Kommutator: \varnothing 275 mm, 180 mm, 105 Stege, 8 Bürsten.

Feldmagnete: 4 Hauptpole, Blech; Luftspalt 4 mm. Bemerkung: Maschinen durch Reibungskuppelung verbunden.

Abb. 322. Motorgenerator der Siemens-Schuckertwerke, mit schwerem Schwungrad nach Ilgner.
Steueraggregat 2 GM 480 + R 404 600, Maßstab 1 : 45.

Gleichstrommaschinen: 570 V, dauernd 2 mal je 1475 A (840 kW), beim Walzen (Stichwert) 2 mal je 3815 A (2170 kW), beim Ausschalten 2 mal je 4750 A (2700 kW), 470 bis 600 U/min. Ankerkreise d_a 1280 mm, t 300 mm; Kommutator d 900 mm, t 2 x 235 mm.
Drehstrommotor: 880 kW, 1900/2050 V, etwa 300 A, 50 Per/s, 594 U/min, $\eta = 0,95$, $\cos \varphi = 0,91$.
Ständer: 150 halboff. Nuten.
Läufer: 120 halboff. Nuten. Sternschaltung. Schleifringspannung 1068 V, Schleifringstrom 500 A.



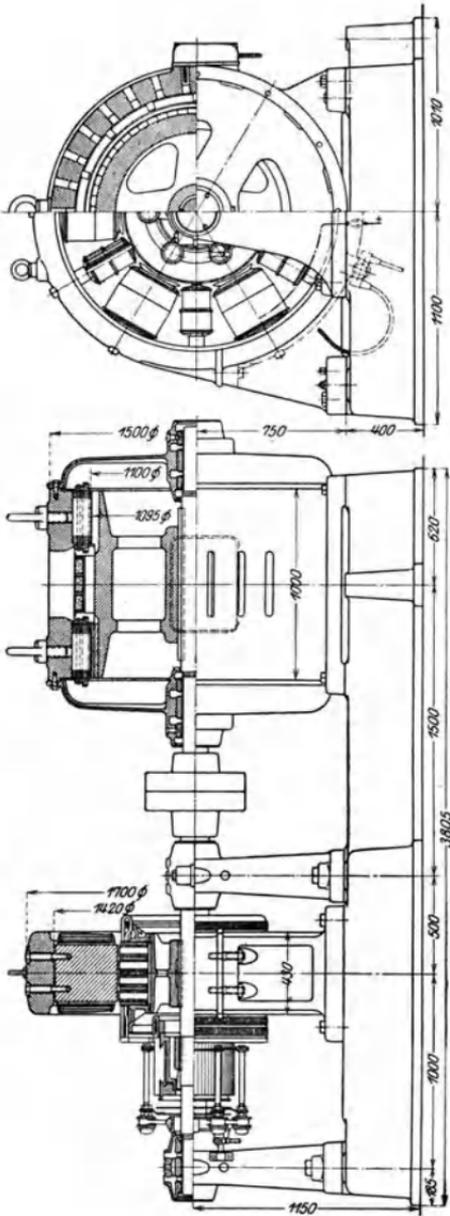


Abb. 323. Unterschrift gegenüberstehend.

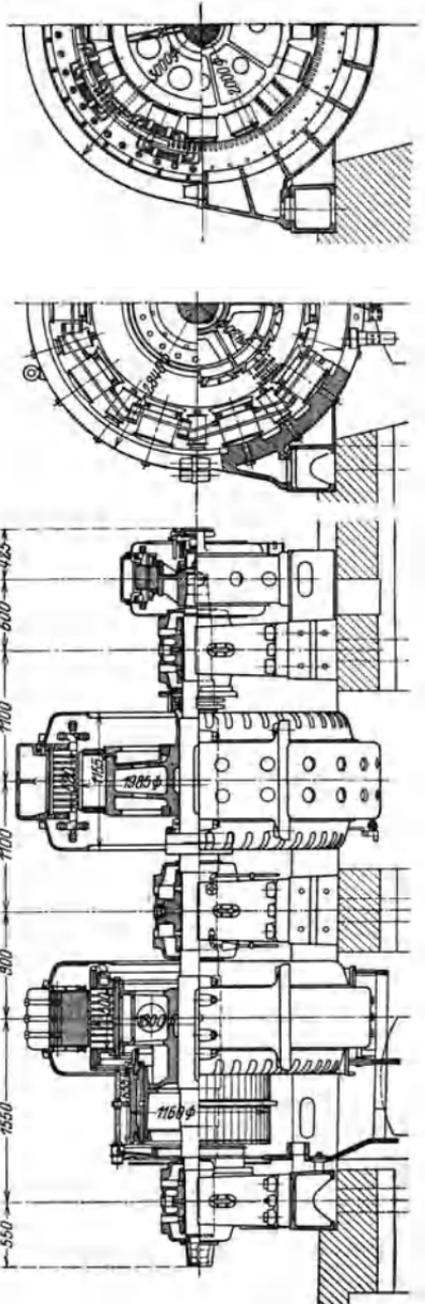


Abb. 324. Unterschrift gegenüberstehend.

Abb. 323. Gleichstrom - Einphasenstrom - Motorgenerator der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. Maßstab 1 : 40.

- I. Gleichstrommotor: Mod. HG 3000, 245 kW, 440 V, 600 A, 750/1250 U/min, $\eta = 0,93$.
 II. Einphasengenerator: Gleichpoltyp, Modell O 1000/350, 250 kVA, 2 x 500 V, 250 A, 375 615 Per/s, 750/1250 U/min, $\eta = 0,925$.

Abb. 324. Synchroner Drehstrom-Gleichstrom-Motorgenerator von Brown, Boveri & Co. A.-G. Maßstab 3 : 200.

- I. Dreiphasen-Synchronmotor, Modell D. — 1850 kW, 3100 V, 370 A, 375 U/min, $\eta = 0,945$. — Anker: Kern d_a 2450 mm, d_i 2000 mm, l 520 mm. 144 halboff. Nuten (hoch 65 mm, br. 22 mm). Spulenwicklung. — Magnetring: d_a 1980 mm, 16 Pole, Erregung 17 kW bei 500 V. — Luftspalt: 10 mm. — Polbog./Teilg. 0,65.
 II. Gleichstromerzeuger, Modell O, 1800/10-polig. 1750 kW, 500/525 V, 3330 A, 375 U/min, $\eta = 0,94$. — Anker: Kern d_a 1800 mm, d_i 1420 mm, l 500 mm. 300 off. Nuten (hoch 43 mm, br. 9 mm). — Schleifenwicklung mit Äquipotentialverbind. an jed. zweiten Stege. — Kommutator d 1160 mm, l 655 mm, 300 Stege. — 130 Kohlenbürsten 25 x 30 mm². — Magnetring: d_a 1800 mm, d_i 1316 mm, Dicke 480 mm, volles Eisen. — Hauptpole: Nebenschluß, alle Spulen in Reihe, 700 Wind./Pol, Draht 2,8 mm \varnothing , 37,6 Ω /Pol. Hauptschluß 1 Wind. mit halbem Strom 30 x 30 mm², 0,000136 Ω . — Wendepole 8 Wind. 20 x 35 mm², 0,000445 Ω . Erregung 60 kW. — Luftspalt: 8 mm. — Polbog./Teilg. 0,69. — Gewichte: Feldmagnet 11 t, Anker 10 t. — $J = 5,0$ tm².

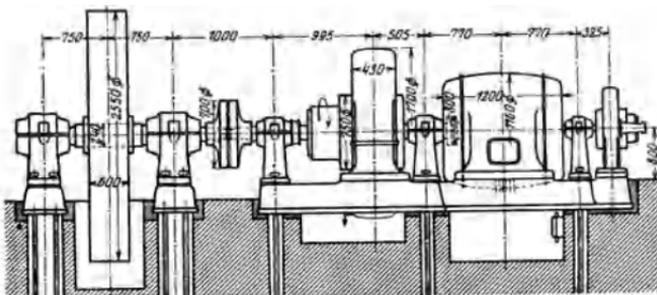


Abb. 325. Asynchroner Drehstrom-Gleichstrom-Motorgenerator der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft mit Igner-Schwungrad. Maßstab 1 : 80.

- I. Drehstrommotor, Modell FD 750/225. 147 kW, 6000 V, 16,5 A, 730 U/min, 25 Per/s. $\eta = 0,925$. — Läufer: Kern d_a 627,5 mm, d_i 420 mm, l 460 mm. 120 halboff. Nuten (hoch 21 mm, br. 10,5 mm). Trommelwicklung, 40 Wind./Zweig. — Ständer: Kern d_a 900 mm, d_i 630 mm, l 460 mm. 72 halboff. Nuten (hoch 48 mm, br. 20 mm). — Luftspalt: 1,25 mm. — Gewichte: Ständer 2,1 t (0,21 t Kupfer), Läufer 1,26 t (0,142 t Kupfer). — $J = 0,05$ tm².
 II. Gleichstromerzeuger, Modell HG 3003. 233 kW, 350 V, 665 A, 730/620 U/min, $\eta = 0,915$ bei 620 U/min. — Anker: Kern d_a 750 mm, d_i 450 mm, l 300 mm. 135 off. Nuten (hoch 38 mm, br. 7,4 mm). 270 Wind., Schleifenwicklung und Äquipotentialverbind. — Kommutator: d 535 mm, l 300 mm, 270 Stege, 6 x 6 Kohlenbürsten 13 x 32 mm. — Feldmagnet: Joch d_a 1700 mm, d_i 1420 mm Gußeisen, Pole Blech. Erregung 3,9 kW. — Hauptpole mit Hilfswicklung für indirekte, d. h. durch Hilfs-erregemaschine vermittelte Compoundierung. Haupt- und Hilfswicklung sind den Drehzahlen des Motors entsprechend unterteilt. 140 + 240 Wind. 2,4/2,7 mm \varnothing und 185 + 188 Wind. 1,45/1,7 mm \varnothing , kalt 10,1 und 27,1 Ω (6 Sp. i. Reihe). — Wendepole mit 9 Wind. 200 mm², 0,004 Ω (kalk). Fremderregung 220 V. — Luftspalt 6/8 mm. Polbog./Teilg. 0,63. — Gewichte: Feldmagnet 230 kg, Anker 114 kg. — $J = 0,09$ tm². — 100% Überlastbarkeit.
 III. Erreger, Modell MPM 150. 15 kW, 220 V, 68,3 A, 730/620 U/min, $\eta = 0,885$. — Anker: Kern d_a 410 mm, d_i 260 mm, l 135 mm. 73 off. Nuten (hoch 20 mm, br. 9,6 mm). Reihenwicklung, 290 Wind. — Kommutator d 300 mm, l 60 mm, 145 Stege, 8 Kohlenbürsten 13 x 32 mm. — Feldmagnet: Joch d_a 850 mm, d_i 750 mm, Dicke 50 mm, Joch und Pole Stahlguß. Nebenschlußwicklung. 920 Wind. aus 1,45 mm Draht, 4,4 Ω ; Hauptschlußwicklung, abwechselnd 8 u. 9 Wind. 2 x 20 mm², 0,00175 Ω /Spule. Erregung: 1,3 kW. — Luftspalt 3,5 mm. — Polbog./Teilg. 0,755. — Gewichte: Kupfer im Feldmagnet 62,5 kg, im Anker 17,1 kg. — $J = 0,05$ tm².
 IV. Schwungrad: Gewicht 10 t, $J = 11$ tm².

IV. Einanker-Umformer.

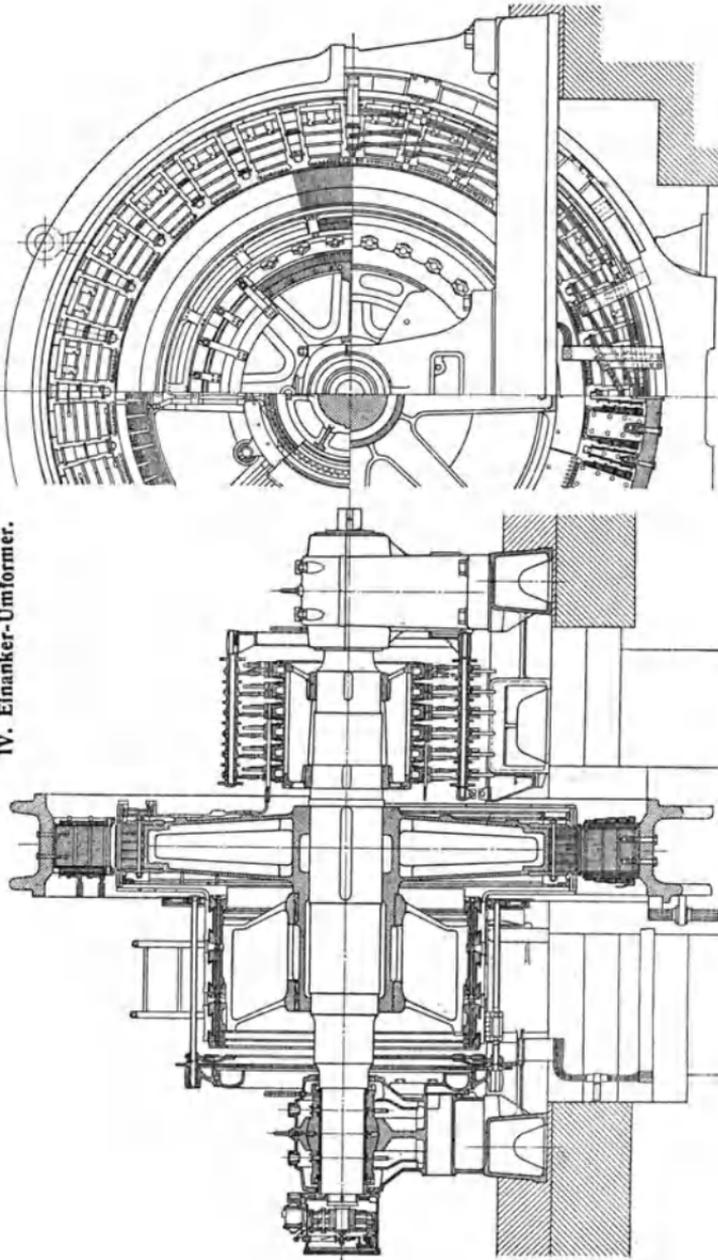


Abb. 326. Sechs-Phasen-Umformer der Siemens-Schuckertwerke.

Modell DUG 801/30, Maßstab 1:60, 5000 kW, 380/520 V, 4500/9600 A, 214 U/min, 50 Per/s.

Feldmagnete: 28 Wendepole, Doppelschlußwicklung, Dämpfungswicklung. — Anker: d_a 3300 mm, l 300 mm. — Gewicht: 46 t.
 6 Doppelschleifringe: d 1200 mm, 2 x 50 mm breit mit je 40 Bronzekohlen-25 x 18 = 450 mm² Querschnitt und je 1 Graphitschmierkohle.
 Kommutator: d 2200 mm, 3 x 300 mm breit mit 28 x 18 = 504 Graphitbürsten 28 x 15 = 420 mm². Wellenspiel-Vorrichtung.
 η = 0,94 bei Vollast einschließlich Transformator und Drehttransformator.
 Anlassen mit Hilfe eines Gleichstrom-Anwurfmotors von 185 kW, 500 V. Eingerichtet für Rückarbeiten von Gleichstrom auf Drehstrom.

Abb. 327. Sechphasen-Umformer mit angebautem, luftgekühltem Drehtransformator für Fernbetätigung der Maschinenfabrik Esslingen.

Modell 8 Ue 900, Maßstab 1 : 50
 500 kW, 750 U/min, $\eta = 0,93$.
 Sechphasenstrom: 6×82 V,
 4060 A, 50 Per/s.
 Gleichstrom: 500 kW, 230 V,
 2180 A.

Anker: Kern d_a 890 mm, d_i 600 mm,
 $l = 290 - 2 \times 15$ mm, 168 offene Nuten
 (hoch 26 mm, breit 6 mm), 2 Leiter je
 Nut, Schleifenwicklung, Kommutator
 $d = 450$ mm, $l = 1040$ (2 \times 520) mm,
 168 Stege, 84 Ausleitverbindungen,
 8 \times 24 Kohlenbürsten, 15×18 mm².

Feldmagnete: 175×300 mm, aus
 Blech (47 000 mm²), 530 Windungen/
 Pol, $d = 3,7$ mm Aluminium blank,
 8 Wendepole, 2 Windungen/Pol, $15 \times$
 50 mm. Erregung 9,7 A, 6 Schleifringe
 aus Bronze, $d = 350$ mm, $l = 60$ mm mit je
 8 Kohlenbürsten.

Luftpalte: Hauptpole 5 mm, Wende-
 pole 18 mm.
 Auf der Welle Ventilatorflügel zur Lüftung
 des Drehtransformators.

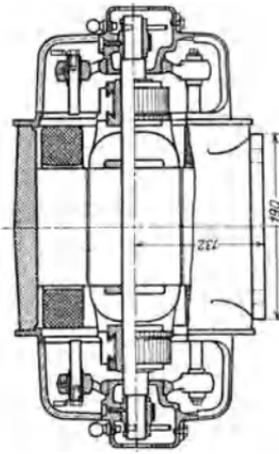
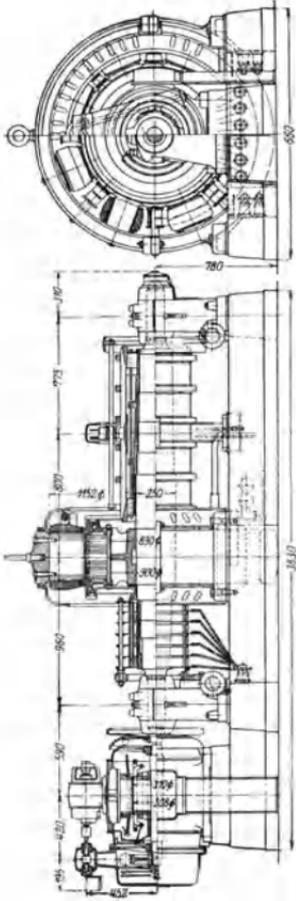


Abb. 328. Gleichstrom - Gleichstrom - (Spar-) Umformer der Zieh-Abegg-Elektrizitätsgesellschaft m. b. H. Modell GU 15.

600 W, 220/60 V, 3,6/12 A, 2000 U/min, $\eta = 0,75$. Maßstab 1 : 8.
 Anker: Kern d_a 95 mm, d_i 25 mm, $l = 120$ mm. 24 halboffene Nuten (hoch 13 mm, breit 5 mm).
 Schleifenwicklung, 10 Windgn. Kommutator \varnothing 55 mm, $l = 30$ mm, 48 Stege.
 Feldmagnete: d_a 245 mm, d_i 200 mm, Dicke 22,5 mm, volles Eisen. Wicklung 2800 Windungen aus
 Draht \varnothing 0,35 mm \odot , Wdst. 440 Ω /Pol.
 Luftpalt: 0,75 mm. — Polbog./Teilg. 0,60. — Gewicht 52 kg.

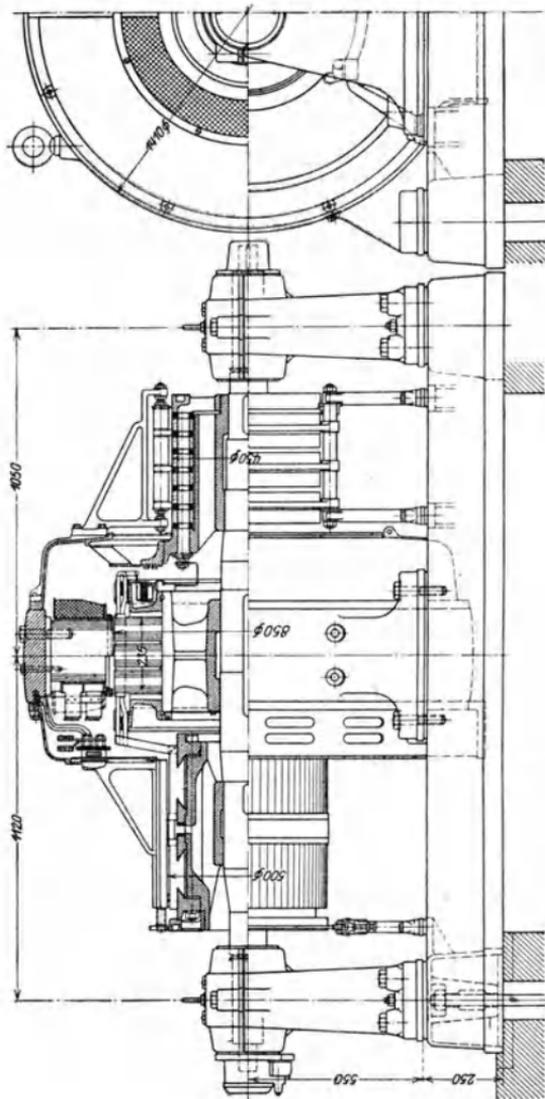


Abb. 329. Sechshebenform der Sachsenwerks.

Sechshebenstrom: 6×90 V, 50 Per/s. }
 Gleichstrom: 450 kW, 240 V, 1875 A. } 750 U/min. $\eta = 0,94$, Maßstab 1 : 25.
 Anker: Kern d_a 850 mm, d_f 550 mm, t 235 mm — 2×10 mm, 96 offene Nuten (35 mm hoch, 13,5 mm breit), 576 Stäbe, Schleifenwicklung.
 Kommutator: 288 Stege.
 Feldmagnete: 8 Hauptpole aus Dynamoblech, Polfläche 140×225 mm², 900 Windungen je Pol, Kupferdraht d 2,6 mm. Erregung 1,6 kW.

V. Kaskaden-Umformer.

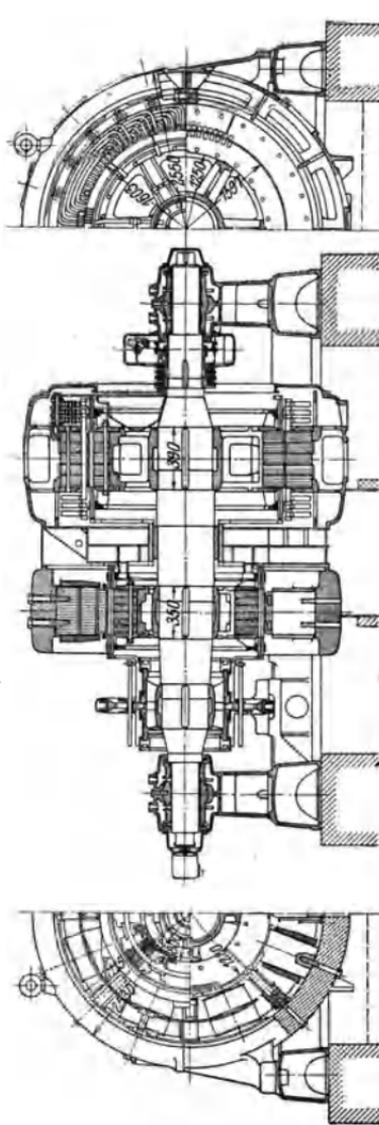


Abb. 330. Kaskaden-Umformer der Siemens - Schuckertwerke.

Maßstab 1:62.

I. Gleichstromseite, ModellDUGK 483/35. 1000 kW, 2 x 220/2 x 265 V, 2270/1880 A, 375 U/min, $\eta = 0,955$.

anker: Kern d_a 1280 mm, d_i 800 mm, l 350 mm, 128 off. Nuten (hoch 50 mm, br. 12,6 mm). Schleifenwicklung mit 12 Äquipotentialverb. — 384 Wind. — Kommutator d 800 mm, l 2 x 280 mm, 384 Stege. — 192 Graphitbürsten $15 \times 18 \text{ mm}^2$.

Mag netri ng: d_a 2530 mm, d_i 2115 mm, Dicke 207,5 mm, 1300 cm^2 Gußeisen. — Pole aus Blech $270 \times 400 \text{ mm}^2$. 8 Hauptpole, 955 Wind., $3,3/3,7 \text{ mm } \varnothing$, 3 \varnothing /Pol. — 8 Wendepole 5 Wind., $160 \times 6 \text{ mm}^2$, 0,000085 Ω /Pol. Erregung 8 kW.

Luftspalt: 6,5 mm. — Polbog./Teilg. 0,7.

II. Drehstromseite, Modell R 482/35. 1000 kW, 5000 V, 127 A, 375 U/min, $\eta = 0,955$.

Läufer: Kern d_a 1597 mm, d_i 1250 mm. 96 halboh. Nuten (hoch 40 mm, br. 32 mm), 12-Phasen, Sternschaltung.

Ständer: Kern d_a 2050 mm, d_i 1603 mm, l 390 mm, 120 halbgeschloss. Nuten (hoch 48 mm, br. 27 mm), 3-Phasen-Spulenwicklung, Sternschaltung. Luftspalt: 3 mm.

VI. Transformatoren.

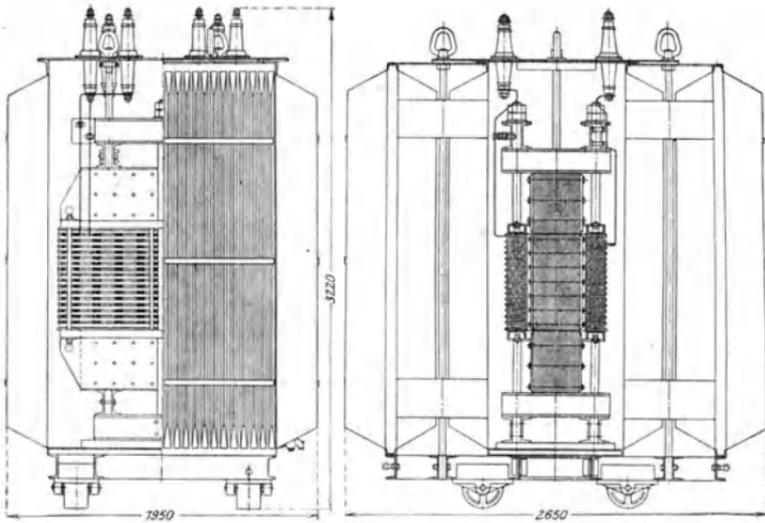


Abb. 331. Einphasen-Öltransformator von Koch & Sterzel.
Maßstab 1:50. Text siehe S. 415.

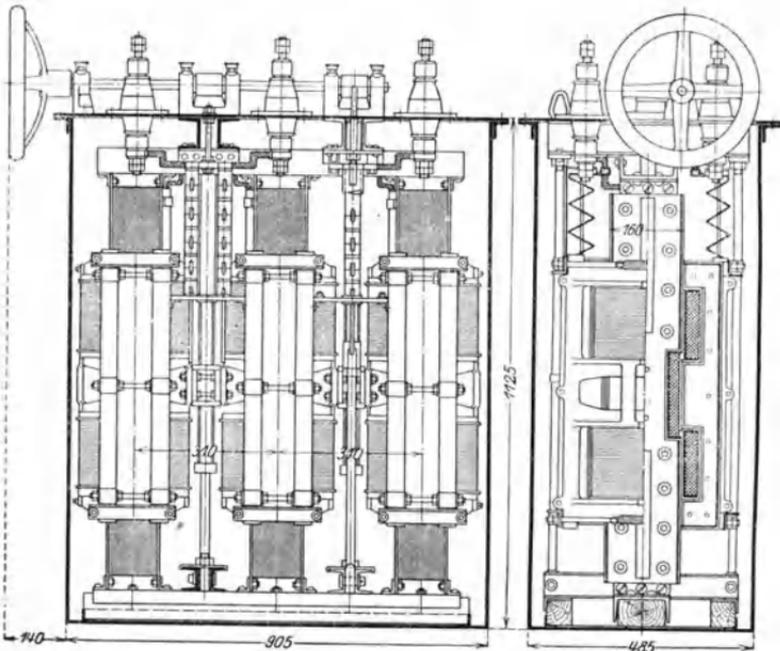


Abb. 332. Verschiebbarer Transformator mit Ölkühlung von Koch & Sterzel.
Maßstab 1:17. Text siehe S. 415.

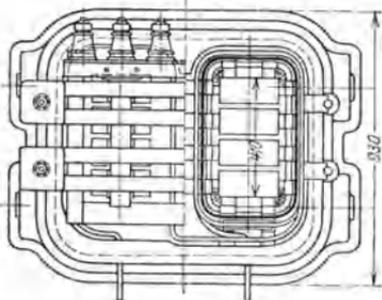
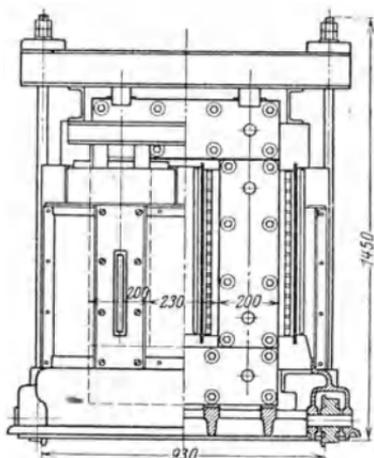


Abb. 333. Einphasen-Transformator der Maschinenfabrik Örlikon mit Luftkühlung. Modell 1754.

600 kVA, 6300/55, 60, 65 V, 97/10 900, 10000. 9250 A, 50 Per/s.
Maßstab 1:26.

Eisen: Blechstärke 0,5 mm, Kernlänge 650 mm, wirksamer Querschnitt 639 cm², Verlust im Eisen 3,0—3,5—4,08 kW.

Wicklung: Draht I 39 mm², II 3850 mm², Verlust 9,57—8,41—7,57 kW. — 2 Spulen in Reihe. Ohmscher Spannungsabfall 1,6—1,4—1,26 %, induktiver 7,8—7,2—6,9 %.

Kühlung: künstl.; Luftmenge 100 m³/min bei etwa 40 mm Wassersäule.

Gewicht: Transformator allein 1,685 t, Gehäuse 0,745 t, zusammen 2,43 t. Die Sekundärwicklung besteht aus 7 parallelen nackten Kupferbändern von 2 mm Dicke und 275 mm Breite.

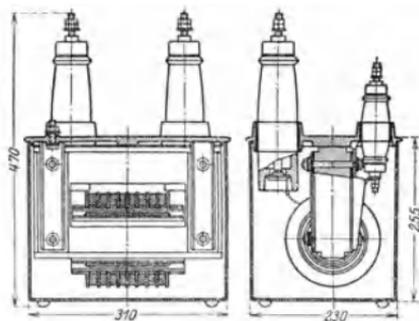


Abb. 334. Einphasen-Spannungswandler von Koch & Sterzel. Typ CPM II.

Maßstab 1:12,5.

400 VA, 6000/100 V bei 1 % Spannungsabfall, $\cos \varphi = 1$ u. 100 VA. 50 Per/s. Masse-Isolation.

Eisen: Blechstärke 0,35 mm, effektiver Kernquerschnitt 26,6 cm². Kern gefalzt. Eisenverluste etwa 23 Watt.

Wicklungen konzentrisch ineinander auf einem Schenkel, primär 10680, sekundär 180 Windungen. Kupferverluste etwa 18 Watt.

Gewicht: betriebsfertig 38 kg.

Abb. 331. Einphasen-Öltransformator von Koch & Sterzel.

Typ COS 2300/30 m. Ölkonservator.

Maßstab 1:50.

2300 kVA, 3150/20 000—22 000 V, 732/114—104 A, 50 Per/s.

Eisen: Blechstärke 0,35 mm, Papierisolation, Kernquerschnitt 795 cm² effektiv, Jochquerschnitt 1020 cm² effektiv, aktives Eisengewicht 2364 kg, Eisenverluste 7,7 kW.

Wicklung: Scheibenwicklung, primär 128, sekundär 896 Windungen, Kupferverluste 22,2 kW.

Spannungsverluste: ohmscher 1 %, induktiver 2,5 %, Kurzschlußspannung 2,74 %.

Wirkungsgrad: 98,7 %.

Gewichte: ohne Öl 7,4 t, Öl 4,1 t.

Kühlung: Selbstkühlung, Kessel mit Kühltaschen.

Abb. 332. Verschiebbarer Transformator mit Ölkühlung von Koch & Sterzel.

Typ DRTO 75, Maßstab 1:17.

60 kVA, 440/0—440 Volt in Dreieckschaltung 50 Per/s.

Kerne: Blechstärke 0,35 mm, Papierisolation, Gewicht 3 × 132 kg. Eisenverluste 310 W.

Wicklung auf jedem Kern: 2 Außenspulen mit je 2 × 153 Windungen, 1 Innenspule mit 154 Windungen. Kupferverluste 2355 W. Verbindungen d. verschiedenen Spulen durch federnde Lagen von Kupferblech.

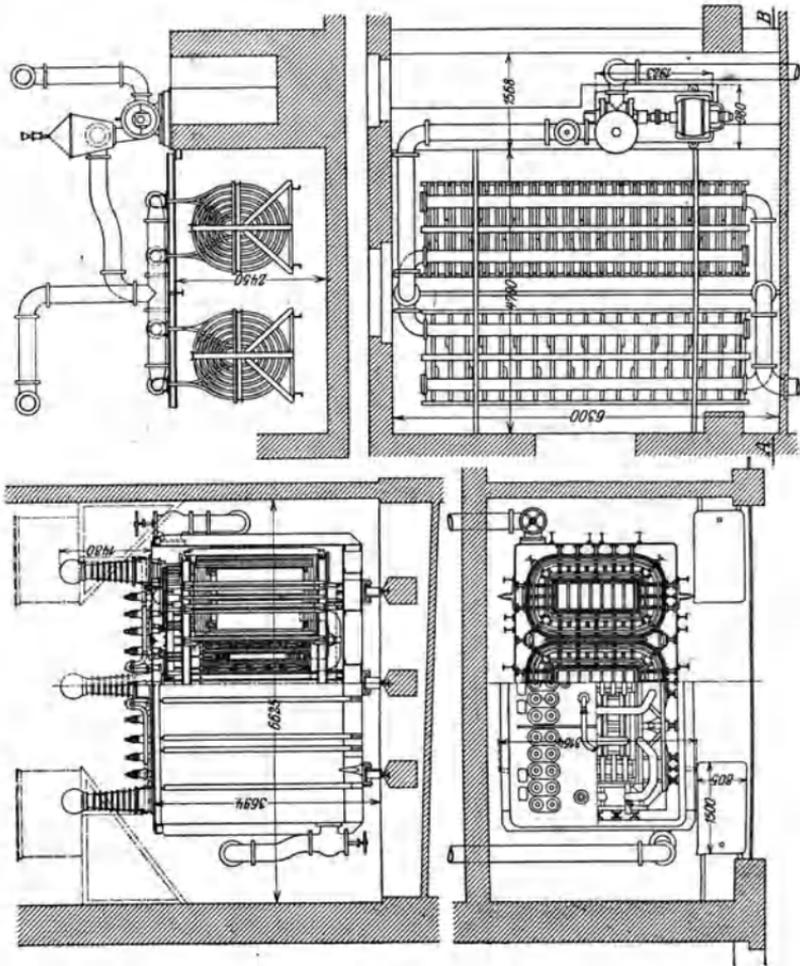
Die verstellbaren äußeren Joche mit Zugfedern gegen den feststehenden inneren Kern gedrückt.

Abb. 335.
**Drehstrom-Transformator der
 Siemens-Schuckertwerke**
 mit äußerer Kühlung des Öls.
 Modell K₂KW 1582/100.

30000 kVA, $\frac{110000}{26000}$ V, $\frac{159,5}{67,5}$ A,
 50 Per/s.

Maßstab 1: 130.

Gewicht d. Transformators, aktive
 u. Konstruktionsteile 51,5 t; Kessel
 8,5 t; Öl 24,5 t, Gesamtverluste
 360 kW, Kühlschlange 750 m. An-
 trieb der Ölpumpe durch Drehstrom-
 motor von 15 kW.



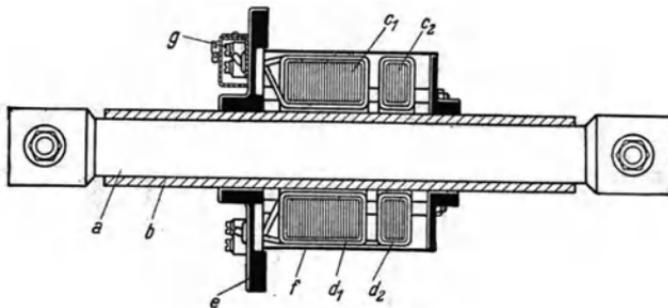


Abb. 336. Kurzschlußsicherer Einleiter-Stromwandler der Siemens & Halske A.-G.

a Primärwicklung, bestehend aus einem geraden, im Zuge der Leitung liegenden Leiter. — *b* Kondensator-Papierrohr. — *c*₁ Ringförmiger Eisenkern, wenig gesättigt. — *c*₂ Ringförmiger Eisenkern, stark gesättigt. — *d*₁ Sekundärwicklung zum Anschluß von Meßgeräten. — *d*₂ Sekundärwicklung zum Anschluß von Überstromrelais'. — *e* Befestigungsschild. — *f* Schutzmantel. — *g* Klemmen. — Primär-Mindeststrom für Meßgeräte 300 A, für Überstromrelais' 50 A. Der Wandler wird in verschiedenen Größen gebaut.

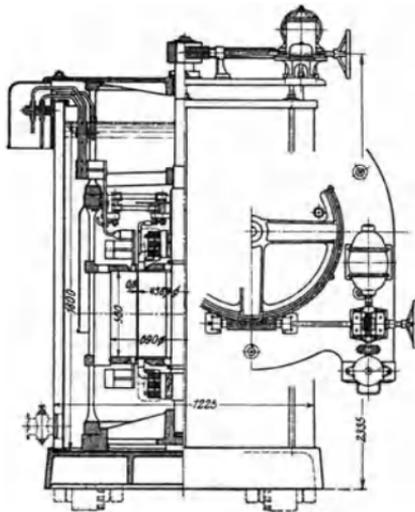


Abb. 337. Drehtransformator der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft mit Ölkühlung.

Modell OP 125. Maßstab 1:40.

115 kVA, 415/±43,5 V, 112/885 A, 50 Per/s. $\eta = 0,96$ bei $\cos \varphi = 1$.

Eisen: Blechstärke 0,35 mm, Isolation Papier, Verlust 2,5 kW.

Wicklung: Drahtstärke I 65 mm², II 440 mm², Verlust 2,2 kW. Schaltung I und II unverkettet.

Kühlung: Öl.

Gewicht: Transformator ohne Ölkasten 3 t, Öl 1,5 t, insgesamt 5,1 t.

Der Drehtransformator ist wie ein Asynchronmotor mit senkrechter Welle gebaut und dient zur Änderung der Spannung eines Einankerumformers, Verstellung von Hand oder durch Hilfsmotor.

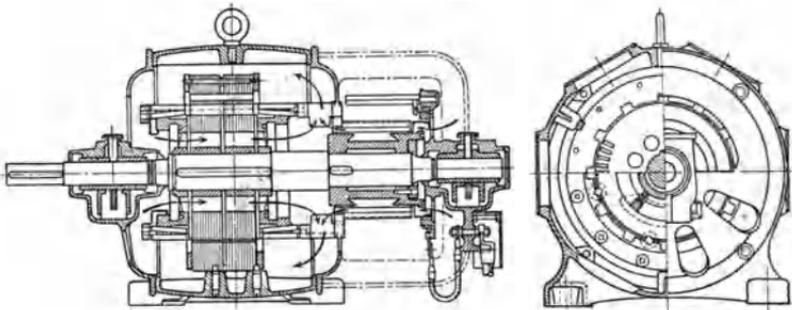


Abb. 338. Phasenschieber der Siemens-Schuckert-Werke. Maßstab 1:22,5.

Typ RDK. 200 l; 15 kVA; 20 V; 430 A; 750 U/min; 1 Per/s.; 4 Pole.

Ständer d_a 550 mm, l 180 (-10) mm, Läufer d_a 400 mm, 112 Nuten (29 mm hoch, 6 mm breit mit je 2 Leitern). Schleifenwicklung $\alpha = 2$, $p = 2$.

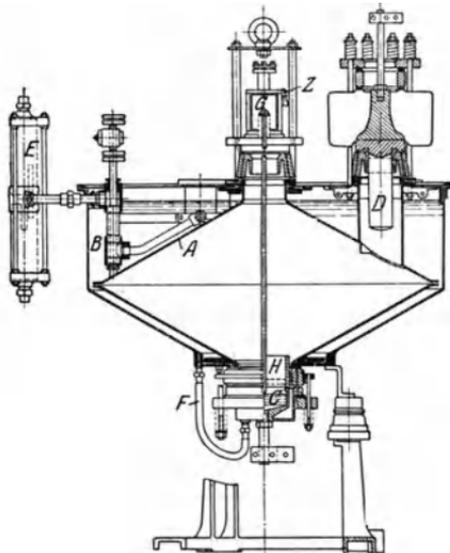


Abb. 339. Quecksilberdampf-Großgleichrichter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Maßstab etwa 1:25.

A Doppelkegelförmiger Arbeitsraum aus geschweißtem Stahlblech.

B Kühlmantel.

C Quecksilberkathode in abnehmbarer Schale.

D Eine der Hauptanoden aus Eisen, umgeben von einem an den Mantel des Arbeitsraums angeschweißten Rohre zum Schutz vor aufspritzendem Quecksilber. Dichtungen mit Hilfe von Blei.

E Kühlwasserleitung, oben Zufluß, unten Abfluß.

F Verbindungsschlauch für das Kühlwasser.

G Zündvorrichtung.

H Zündanode.

Z Anschluß der Zündleitung.

Vierter Abschnitt.

Sammler oder Akkumulatoren.

A. Aufbau und Wirkungsweise.

Allgemein verwendet wird der Bleisammler mit verdünnter Schwefelsäure als Elektrolyt. Für besondere Zwecke, insbesondere für kleinere Leistungen, findet auch der alkalische Sammler Verwendung.

I. Der Bleisammler.

(594) Aufbau. Die positiven Platten des Bleisammlers haben als wirksamen Bestandteil Bleisuperoxyd, die negativen fein verteilten Bleischwamm. Als Träger dient Blei in Form von Platten oder Gittern, welche mit der wirksamen Masse überzogen bzw. gefüllt sind. Hiernach unterscheidet man

1. Platten, deren wirksame Schicht durch elektrischen Strom auf der Oberfläche erzeugt ist (Planté-Platten oder Oberflächenplatten), und
2. Platten, welche durch Eintragung von Bleiverbindungen mit verschiedenartigen Bindemitteln vermischt in gitter- oder rahmenförmige Träger und Umwandlung dieser Verbindungen in wirksame Masse durch elektrischen Strom (Faure-Platten) hergestellt werden. Ist der Träger ein gitterförmiger, so heißen die Platten Gitterplatten, ist derselbe rahmenförmig, so werden sie Masse- oder Rahmenplatten genannt. Der mit einem Bindemittel versetzten Paste von Bleioxyden werden vielfach Körper wie Kaolin, Glaspulver usw. bei Herstellung der negativen Platte zugesetzt, die durch die Tätigkeit der Zelle nicht angegriffen werden und welche ein Schrumpfen des Bleischwammes und dadurch verursachtes Nachlassen der Leistungsfähigkeit dieser Plattenart verhindern.

Die erstere Art, die älteste, wird besonders für positive Platten angewendet, namentlich für ortsfeste Anlagen und für Traktionsbatterien, vielfach auch für Eisenbahnwagen- und Schiffsbeleuchtung, Telegraphenbatterien usw. Die Platten sind schwerer als diejenigen der zweiten Art, können dagegen sehr starke Entladeströme vertragen und auch mit größerer Stromdichte geladen werden.

Die zweite Art wird vorzugsweise für negative Platten, sowie vielfach auch für positive angewandt, letzteres besonders dann, wenn es auf geringes Gewicht der Batterie ankommt, wie bei Elektromobilen, elektrischen Lampen usw. Um das Herausspülen des lockeren Bleischwammes, das bei Zusatz oben erwähnter, chemisch unwirksamer Stoffe leicht eintritt, zu verhindern, verwendet die *Akkumulatorenfabrik A.-G.* die sog. Kastenplatte, eine weitmaschige Gitterplatte, an deren Oberfläche zu beiden Seiten dünnes durchlochstes Bleiblech angegossen ist, so daß die Masse nicht herausfallen kann. Das Gitter selbst besteht bei allen Fabrikaten aus Hartblei mit 4 bis 8% Antimonengehalt.

(595) Der chemische Vorgang bei der Tätigkeit des Sammlers besteht während der Entladung in der Reduktion des Bleisuperoxyds an der +Platte und der

Oxydation des Bleischwammes an der —Platte. Das entstehende Oxyd bildet mit der Schwefelsäure des Elektrolyten schwefelsaures Blei:



Bei der Ladung erfolgt Oxydation an der +Platte und Reduktion an der —Platte:



Es wird mithin bei der Entladung H_2SO_4 verbraucht, bei der Ladung wieder abgegeben, mithin muß das spez. Gewicht des Elektrolyten bei der Entladung sinken und bei der Ladung steigen. Für 1 Ah Entladung werden gemäß obiger Gleichung verbraucht: 3,85 g Blei, 4,46 g Bleisuperoxyd und 3,66 g Schwefelsäure, während 11,3 g Bleisulfat und 0,67 g Wasser gebildet werden. In Wirklichkeit muß eine wesentlich größere Menge von Blei, Schwefelsäure und Superoxyd vorhanden sein, als der theoretisch berechneten Menge entspricht. Das gebildete Bleisulfat ist im Gegensatz zum Blei und dessen Superoxyd ein Nichtleiter. Daher ist eine völlige Ausnutzung der wirksamen Masse durch die wachsende Erschwerung der Stromableitung nicht möglich; ferner wird der innerhalb der Masse befindliche Elektrolyt durch den steigenden Verbrauch der Schwefelsäure immer schlechter leitend.

Die Dichte der Säure wird von der Mehrzahl der Fabrikanten für einen geladenen Akkumulator zu 1,2 angenommen. Bei dieser Dichte, genauer bei 1,22, hat die Schwefelsäure ihre beste Leitfähigkeit. Sammler für tragbare Zwecke, die leicht gebaut sein müssen, und daher besonders enge Plattenstellung haben, erfordern einen Elektrolyten von größerer Säuredichte, bis 1,25 und noch höher. Mit steigender Säuredichte wird die Haltbarkeit der Platten nachteilig beeinflusst.

(596) Die elektromotorische Kraft beträgt rund 2 V; sie ist abhängig von der Säuredichte. Innerhalb 1,10—1,30 spez. Gewicht ist die Ruhespannung des Akkumulators, die der EMK entspricht, fast genau gleich $0,84 + d$, wobei d das spez. Gewicht der Säure bedeutet. Die Ruhespannung beträgt bei einem spez. Gewicht von 1,10—1,20 bzw. 1,94—2,04—2,14. Die EMK ist praktisch unabhängig von der Temperatur.

Die Klemmenspannung bei der Entladung ist abhängig von der Stromstärke. Sie fällt im Laufe der Entladung erst langsam, dann schneller und schließlich plötzlich bis auf 0. Nach dem Einschalten zur Entladung erfolgt zunächst ein plötzlicher Abfall um einige Hundertstel Volt, entsprechend dem Produkt aus Stromstärke und innerem Widerstand. Dann sinkt die Spannung ganz allmählich (Abb. 122, S. 213), welcher Abfall bedingt ist

1. durch den inneren Widerstand des Elementes,
2. durch die Verarmung des Elektrolyten an Schwefelsäure in der wirksamen Masse infolge Bildung von Bleisulfat; die Spannung ist ja abhängig von der Säuredichte,
3. durch das allmähliche Anwachsen des Widerstandes der Masse infolge der Bildung des Bleisulfats.

Der mit der Entladung eintretenden Verarmung an Schwefelsäure wird entgegengewirkt durch eine Zufuhr von neuer durch Diffusion. Ein schnelleres Sinken der Spannung wird dadurch verhindert und die Entladekurve senkt sich ganz langsam.

Zunächst findet die Bildung des Sulfats im wesentlichen in den äußeren Schichten der wirksamen Masse statt und zieht sich mit fortschreitender Entladung weiter in das Innere. Dort wird aber die Zufuhr von Schwefelsäure immer mehr erschwert, da sie nicht nur weitere Wege zurückzulegen hat, sondern auch, weil, da Bleisulfat einen größeren Raum einnimmt als Blei und Superoxyd, die Poren der Masse immer mehr verengt werden. Infolgedessen nimmt gegen Ende der Entladung die Verarmung an Schwefelsäure schneller zu und die Spannung der Platte sinkt daher schneller, bis infolge völligen Mangels die Spannung schnell und plötz-

lich fast auf 0 fällt. Sobald dieser Augenblick bei nur einer Plattenart eintritt, fällt auch die Klemmenspannung des Elementes völlig ab; die andere Platte kann dabei noch Strom abzugeben in der Lage sein. Bei richtiger Bemessung der Platten ist die positive Platte zuerst erschöpft.

Wird nun das Element abgeschaltet, so steigt nach kurzer Zeit die Spannung wieder auf die Ruhespannung, deren Höhe von der nun herrschenden Säuredichte im Element abhängt. Die Ursache dieser Spannungserhöhung ist die erneute Zufuhr von Säure in die wirksame Plattenmasse durch Diffusion, der jetzt kein Verbrauch gegenübersteht. Man kann mithin aus dem Spannungswert einer ruhenden Zelle nicht ihren Entladezustand beurteilen. Der letztere ist im Ruhezustand nur aus der Säuredichte zu schätzen.

Die mittlere Klemmenspannung bei der Entladung ist von der Beanspruchung abhängig. Sie beträgt, wenn der Ladeinhalt (die Kapazität) entnommen wird, in 1h: 1,80 V, in 3h: 1,85 V, in 5h: 1,87 V, in 10h: 1,92 V. Als Endspannung bei der Entladung wird von den Fabriken zugelassen für Entladezeiten

bis zu 2 h und kürzer eine Endspannung von	1,70 bis 1,75 V
bei 3 bis 5 h Entladung eine solche von	1,80 bis 1,83 V
bei 3½ bis 10 h „ „ „ „	1,83 V

Öfters Unterschreiten der Endspannung hat auf die Haltbarkeit nachteiligen Einfluß.

Bei der Ladung findet der umgekehrte Vorgang statt. Das Bleisulfat wird auf beiden Plattenarten zersetzt. Bei Einschaltung zur Ladung steigt zunächst die Klemmenspannung schnell soweit an, als es dem Produkt aus Stromstärke und innerem Widerstand des Elementes entspricht. Dann erfolgt durch Freiwerden der Schwefelsäure weiteres ganz allmähliches Ansteigen. Die Säure wird durch Diffusion fortgeführt. Die äußeren Masseschichten werden zunächst umgebildet, und allmählich zieht sich der Vorgang in das Innere. Sobald der größte Teil des Sulfats zersetzt und in Superoxyd verwandelt ist, dem Strom also nicht mehr in genügender Menge zur Verfügung steht, beginnt die Zersetzung der Schwefelsäure unter gleichzeitig schärferem Anstieg der Spannung. Dieser Vorgang macht sich durch Auftreten einer Gasentwicklung bemerkbar. Sie beginnt bei den positiven Platten zuerst und zwar bei einer 4stündigen gesamten Aufladzeit etwa nach 2½stündiger Ladung. An der negativen Platte entweicht Wasserstoff, an der positiven Sauerstoff, doch tritt die Sauerstoffentwicklung zuerst auf. Die Spannung steigt nun schnell bis zu 2,75 V, worauf ein weiteres Steigen nicht mehr stattfindet. Bei Ladung mit schwächerer Stromstärke ist die Endspannung niedriger, so ist sie z. B. bei 8stündiger Ladedauer etwa 2,6 V. Die Gasentwicklung bedeutet natürlich einen Energieverlust, doch ist häufigeres Aufladen bis zur vollen Gasentwicklung für gute Erhaltung der Platten wenigstens in Zwischenräumen durchaus erforderlich.

Da sich die bei der Ladung aus der Masse der Platten austretende Schwefelsäure im unteren Teil des Elementes ansammelt, dient die Gasung auch dazu, die Säure im Elektrolyten zu verteilen und die Säuredichte etwas auszugleichen. Man ermäßigt aber zweckmäßig den Ladestrom mit Eintritt der Gasentwicklung.

Die Menge des am Ende der Ladung entwickelten Knallgases beträgt für 1 Ah 0,626 Liter bei 0° und 760 mm Druck bzw. 0,7 Liter bei 30°. Die explosions-sichere Grenze der Knallgas enthaltenden Luft liegt bei einem Höchstgehalt von 6 v. H. Wasserstoff, entsprechend 9 v. H. Knallgas. Letzteres muß also mindestens eine 10fache Verdünnung mit Luft erhalten, zweckmäßig nimmt man eine 20—30fache Verdünnung.

Man kann auch mit gleichbleibender niedriger Spannung laden und wählt dazu zweckmäßig etwa 2,3 bis 2,4 V für die Zelle. Hierbei ist die Stromstärke bei Beginn der Ladung verhältnismäßig groß, sinkt aber schnell. Das Verfahren wird vielfach bei elektrischer Eisenbahnwagenbeleuchtung angewendet.

(597) Der innere Widerstand ist sehr gering und beträgt bei größeren Zellen unter $0,001 \Omega$. Mit fortschreitender Entladung steigt er etwas. Für eine Zelle der Type J 3 der Accumulatorenfabrik A.-G. ist der innere Widerstand im geladenen Zustande mit $0,00119$ gemessen und steigt bei Entladung bis $0,00182 \Omega$.

(598) Der Inhalt (Ladeinhalt, Kapazität) eines Sammlers ist die Zahl der Amperestunden, welche die Zelle abzugeben vermag, ehe ihre Spannung unter eine festgesetzte Grenze herabgesunken ist. Die Strommenge, welche der geladene Sammler abgeben kann, ist abhängig von der Entladestromstärke. Setzt man den Inhalt eines Sammlers bei 3stündiger Entladung = 1, so ist derselbe bei 1stündiger Entladung 0,69, bei 2stündiger Entladung 0,82, bei 5stündiger Entladung 1,11, bei $7\frac{1}{2}$ stündiger Entladung 1,23 und bei 10stündiger Entladung 1,34. Auch die Temperatur hat Einfluß und zwar ändert sich der Inhalt um etwa 1% für 1° bei mittlerer Temperatur. Dies findet seine Erklärung darin, daß mit steigender Temperatur die Säure dünnflüssiger wird, infolgedessen findet der Säureausgleich schneller statt und die Entladekurve liegt daher höher, die Ladekurve etwas niedriger als bei mittlerer Temperatur.

(599) Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis der entladenen Wattstunden zu dem zur Ladung aufgewendeten Betrag, in der Praxis etwa 75 v. H., und steigt etwas mit der Temperatur. Der Wirkungsgrad in Strommenge, d. h. das Verhältnis der entladenen Ah zu dem zur Ladung aufgewendeten Betrag, ist etwa 90 v. H. Bei Verwendung von Säure, die mit Metallen, wie Eisen, Mangan, Chrom, Edelmetallen, verunreinigt ist, wird er verschlechtert.

(600) Aufbau der Zellen. Die Platten werden in Gefäße eingebaut, deren Material sich nach Größe und Verwendungszweck richtet. Kleinere Zellen für ortsfeste Anlagen erhalten Glasgefäße, größere Holzkästen, welche innen mit Blei ausgekleidet sind. Tragbare Zellen werden meist in Hartgummigegefäße eingebaut, kleinere auch in Zelluloid (vorausgesetzt, daß die Elementzahl einer Batterie nicht größer als 16 ist), sobald es auf geringes Gewicht und geringe Raumbeanspruchung ankommt. Sonst werden ausgebleite Holzkästen verwandt, oft auch Glasgefäße.

Im Gefäße sind die Platten so angeordnet, daß immer eine + (braune) und eine - (graue) Platte abwechseln. Die Zahl der - Platten ist um eine größer, so daß die äußeren Platten nur aus letzteren bestehen. Die Platten sind genau parallel zueinander eingebaut und werden durch Glasrohre, Hartgummistäbe, Holzstäbe usw. in richtigem gleichmäßigem Abstand voneinander gehalten. Die Accumulatorenfabrik A.-G. verwendet jetzt allgemein besonders behandelte dünne Holzbrettchen zwischen den Platten, welche durch Holzstäbe in ihrer Lage festgehalten werden. Die Holzstäbe haben Schlitz, durch welche die Brettchen durchgesteckt werden.

Abb. 340. Plattenaufhängung in einem ortsfesten Element.

Zwischen dem Unterrand der Platten und dem Gefäßboden ist freier Raum gelassen, der die von den Platten im Betriebe abfallenden Teile aufnimmt. Ist dieser freie Raum von den abgefallenen Bleiverbindungen ausgefüllt, so muß das Element gereinigt werden, da sonst dieser Schlamm leitende Verbindung zwischen den Platten bildet. Der Schlamm besteht aus einem Gemisch von Bleisulfat und Bleisuperoxyd.

Die Platten werden mit besonderen Ansätzen auf Stützscheiben aus Glas hängt, und zwar zweckmäßig so, daß der obere Rand der Stützscheiben außerhalb der Säure sich befindet, so daß sich auf ihm kein Schlamm ansammeln kann. Bei Glasgefäßen hängt man die Platte meist direkt auf den Rand des Gefäßes. Abb. 340 zeigt den Aufbau eines Elements in Glasgefäß.

Die gleichnamigen Platten einer Zelle werden untereinander leitend verbunden. Man richtet deswegen die stromführenden Fahnen der +-Platte nach der einen, die der negativen nach der anderen Seite und verbindet sie durch übergelötete Bleistreifen. Durch Bleistreifen werden die positiven Platten der ersten Zelle untereinander und mit den negativen Platten der zweiten Zelle verbunden usw., wie in Abb. 341 dargestellt. Bei größeren Zellen erfolgt auch die Verbindung nach Abb. 342. Die Lötungen müssen ohne Verwendung von Zinn mit dem Gebläse ausgeführt werden. Nur wo Kupferverbindungen in die Bleileisten eingelötet sind, gebraucht man Zinn, das aber nach außen vollständig durch Blei verdeckt sein muß. Die ortsfesten Zellen werden mit Glasplatten abgedeckt, um die Verdunstung und das Versprühen der Säure zu vermindern, wodurch der Verbrauch an Nachfüllflüssigkeit ganz erheblich verringert und auch bewirkt wird, daß die säurehaltigen Dämpfe nur in geringem Maße in den Raum gelangen.

Für manche Zwecke hat man auch die flüssige Säure durch eine säuregetränkte feste Masse zu ersetzen gesucht, so durch Kieselgallerte, Torf, Glaswolle, ohne nennenswerten Erfolg.

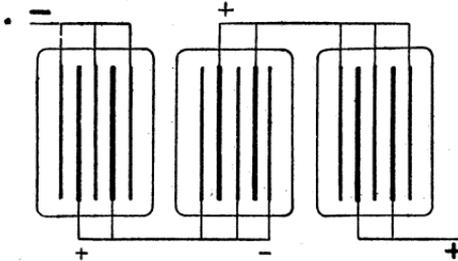


Abb. 341.

Verbindung hintereinander geschalteter Elemente.

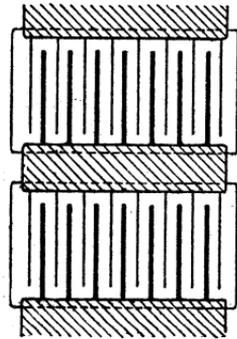


Abb. 342.

(601) Tragbare Akkumulatoren. Bei allen Verwendungsarten für tragbare Akkumulatoren kommt es hauptsächlich auf möglichst geringes Gewicht an, meist auch auf möglichst geringe Rauminanspruchnahme. Infolgedessen werden die Platten in Gefäße aus Hartgummi oder Zelluloid¹⁾ eingebaut, bei Plattenabstand geringer als bei ortsfesten Anlagen genommen und die Platten vielfach leichter gebaut, was ihre Lebensdauer vermindert. Wie weit man mit der Verringerung des Plattengewichtes und des Plattenabstandes geht, hängt im wesentlichen davon ab, wie weit man Wert auf Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit der Anlage zu legen hat. Wo es auf diese beiden Punkte ankommt, wird man möglichst auf große Lebensdauer der Platten und Zuverlässigkeit des Betriebes sehen.

Die Leistung der Batterien für Lokomotiven und Triebwagen mit Oberflächenplatten ist etwa 8 Wh/kg bei 3stündiger Entladung, bei Akkumulatoren für Zugbeleuchtung ca. 10 Wh/kg bei 10stündiger Entladung bei Elementen der *Akkumulatorenfabrik A.-G.* Wesentlich leichter sind die Batterien für den Betrieb von Automobilen, wo Batterien von 28—33 Wh/kg bei 5stündiger Entladung genommen werden.

(602) Akkumulatorenraum. Die Akkumulatorenräume ortsfester Batterien sind derart zu wählen und herzustellen, daß sie in der Nähe des Maschinenhauses gelegen, leicht zugänglich, möglichst hell, trocken, lüftungsfähig und möglichst geringen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind. Sie dürfen keinem anderen Zwecke dienen. Staub oder schädliche Gase und Dämpfe dürfen in den Raum nicht

¹⁾ Dieses Kastenmaterial ist nur zulässig bei Batterien von nicht mehr als 16 Zellen.

eintrreten. Decken und Wände müssen so beschaffen sein, daß kein Mörtel usw. in die Elemente fallen kann. Der Fußboden besteht aus Sand und bestem Trinidad-asphalt ($3\frac{1}{2} : 1$); geringere Asphaltarten sind nicht säurebeständig und daher völlig unbrauchbar. Der Asphaltbelag wird am besten ca. 30 mm dick gewählt. Das Einsinken der Gestelle macht man dadurch unmöglich, daß man an den Stützpunkten der Gestelle säurebeständige Mettlicher Platten in die Asphaltschicht einlegt, und zwar so, daß sie direkt auf dem unteren Grunde ruhen. Die Tragfähigkeit des Fußbodens muß an den Unterstützungspunkten der Batteriegestelle dauernd mindestens 3 kg/cm^2 bei der höchsten im Raume vorkommenden Temperatur betragen. Hölzerne Fußböden werden gut geteert, und zwar mit Steinkohlenteer, da Holzteer nicht säurebeständig ist. Die Batterien sind so aufzustellen, daß man jede Zelle genau besichtigen kann. Man läßt deshalb vor jedem Gestell 0,75 bis 1 m zur Bedienung der Zellen frei.

(603) Isolation. Die Zellen müssen gut sowohl untereinander als auch von der Erde isoliert werden. Das Batteriegestell besteht aus Holz. Ein Aufbau der Zellen in mehreren Reihen übereinander ist möglichst zu vermeiden. Zwischen den Zellen jeder Reihe und zwischen den Reihen selbst läßt man einen größeren Zwischenraum. Unter die Füße des Gestelles kommt Isolation aus Glas oder Porzellan. Die Teile des Gestelles sollen nicht durch metallene Schrauben, Bolzen usw., sondern durch Holzpflocke verbunden werden. Die einzelnen Zellen erhalten nochmalige Isolation, indem man sie auf besondere Isolatoren aus Porzellan oder Glas stellt.

Soll die Isolation einer Sammlerbatterie gegen Erde gemessen werden, so verfährt man nach *L i e b e n o w* (ETZ 1890, S. 360) in der Weise, daß man die Batterie zunächst vom Netz und der übrigen Anlage trennt und hierauf (nach Einschalten einer Bleisicherung) zunächst den einen Pol der Batterie durch einen Strommesser mit möglichst kleinem Widerstand an Erde legt. Man liest den durch den letzteren fließenden Strom I_1 ab und wiederholt dann dasselbe Verfahren am anderen Pol. Ergibt sich hier die Stromstärke I_2 , und ist E die Spannung der Batterie, so erhält man als Gesamtisolationswiderstand der Batterie $R = E/(I_1 + I_2)$. Bei hohem Isolationswiderstand wird ein Galvanometer, sowie eine Hilfsbatterie benutzt, die derart zwischen das Galvanometer und die zu messende Batterie geschaltet wird, daß sich die EMKe beider addieren. Ist der innere Widerstand des Galvanometers = g , der Hilfsbatterie = r , deren EMK = e , so berechnet sich der Widerstand des Isolationsfehlers nach der Formel

$$R = \frac{E + 2e}{I_1 + I_2} - (g + r).$$

Sind g und r nicht bekannt, so legt man ein Galvanometer (Nullinstrument) direkt zwischen Batteriepol und Erde, ebenso die Hilfsbatterie mit dem ersten Galvanometer, vor welches man noch soviel Widerstand schaltet, daß das Nullinstrument keinen Ausschlag gibt. Die Messung wird an beiden Polen ausgeführt und es ist

$$R = \frac{E}{I_1 + I_2}.$$

Die EMK der Hilfsbatterie muß genügend groß sein, um das Nullinstrument mittels des Vorschaltwiderstandes auf Null zu bringen. Je größer der zu messende Isolationswiderstand der Batterie ist, desto kleiner kann die Hilfsbatterie sein.

Es empfiehlt sich, die eisernen Gestänge für die Verlegung der Zellen-schalterleitung und Klemmenverbindungen nicht über den Elementen, sondern über den Gängen anzubringen. Für Flachkupferleitungen werden zweckmäßig Schienen mit abgerundeten Kanten gewählt, die verhindern, daß sich Säuretropfen auf der Oberkante festsetzen und oxydierend wirken. Blanke Leitungen werden mit Öl oder konsistentem Fett, Vaseline u. dgl. vor der ersten Ladung eingefettet und dies von Zeit zu Zeit wiederholt.

(604) Schwefelsäure. Die Säure muß ganz rein sein, besonders frei von Arsen, Salpeter- oder Salzsäure und Metallen der Schwefelwasserstoffgruppe. Sie wird mit reinem Wasser, am besten destilliertem Wasser, verdünnt. Das Mischen der Säure mit Wasser wird in großen Gefäßen vorgenommen. Man gießt die Säure langsam und nach und nach unter Umrühren zum Wasser, nicht umgekehrt; die Mischung erhitzt sich beträchtlich. Am besten bezieht man die Säure in verdünntem Zustande von Säurefabriken, welche besonders sog. Akkumulatorensäure herstellen und für deren Reinheit garantieren. Zum Messen der Säuredichte benutzt man Aräometer. Die Säure ist am Boden der Gefäße unterhalb der Platten gewöhnlich dichter als zwischen und über diesen. Die Säure muß in den Elementen überall genügend hoch stehen. Zum Nachfüllen benutzt man destilliertes Wasser oder stark verdünnte Säure.

(605) Ladung und Entladung. Möglichst bald nach Einfüllen der Säure hat die erste Ladung einer Batterie zu erfolgen. Die Säure wird erst eingefüllt, wenn die Batterie vollständig aufgestellt und die Maschinenanlage betriebsfertig ist. Die Maschine wird in den Stromkreis der Batterie eingeschaltet, sobald ihre Spannung gleich derjenigen der Batterie ist. Der positive Pol der Batterie muß mit dem + Pol der Maschine verbunden sein, was sich leicht mit Polreagenzpapier feststellen läßt. Die Ladung ist beendet, wenn alle Platten lebhaft Gas entwickeln, und diese Gasentwicklung nach einer Stromunterbrechung von $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ Stunde fast unmittelbar nach Einschalten des Stromes wieder einsetzt. Die Farbe der positiven Platten muß dunkelbraun, die der negativen hellgrau sein.

Als Stromstärke für die Ladung wird von den Fabriken die für die Größe der Zelle höchst zulässige angegeben; sie darf aber beliebig niedriger sein. In jedem Falle ist es für die Batterie vorteilhaft, wenn die Stromstärke gegen Ende der Ladung ermäßigt wird, um starke Gasentwicklung zu vermeiden, welche die Platten schädigt und Stromverluste verursacht. Jede Ladung ist so lange fortzusetzen, bis in sämtlichen Elementen beide Plattenarten lebhaft Gas entwickeln, und der Betriebswärter muß gegen Ende jeder Ladung nachsehen, ob in allen Elementen gleichmäßig und zu gleicher Zeit die Gasentwicklung beginnt. Bei Zurückbleiben eines oder mehrerer Elemente sind diese sofort zu untersuchen und in Ordnung zu bringen. Während der Ladung, besonders gegen deren Ende, muß der Batterieraum gut gelüftet werden. Nach Beendigung der Ladung läßt man die Spannung der Maschine etwas herabgehen, bis der Strom nahezu Null wird. Dann schaltet man aus. Zur Ladung werden allgemein Nebenschlußmaschinen benutzt. Soll zur Ladung eine Maschine mit gemischter Wicklung benutzt werden, so ist die Ladeleitung von den Bürsten abzuzweigen. Häufig ist es zweckmäßig, der Dynamomaschine, welche zur Speisung der Beleuchtungsanlage dient, für die Ladung der Batterie eine kleinere Maschine vorzuschalten (Zusatzmaschine), welche den Ladestrom dauernd aushält und etwa die Hälfte der Spannung der Lichtleitung liefern kann. Die Entladung ist beendet, wenn die Spannung rascher zu sinken beginnt. Weitere Stromentnahme ist schädlich für die Batterie.

Sollen Zellen einander parallel geschaltet werden, so muß dafür gesorgt werden, daß die parallelen Zellen entsprechend ihrer Größe Strom erhalten und liefern. Es empfiehlt sich, in jeden Zweig einen Strommesser und einen regulierbaren Widerstand einzuschalten. Sollen verschiedenartige Batterien oder neue und alte Elemente in dieser Weise zusammengeschaltet werden, so schaltet man am besten die neuen und die alten Elemente unter sich parallel und erst diese parallel geschalteten Reihen hintereinander.

In Zellen, welche zu weit oder mit zu starkem Strom entladen werden, oder bei denen ein Isolierfehler oder ein Kurzschluß vorliegt, wie auch in Zellen, welche längere Zeit aufgeladen stehen, nehmen die positiven Platten eine hellere rötliche oder graue Farbe an, indem sich Bleisulfat bildet. Dieses kann man, nachdem der etwaige Fehler beseitigt ist, durch fortgesetztes Laden mit Ruhepausen wieder in das braune Superoxyd der positiven Platten verwandeln. Das Aufladen mit Ruhe-

pausen, d. h. längeres Unterbrechen der Ladung nach eingetretener Gasentwicklung, erfolgt nach den von der Fabrik gegebenen Vorschriften.

Wenn es nötig ist, die Batterie für längere Zeit unbenutzt stehen zu lassen, so muß sie vorher voll geladen werden, und man muß darauf achten, daß die Platten ganz mit Flüssigkeit bedeckt sind. Wenn möglich, soll etwa alle 14 Tage so lange geladen werden, bis Gasblasen entweichen. Sollen die Elemente monatelang unbenutzt bleiben, so zieht man am besten die Säure ab. Nach dem Wiedereinfüllen hat man dann zunächst gründlich mit Ruhepausen aufzuladen.

(606) Kurzschluß in einer Zelle wird außer durch genaue Besichtigung der Platten auch daran erkannt, daß gegen Ende der Ladung die Gasentwicklung ausbleibt oder später eintritt als in den benachbarten. Ebenso bleibt gegen Ende der Ladung die Spannung der Zelle zurück. Es ist eine Hauptbedingung für die Wirksamkeit eines Akkumulators, daß die positiven und die negativen Platten eines Elementes nicht in metallisch leitender Verbindung miteinander stehen. Jede solche stromleitende Verbindung zwischen beiden Plattenarten im Element bewirkt eine Entladung des betreffenden Elementes, welche nutzlos verloren geht und in ihren Folgen nicht nur Störungen im Betriebe veranlaßt, sondern auch besonders nachteilig auf die Lebensdauer der Platten einwirkt. Ein Kurzschluß kann entstehen

1. durch direkte Berührung zweier benachbarter Platten,
2. durch metallische stromleitende Stoffe (abgetropftes Lötblei, Bleischwamm, Bleisuperoxyd usw.), welche sich zwischen den Platten festsetzen,
3. durch mittelbare oder unmittelbare Berührung der Platten mit dem Bleimantel des Holzkastens.

Ist ein Kurzschluß stark genug, um die völlige Entladung eines Elementes herbeizuführen, so liegt die Gefahr nahe, daß die Platten hart werden (sulfatieren) und die weitere Aufnahmefähigkeit verlieren. Bei der Ladung bleibt dann der Strom ohne Wirkung auf die Platten, weil er seinen Weg durch den Kurzschluß nimmt; das Element wird nicht geladen und kommt deshalb nicht zur Gasentwicklung. Zuweilen tritt der Fall ein, daß derartige Elemente nach Entfernung eines lange vorhanden gewesen Kurzschlusses Gas entwickeln, ohne daß sie geladen sind. Das rührt daher, daß die Platten hart sind, und der Strom nicht mehr einwirken kann. Die Säuredichte steigt in diesem Falle auch nicht bei der Ladung. Das Steigen der Säuredichte ist der einzige Maßstab für die fortschreitende Ladung. Durch Kurzschluß und die damit zusammenhängende zu tiefe Entladung wird oft ein Krümmen der Platten verursacht. Sind die Platten voneinander durch Glasrohre oder Hartgummistäbe isoliert, so kann man die Ursache eines Kurzschlusses meist mittels eines Holzstäbchens beseitigen. Ist dies nicht angängig, so muß die Zelle ausgebaut werden; an ihrer Stelle wird eine starke Kupferleitung als Überbrückung eingesetzt. Die Zelle wird entleert, auseinandergenommen und untersucht. Verbogene Platten richtet man wieder gerade. Ehe man die Zelle wieder in die Batterie einschaltet, ist zu empfehlen, sie mehrmals zu laden und zu beobachten, ob sie in Ordnung ist. Bei Zellen mit Holzbrettchen stellt man den Kurzschluß zweckmäßig mit Hilfe des sogenannten Kurzschlußfinders fest, einer eingekapselten Magnetnadel, welche nacheinander zwischen die Stromableitungen der Platten zu den Bleileisten gehalten wird. Die Magnetnadel wird dann, falls die Platten kurzschlußfrei sind, von Ableitung zu Ableitung keine oder nur sehr geringe Bewegung zeigen. Kommt man dagegen an eine Platte, die Kurzschluß hat, so wird die Nadel kräftig abgelenkt. Sind mehrere Kurzschlüsse in einem Element, so ändert die Nadel an jeder Platte, die Kurzschluß hat, ihre Lage in der vorerwähnten Weise.

Wird das Zurückbleiben der Zelle rechtzeitig bemerkt und der Kurzschluß sofort beseitigt, so wird die Zelle nach einer oder zwei Ladungen wieder sich gleich den übrigen verhalten, zumal wenn die Batterie etwas länger als nötig geladen wurde. Der Wärter hat deshalb die Pflicht, gegen Ende jeder Ladung den Batterieraum zu durchgehen und zu beobachten, ob alle Elemente gleichmäßig und gleich-

zeitig zur Gasentwicklung gelangen. Hierbei ist bei Anlagen mit Zellschalter zu berücksichtigen, daß die ersten Zellschalterelemente meist früher Gas entwickeln, einerseits weil sie weniger entladen werden, andererseits, weil sie oft durch den Netzstrom bei der Ladung auch mehr Strom erhalten als die übrigen.

(607) Garantie. Die Akkumulatorenfabriken leisten für die gelieferten ortsfesten Batterien und auch für größere Batterien für transportable Einrichtungen, wie Lokomotiven, Triebwagen, Boote, eine 1jährige Garantie in der Weise, daß sie sich verpflichten, die garantierte Kapazität wieder herzustellen, falls diese innerhalb der Garantiedauer unter die garantierte Grenze sinken sollte, wobei bedungen wird, daß die gegebenen leicht zu erfüllenden Vorschriften für die Behandlung der Batterien gewissenhaft befolgt werden, und daß die Füllsäure die geforderte Beschaffenheit besitzt. Auch übernehmen die Fabriken zu bestimmten nach dem Anschaffungspreis der Batterie bemessenen Sätzen — dieselben betragen bis zum Kriegsausbruche etwa 6 bis 10% jährlich bei täglich einmaliger Entladung im Durchschnitt — die fortdauernde Unterhaltung der Sammler, den Ersatz schadhaft werdender Teile und verpflichten sich außerdem, die Batterien nach einem bestimmten Zeitraum — meist 10 Jahre — in bestem Zustand zu übergeben.

Literatur: F. Grünwald, Die Herstellung der Akkumulatoren. Halle a. S., 1903, Wilh. Knapp. — K E l b s, Die Akkumulatoren. 5. Aufl. Leipzig 1919, Joh. Ambr. Barth. — W. B e i n, Elemente und Akkumulatoren, ihre Theorie und Technik. Leipzig 1908, Joh. Ambros. Barth. — W. B e r m b a c h, Die Akkumulatoren. 5. Aufl. Leipzig 1920, Otto Wigand. — A l f r e d W o g r i n z, Elemente und Akkumulatoren, ihre Wirkungsweise und Behandlung. Wien und Leipzig 1914, Franz Deuticke. — L. L u c a s, Die Akkumulatoren und galvanischen Elemente. 2. Aufl. Hannover 1917, Dr. Max Jänecke. — C. H e i m, Die Akkumulatoren für stationäre elektrische Anlagen. 5. Aufl. Leipzig 1918, Oskar Leiner. — L. J u m a u, Les Accumulateurs. Paris 1907, Dunod & Pinat. — L. L y n d o n, Storage Battery Engineering. New York 1903. — A. E. W a t s o n, Storage Batteries. Lynn, Mass. 1911. — F. r. D o l e z a l e k, Die Theorie des Bleiakкумуляators. Halle a. S. 1901, Wilh. Knapp. — F. E. K r e t z s c h m a r, Die Krankheiten des stationären elektrischen Bleiakкумуляators, 2. Aufl. 1922, München, R. Oldenbourg. — R i c h a r d A l b r e c h t, Die Akkumulatoren für Elektrizität, 2. Aufl., Leipzig 1918, G. J. Göschen.

II. Der alkalische Sammler.

(608) Herstellungsfirmen. Die wichtigsten Werke, welche alkalische Batterien herstellen, sind: Edison Storage Battery Co., Orange, N. Y., seit 1901; Deutsche Edison-Akkumulatoren-Compagny Berlin, seit 1905, ferner Svenska Ackumulatör A. B. Jungner, Stockholm und Societé des Accumulateurs Fixes et de Traction, Romainville (Seine).

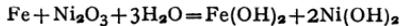
Die Edison-Gesellschaft in Orange stellt ausschließlich Röhrenplatten (610) her, die anderen Firmen Taschenplatten. In den Eigenschaften und der Wirkungsweise sind die beiden Arten ähnlich. Über den Akkumulator der Edison-Gesellschaft liegen allein eingehende Untersuchungen vor, daher beziehen sich die folgenden Ausführungen auf diesen¹⁾.

(609) Chemischer Vorgang. Für die positive Platte wird Nickelhydroxydul, vermischt mit feinem metallischem Nickel oder Graphit, verwendet. Bei der Ladung geht das Nickelhydroxydul in eine höhere Oxydationsstufe über. Für die negativen Platten wird eine Eisen-Sauerstoffverbindung mit geringer Beimengung von Quecksilber benutzt, welche in der arbeitenden Platte einen außerordentlich feinen Eisenschlamm bildet. Bei der Ladung wird dieser zu metallischem Eisen reduziert.

Bei der Entladung erfolgt für beide Platten der chemische Vorgang in umgekehrter Richtung. Der Zusatz von metallischem Nickel oder Graphit in der Positiven und von Quecksilber in der Negativen dient zur Erhöhung der Leitungs-

¹⁾ Literatur: Veröffentlichungen über den Edison-Akkumulatör: W. E. H o l l a n d, The Edison Storage Battery. The Electrician, London, Bd. 66, S. 47, 1910. — M. K a m m e r h o f f, Der Edison-Akkumulatör. Berlin 1910, Julius Springer. — J o l y, Die Edisonbatterie. The Electrical Times 17. Februar 1910. — Dr. F r i t z F ö r s t e r, Elektrochemie wässriger Lösungen. Leipzig 1915, Joh. Ambrosius Barth. S. 222 u. ff.

fähigkeit dieser an und für sich schlecht oder nicht leitenden Massen. Der chemische Vorgang verläuft nach Förster gemäß folgender Gleichung:



und zwar erfolgt der Vorgang für die Entladung von links nach rechts und für die Ladung von rechts nach links.

(610) Aufbau der Zellen. Die Platten werden in Deutschland zurzeit in zwei Ausführungen geliefert und zwar sind die Negativen für beide Arten gleich. Die positiven Platten der ersten Art bestehen aus dünnen, flachen, mit der aktiven Masse gefüllten Taschen aus fein durchlochtem, vernickeltem Eisenblech, die in Öffnungen eines vernickelten Eisenbleches eingesetzt und unter hydraulischem Druck stark zusammengepreßt werden, so daß die Taschen in dem Eisenblech festsitzen und die Masse in sich guten Kontakt erhält (Taschenplatten). Die negativen Platten sind den positiven gleichgebaut. Die Platten der zweiten Art haben als Behälter für die wirksame Masse der Positiven aufwärts stehende Röhren aus vernickeltem durchlochtem Stahlblech, in welche die Masse unter großem Druck eingepreßt wird (Röhrenplatten). Bei Verwendung positiver Taschenplatten hat jede Zelle zwei positive Platten gegenüber einer negativen; bei positiven Röhrenplatten ist in jeder Zelle eine negative Platte mehr enthalten als positive Platten.

Die Platten befinden sich bei beiden Ausführungsarten in einem aus vernickeltem Stahlblech autogen geschweißten Zellengefäß, auf welches nach Einbau des Plattensatzes der Deckel ebenfalls autogen aufgeschweißt wird. Die Polbolzen werden, durch Hartgummistopfbuchsen isoliert, durch Öffnungen im Deckel hindurchgeführt und erhalten zur Verbindung mit den Nachbarzellen besonders geformte Polschuhe mit konischem Sitz. Auf dem Deckel befindet sich außerdem die mit Ventil versehene Füllöffnung der Zelle. Die Isolation der positiven und negativen Platten gegeneinander und des gesamten Plattensatzes gegen das Gefäß besteht aus besonders behandeltem Hartgummi.

Da die Gefäße der Edisonzellen aus Metall und deshalb spannungsführend sind, so werden beim Zusammenbau der Zellen zu Batterien zwischen den ersteren bestimmte Luftzwischenräume freigelassen und die Zellen sind auch außerdem gegen den Batteriekasten geeignet isoliert. Ein direktes Aneinanderstellen von Edisonzellen ohne Isolierung und ohne Luftzwischenräume ist also streng zu vermeiden.

Als Elektrolyt dient ca. 22%ige, chemisch reine, mit einem Zusatz von Lithiumhydroxyd versehene Kalilauge; der Zusatz von Lithiumhydroxyd soll, wie Förster annimmt, wahrscheinlich die Schrumpfung der Oberfläche der positiven Masse verhindern und dadurch einer Abnahme des Ladeinhalts, die zumal bei zu hoher Außentemperatur leicht eintreten kann, entgegenwirken. Die Kalilauge wirkt in der Zelle nur als Stromträger. Ihr spezifisches Gewicht soll 1,2 betragen und darf, bezogen auf Laugentemperatur von 18° C, nach oben bis 1,23 und nach unten bis 1,16 schwanken. Die Nachfüllung als Ersatz für verdunstete Lauge erfolgt mit reinem destilliertem Wasser. Die richtige Zusammensetzung der Lauge und deren spez. Gewicht ist von wesentlichem Einfluß auf die Leistung der Zelle. Unter normalen Betriebsverhältnissen wird die Neufüllung von Edisonzellen mit Kalilauge etwa alle 9 bis 12 Monate erforderlich. Wiederholte Messungen des spez. Gewichts der Lauge sind empfehlenswert. In Deutschland werden zurzeit Zellen normal mit einem Inhalt von 1,25 bis einschließlich 450 Ah hergestellt.

(611) Elektromotorische Kraft und Klemmenspannung. Die EMK beträgt etwa 1,4 V. Der Spannungsverlauf bei Ladung und Entladung ist aus den Schaulinien der Abb. 343 und 344 ersichtlich. Erstere bezieht sich auf Edisonzellen mit positiven Röhrenplatten, welche normal 7stündige Ladung und 5stündige Entladung haben, in beiden Fällen mit gleicher Stromstärke. Die zweite Abbildung gilt für Zellen mit Taschenplatten mit 4stündiger Ladung und Entladung, wobei der Ladestrom höher ist als der Entladestrom. Die Ladung kann natürlich auch mit gleichbleibender Spannung und abfallender Stromstärke erfolgen, wobei unter

Verwendung einer Spannung von 1,67 V der Stromverlauf sich wie in Abb. 346 ergibt. Im Augenblick des Einschaltens der zuvor normal entladene Zelle steigt der Ladestrom bis auf etwa das Doppelte des normalen an, um jedoch rasch wieder abzufallen und nach $3\frac{1}{4}$ h die normale Stromstärke zu erreichen. Bei einer Netzspannung von 110 V können mithin $110/1,67 = 66$ Edisonzellen in Hintereinanderschaltung ohne Vorschaltwiderstand geladen werden. Zwischenladungen können unter Berücksichtigung der Erwärmungsgrenzen für kurze Zeiten auch mit hohen Stromstärken erfolgen, wenn Betriebspausen und Ladegelegenheiten dies ermög-

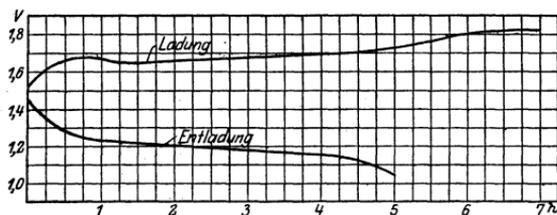


Abb. 343. Edisonzellen T, B und A, Spannung bei Ladung und Entladung

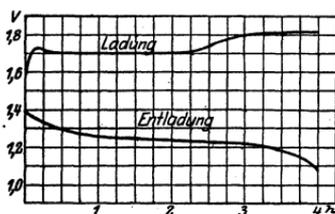


Abb. 344. Edisonzellen F, FB und FA, Spannung bei Ladung und Entladung;

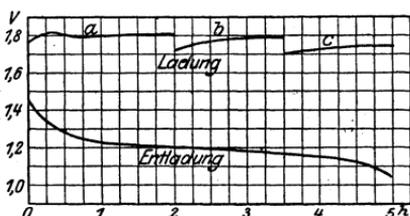


Abb. 345. Edisonzellen T, B und A, Ladung mit verkürzter Ladezeit.

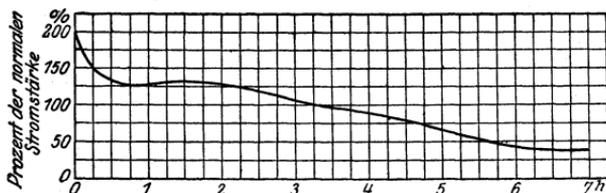


Abb. 346. Edisonzellen, Ladestrom bei Ladung mit gleichbleibender Spannung.

lichen. Die Ladekurve Abb. 345 zeigt eine von 7 auf 5 h verkürzte volle Ladung einer Zelle mit positiven Röhrenplatten, unter Anwendung von Zwischenladungen und Berücksichtigung der Temperaturgrenzen durch stufenweise Verringerung des Ladestromes.

Starke Überladungen nach völliger Entladung schaden dem Edisonakkumulator auch bei dauerndem Vorkommen nicht.

Beendet ist die Ladung, wenn die Ladespannung etwa 1,82 V für eine Zelle erreicht hat, wenn diese Spannung beim Weiterladen nicht mehr steigt und mit dieser Spannung noch etwa 40 Minuten weiter geladen worden ist. Eine genaue Zahl kann jedoch nicht angegeben werden, da auch der Zustand und die Temperatur der in den Zellen befindlichen Kalilauge mitspricht. Als normal entladen gilt der Edisonakkumulator, wenn seine Klemmenspannung bei normaler Entlade-

stromstärke auf 1 V für die Zelle gesunken ist. Die mittlere Entladespannung ist dann 1,2 V für die Zelle. Andere Merkmale für Beendigung der Ladung und Entladung bestehen nicht.

(612) Inhalt. Der Ladeinhalt des Edisonsammlers wird durch die Höhe des Entladestromes praktisch nicht wesentlich beeinflusst. Bei höherer Belastung sinkt jedoch seine Spannung rascher als die der Bleizelle. Abb. 347 (nach Holland) gibt die Beziehungen der Leistungen und der mittleren Spannung zum Entladestrom für die Edisonzelle A 4 mit 150 Ah. Abb. 348 (nach Holland)

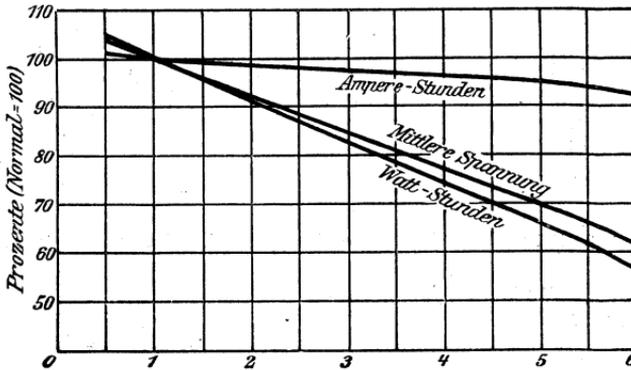


Abb. 347. Kapazität und Spannung einer Edisonzelle bei verschiedenen Entladeströmen.

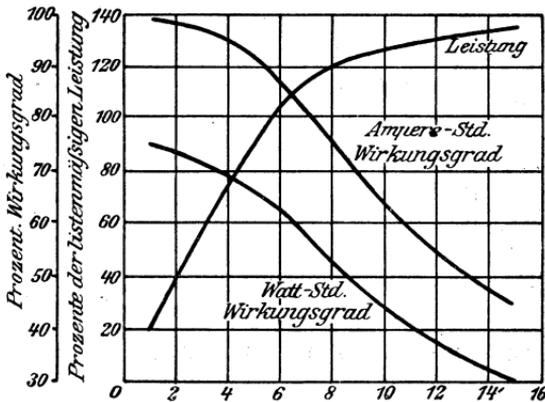


Abb. 348. Leistung und Wirkungsgrad einer Edisonzelle bei verschiedenen Ladezeiten und normalem Ladestrom.

stellt Leistung und Wirkungsgrad dar bei verschiedenen Ladezeiten und normalem Ladestrom der Zelle A 4. Der Arbeitsinhalt der Zellen Type A 4 mit positiven Röhrenplatten wird von Holland mit 33,6 Wh/kg angegeben.

Durch längere Ladung läßt sich der Ladeinhalt des Edisonsammlers nicht unwesentlich über den normalen hinaus erhöhen. Laugentemperaturen über 50°C in den Zellen sind zu vermeiden, weil dadurch Leistung und bei öfteren Wiederholungen auch die Lebensdauer der Zellen leiden. Der innere Widerstand ist abhängig von der Zellengröße und beträgt nach E. W. Holland für die Zelle A 6 mit 225 Ah im Mittel ca. $0,0024\ \Omega$ und für die Zelle A 4 mit 150 Ah $0,0035\ \Omega$.

Unter normalen Umständen ist der Wirkungsgrad des Edisonakkumulators in Ah etwa 72%, in Wh etwa 55—60%.

(613) Die Bedienungsvorschrift, welche zurzeit für die in Deutschland hergestellten Edisonbatterien Anwendung findet, ist nachstehend im Wortlaut wiedergegeben und zwar bezogen auf eine Automobilbatterie von 80 V mit 67 Zellen A 6 mit 225 Ah, mittlere Klemmenspannung 80 V, Entladestrom 45 A, Ladestrom 45 A, Ladezeit 7 h. Erforderliche höchste Ladespannung 122 V.

1. **Füllung der Batterie.** Die Füllung erfolgt mit der von der Fabrik mitgegebenen oder bezogenen Kalilauge. Alle Zellenverschlüsse sind zu öffnen. Die Kalilauge wird mittels Glastrichters vorsichtig unter Vermeidung von Übergießen in die Zellen eingefüllt, bis sie 12 mm über der Oberkante des Plattensatzes steht. Zur Prüfung des Laugestandes führe man das an beiden Enden offene, der Batterie mitgegebene Glasröhrchen vorsichtig in die Zellenöffnung ein, bis es auf dem Plattensatz aufsteht. Man verschließe es oben mit dem Finger und nehme es so heraus. Der Laugestand im Glasröhrchen zeigt alsdann den Laugestand über Oberkante des Plattensatzes in der Zelle. Jede Zelle ist nach Füllung sofort zu verschließen.

2. **Die Füllflüssigkeit (Elektrolyt)** ist besondere Kalilauge von 1,2 spez. Gewicht (ca. 22% KOH). Sie ist von der Fabrik oder deren Vertretung zu beziehen, da im Handel nicht in richtiger Zusammensetzung erhältlich. (Siehe 5.)

3. **Ladung.** Kam die Batterie ungefüllt zum Versand, so hat die erste Ladung 15 Stunden lang mit dem oben angegebenen Ladestrom zu erfolgen. Die Ladung kann 2 Stunden nach vollendeter Füllung der Zellen mit Lauge beginnen. Wenn erforderlich, kann die Ladung unterbrochen werden, eine Entladung darf aber vor Beendigung der vollen Ladung nicht erfolgen.

Die weiteren normalen Ladungen haben mit dem vorgeschriebenen Ladestrom in der angegebenen Ladezeit zu erfolgen. Bedingen die Verhältnisse andere Ladezeit und anderen Ladestrom, so ist darüber die Fabrik zu befragen.

Beendet ist die Ladung, wenn die Ladespannung nicht mehr steigt und wenn dann noch 40 Minuten lang weitergeladen wurde. Die normale Ladung ersetzt nur die vorausgegangene normale Entladung. Tiefere Entladung schadet nicht, bedingt aber dann eine darauffolgende längere Ladung.

4. **Überladungen.** Neue Batterien müssen nach jeder 12. Entladung 15 Stunden lang mit dem vorgeschriebenen Ladestrom geladen werden, bis 4 solcher Überladungen erfolgt sind. Später ist die Batterie alle 2 Monate einmal in dieser Weise zu überladen.

5. **Nachfüllung der Batterie.** Als Ersatz für verdunstete Lauge wird reines destilliertes Wasser nachgefüllt, während aus den Zellen verschüttete Lauge durch Ersatzlauge zu ergänzen ist, die von der Fabrik bezogen werden muß. Durch Stichproben mit dem Glasröhrchen ist der Laugestand in den Zellen öfter vor Beginn der Ladung zu prüfen.

6. **Messung der Kalilauge.** Die Kalilauge in den Zellen muß von Zeit zu Zeit, aber immer unmittelbar nach einer vollen Aufladung der Batterie, auf deren Dichte (spez. Gewicht) geprüft werden. Die Prüfung erfolgt mit Aräometer und Saugheber aus Glas. Das spez. Gewicht soll 1,2 sein, darf aber nach oben bis 1,23 und nach unten bis 1,16 schwanken, bezogen auf 18° C Laugetemperatur. Ist das spez. Gewicht höher als 1,23, so ist etwas Lauge aus den Zellen abzusaugen und durch destilliertes Wasser zu ersetzen. Ist es unter 1,16, so ist mit Lauge anstatt destilliertem Wasser nachzufüllen, bis durch solche Änderungen das richtige spez. Gewicht von 1,2 wieder erreicht ist.

7. **Neufüllung der Batterie** sollte, je nach Art des Betriebes, alle 9 bis 12 Monate mit frischer Kalilauge erfolgen. Die Zellen sind zu diesem Zweck tief zu entladen, die alte Lauge ist unter Umschütteln auszugießen, mit reinem destilliertem Wasser ist gut nachzuschwenken und dann mit der Neufüllung zu

beginnen. Auf solche Neufüllung muß eine 15stündige Ladung folgen. Übergießen von Kalilauge oder destilliertem Wasser ist zu vermeiden, es verschlechtert die Isolation der Zellen untereinander und verursacht Selbstentladung.

8. **Aufbewahrung von Kalilauge** darf nur in reinen Eisengefäßen erfolgen, die nicht gelötet, verzinkt, verkupfert oder irgendwie mit Blei- oder Messingteilen versehen sind. Das Gefäß ist luftdicht verschlossen zu halten. Luftzutritt verunreinigt und verschlechtert die Kalilauge. Bei Bestellung von Lauge ist die Zellentype und gewünschte Laugenmenge oder Zahl zu füllender Zellen anzugeben.

9. **Besonders zu beachten.** Batteriekästen und Zellen sind immer rein und trocken und alle Zellenverschlüsse verschlossen zu halten. Beim Laden Kastendeckel öffnen, Gas abziehen lassen. Niemals offenes Feuer (Streichholz, Zigarre, Licht usw.) in die Nähe der Batterie bringen. Batterie nicht im gleichen Raum mit Bleibatterie laden, die Schwefelsäuredämpfe der letzteren schaden der Edisonbatterie. Niemals Schwefelsäure in Edisonzellen einfüllen, sie werden dadurch meist unrettbar verdorben.

B. Technische Anwendung der Akkumulatoren.

Dieser Abschnitt gilt zwar allgemein, doch wird darin in erster Linie nur der Bleisammler berücksichtigt, weil der alkalische Sammler zurzeit noch wenig benutzt wird.

(614) **Die Aufspeicherung** von Elektrizität in Akkumulatoren ergibt für elektrische Beleuchtungs- und Kraftanlagen folgende Vorteile [vgl. auch (670, 671)]:

1. **Abkürzung des Maschinenbetriebes.** Man kann den Maschinenbetrieb auf eine wirtschaftliche Dauer beschränken und den weiteren Kraftbedarf aus der Batterie decken; die Maschinenanlage wird auf diese Weise während des Betriebes durch volle Belastung gut ausgenutzt. Bei größeren Beleuchtungsanlagen pflegt die Belastung der Maschine eine sehr ungleichmäßige zu sein. Nach Aufhören des Werkstattbetriebes in der Hauptbeleuchtungszeit, wo der größte Teil der Lampen brennt, wird die Beleuchtung und der Kraftbedarf der Maschine ein sehr geringer sein, wie dies in später Nacht- und früher Morgenstunde der Fall ist. Diesen geringen Bedarf wird man zweckmäßig aus der Batterie decken und die Maschine nach Aufhören des Hauptbedarfes stillsetzen.

2. **Bessere Ausnutzung einer gleichmäßigen Betriebskraft**, z. B. einer Wasserkraft, indem man in den Stunden, in denen der Werkstattbetrieb ruht, die überschüssige Kraft in der Batterie aufspeichert. Die aufgespeicherte Elektrizität wird dann verwandt, wenn die vorhandene Betriebskraft für bestimmte Zeit nicht ausreicht, um den Bedarf zu decken.

3. **Ausgleich von Spannungsschwankungen.** Durch Parallelschalten einer Batterie mit einer Maschine, deren Geschwindigkeit stark schwankt, verringert oder beseitigt man die Spannungsschwankungen. Man erzielt alsdann ruhiges Licht unter Erhöhung der Lebensdauer der Glühlampen.

4. **Pufferbatterie zum Ausgleich der Belastung einer elektrischen Anlage** mit stark schwankendem Kraftverbrauch, wie elektrische Straßenbahnen, Förderanlagen usw. Bei Straßenbahnen übersteigt der Bedarf an elektrischer Energie, wenn viele Wagen gleichzeitig anfahren, den mittleren Bedarf oft plötzlich um ein Vielfaches, um gleich darauf tief unter das Mittel zu sinken. Ohne Batterie müßte die Dampfmaschinenanlage für die höchste Leistung eingerichtet sein und würde, da sie im Mittel viel weniger belastet wäre, mit nur geringem Wirkungsgrad arbeiten. Schaltet man dagegen eine Akkumulatorenbatterie parallel, so hat man nur eine Maschinenanlage für die mittlere Leistung nötig, da die Batterie den plötzlichen Mehrverbrauch leistet und bei Minderbedarf den Überschuß aufnimmt. Die Maschine arbeitet dann beständig mit voller Belastung, also unter den wirtschaftlich günstigsten Bedingungen.

5. **Als Sicherung des Betriebes gegen Störungen** bei etwaigem Versagen der Maschinenanlage. Von großer Wichtigkeit ist deshalb die Anordnung

von Batterien in elektrischen Beleuchtungsanlagen von solchen Bauten, in welchen sich Publikum in großer Zahl ansammelt, wie z. B. Theater, Warenhäuser usw.

6. Als Gleichstromtransformatoren, um z. B. den Strom elektrischer Zentralanlagen für galvanoplastische Betriebe in einen Strom niedriger Spannung von etwa 2 bis 20 V zu verwandeln. Die Zellen werden hintereinander geladen und alsdann, in passende Gruppen geteilt, durch die Bäder entladen.

Allgemein darf bei Einfügung von Batterien in Beleuchtungs- und Kraftanlagen die Maschinenanlage kleiner bemessen werden. Durch Einfügung von Batterien erreicht man Verbilligung der Betriebskosten, Vereinfachung der Bedienung, große Sicherheit durch Schaffung einer Momentreserve. Beim Zusammenarbeiten von Dynamomaschinen und Akkumulatoren ist es notwendig, die Schaltung so zu wählen, daß die Batterie in richtiger Weise zum Betriebe herangezogen wird und nicht durch übermäßige Beanspruchung, falsche Ladeweise usw. Schaden leidet.

(615) Verwendungszwecke von Sammlern. Ortsfeste Sammlerbatterien finden Anwendung in ortsfesten Licht- und Kraftanlagen aller Art, die mit Gleichstrom betrieben werden, ferner in Telegraphenanlagen. Schaltung von Sammleranlagen siehe (670, 671).

Tragbare Batterien werden benutzt:

1. zur Beleuchtung von Fahrzeugen, insbesondere Eisenbahnwagen (869 ff.);
2. zur Beleuchtung in Handlampen, Glühlampen, Taschenlampen;
3. zur Notbeleuchtung (868);
4. zum Betriebe von Fahrzeugen, die auf Schienen laufen, besonders zum Betriebe von Lokomotiven, Triebwagen für Eisenbahnen, Grubenlokomotiven, fahrbaren Kranen, kleinen Lasttransportwagen (800 u. f.);
5. zum Betriebe von Kraftwagen, sowie Transportkarren (803);
6. zum Betriebe von elektrischen Booten;
7. für Unterseeboote;
8. für Eisenbahn-Stellwerks- und Sicherungsanlagen;
9. zum Betriebe in Schwachstromanlagen, für Telegraphie, für Post- und Eisenbahnzwecke, Telephonie, Funkentelegraphie und
10. für Meßzwecke.

(616) Berechnung der Größe einer Batterie¹⁾. Entsprechend den Lade- und Entladekurven eines Akkumulators ist die Zahl der Elemente, welche zur Erzeugung einer bestimmten Spannung notwendig ist, je nach dem Lade- und Entladezustand verschieden. So sind notwendig zur Erzeugung von 110 V

bei Ruhespannung	110 : 2,07 = 53 Zellen,
am Ende der Entladung	110 : 1,83 = 60 Zellen,
am Ende der Ladung	110 : 2,75 = 40 Zellen.

Die Veränderung der Zellenzahl erfolgt mittels eines Zellenschalters (670). Soll sowohl während Entladung als auch bei Ladung eine Stromlieferung der Batterie bei einer bestimmten Spannung erfolgen, so verwendet man einen Doppelzellenschalter. Zur Erzielung einer konstanten Spannung von 110 V ist bei der Entladung der Entladekontakt des Zellenschalters auf die 53. Zelle zu bringen (110 : 2,07 = 53) und mit fortschreitender Entladung weiter zu verschieben, so daß am Schlusse der Entladung 60 Zellen eingeschaltet sind. Beim Übergang zur Ladung ist der Entladekontakt auf die 52. Zelle einzustellen (110 : 2,13 = 52) und dann so weit zu verschieben, daß er am Schlusse der Ladung auf der 40. Zelle steht. Es muß also in diesem Falle $\frac{1}{3}$ der Zellen zum Schalten eingerichtet sein. Verzichtet man auf die Stromentnahme während der Ladung, so genügt $\frac{1}{3}$ der Zellenzahl. Wenn der Spannungsverlust in den Zuleitungen nicht vernachlässigt werden kann, so muß für je 1,83 V Verlust eine weitere Zelle zu der Batterie hinzugefügt und an den Zellenschalter angeschlossen werden. Während der Entladekontakt des Zellenschalters nach der Höhe der verlangten Entladespannung eingestellt wird, dient

¹⁾ Nach dem Schaltungsbuch der Accumulatorenfabrik Aktiengesellschaft, Berlin-Hagen i. W.

der Ladekontakt lediglich dazu, im Verlauf der Ladung die wenig entladenen Schaltzellen, welche in erheblich kürzerer Zeit geladen werden als der übrige Teil der Batterie, nach und nach abzuschalten.

Die Vorteile einer Batterie lassen sich in Lichtenanlagen am besten erzielen, wenn die Leistungsfähigkeit der Akkumulatorenbatterie ebenso groß ist wie die der Maschinenanlage. Vor Beginn des abendlichen Hauptbetriebes ist alsdann die Batterie unter günstiger Ausnutzung der Maschine zu laden, während des Hauptbetriebes arbeiten Maschine und Akkumulatoren unter gleicher Belastung mit. Sinkt indessen die Stromabgabe so weit, daß die Batterie sie allein decken kann, so wird die Maschinenanlage stillgesetzt und es besorgen die Akkumulatoren nunmehr den ferneren Betrieb, ohne weiterer Wartung zu bedürfen.

Wenn die Spannung an den Glühlampen und die tägliche Stromentnahme aus den Akkumulatoren festgesetzt ist, kann man zunächst die Größe und Anzahl der Zellen sowie die Spannung der Dynamo bestimmen. Die Größe der Zellen wird durch die während eines Tages der Batterie zu entnehmende Strommenge und durch die benötigte maximale Stromstärke bestimmt, für welche die Kapazität und die zulässige Entladestromstärke der zu wählenden Akkumulatorengröße ausreichen müssen. Man wählt die Zellen zweckmäßig etwas größer, um etwas Reserve zu haben und außerdem die Haltbarkeit der Elemente zu erhöhen. Zur Berechnung einer Batterie diene als Beispiel das Projekt der elektrischen Beleuchtung einer Fabrik, in welcher die Arbeitszeit von morgens 6 h bis mittags 12 h und von 1 bis abends 7 h währt. Die sämtlichen Glühlampen der Fabrik benötigen einen Strom von 300 A bei einer Spannung von 110 V, und zwar dauert der Lichtbedarf an kürzesten Tage im Winter von morgens 6—8 und nachmittags 4—7 h, also täglich zusammen 5 h, so daß zur Ladung der Batterie die Stunden von morgens 8—12 h und nachmittags 1—4 h, zusammen 7 h, übrig bleiben. Die gesamte Stromlieferung wird auf die Batterie und die Maschine so verteilt, daß die letztere sowohl bei Ladung wie bei Lichtbetrieb gleichmäßig belastet ist.

Die Batteriesoll die Hälfte der Belastung, also 150 A, decken. Bei einem Wirkungsgrad in Ah von 90% sind mithin in die Batterie zu laden $\frac{150 \cdot 5 \cdot 100}{90} = 833$ Ah.

Da 7 h zur Verfügung stehen, ist die mittlere Leistung der Maschine ca. 130 Ah während der Ladung. Als Batterie würde die Zelle J 26 der Accumulatorenfabrik Aktiengesellschaft mit einer Leistung von 156 Ah während 5 h zu wählen sein. Die Ladung mit im Mittel 130 A dauert etwa 6½ h. Da die Maschine bei 60 Elementen von 2,4 V = 144 V noch den vollen Ladestrom geben muß, während gegen Ende der Ladung, also bei 165 V, dieser auf die Hälfte sinken darf, so würde eine Maschine von 150 A gerade noch ausreichen. Zur Berechnung der mittleren Leistung der Maschine in kW bestimmt man die Batterieleistung während der Entladung. Diese ist $150 \cdot 5 \cdot 110 : 1000 = 82,5$ kWh. Bei einem Wirkungsgrad der Batterie von 75% in kWh benötigen wir mithin zur Ladung $82,5 \cdot 100 : 75 = 110$ kWh, während 6½ h, also 16,9 kW, während der Entladung $82,5 : 5 = 16,5$ kW. Die Maschine läuft also 11½ h mit etwa 16,5 kW.

Für die Berechnung von Batterien für Elektrizitätswerke im Anschluß an die Belastungskurve siehe ETZ 1891, Heft 45, für die Berechnung von Straßenbahnen mit Pufferbatterien ETZ 1899, Heft 5; vgl. auch (788).

Bei Anlagen von etwa 100 kW kostete eine Batterie fertig aufgestellt in Deutschland (ohne Gebäude und Anschlußleitungen) für jedes Kilowatt Entladung bei dreistündiger Kapazität bis Kriegsausbruch ca. 250 M. Dieser Preis steigt etwas bei kleineren Batterien und sinkt bei größeren Batterien allmählich. Für größere Batterien konnte man 200 M/kW annehmen. Das Gewicht einer Batterie, welche 100 kW Entladung 3 h lang leistet, beträgt ca. 45 000 kg. Bei fünfständiger Kapazität kostete eine 100 kW-Batterie ca. 375 M. und größere ca. 325 M. für jedes Kilowatt Entladung. Das Gewicht einer Batterie, welche 100 kW 5 h lang leistet, beträgt 67 000 kg.

Fünfter Abschnitt.

Das elektrische Kraftwerk.

Kraftmaschinen.

(617) Wahl der Betriebsmaschinen. Für den Betrieb von Kraftwerken stehen für große Leistungen Dampfturbinen, für mittlere Leistungen Dampfturbinen oder Kolbendampfmaschinen, Großgasmaschinen und Ölmaschinen, für kleinere Leistungen Kolbendampfmaschinen, Gas-, Ölmaschinen und Lokomobilen zur Verfügung. Hierzu treten für alle Leistungsstufen die Wasserturbinen. Zur Spitzendeckung finden vielfach Dieselmotoren und Lokomobilen Verwendung. Gasmaschinen sind dort besonders angebracht, wo es sich um Verwertung der Hochofenabgase oder um die rationelle Ausnutzung minderwertiger Brennstoffe handelt. Die zeitweise beliebten Sauggasmaschinen sind teils den Ölmaschinen gewichen, teils verschwinden sie, weil die kleinen Elektrizitätswerke durch die moderne Entwicklung der Überlandwerke zu Umformerwerken werden. Gegen- oder Zwischendampfturbinen sind dort vorteilhaft, wo Dampf gleichzeitig zu Heiz- oder Industriezwecken verwendet wird. Maßgebend für die Wahl der geeigneten Antriebsmaschinen sind: 1. Größe und Dauer der Belastung, 2. wirtschaftlichster Brennstoffverbrauch für die kWh, 3. Bezugs- und Preisverhältnisse des Brennstoffes, 4. Möglichkeit der Ausnutzung oder Verwertung von Nebenprodukten, 5. Betriebsbereitschaft, 6. Zweckmäßigkeit als Haupt- bzw. Zusatzantriebsmaschinen.

(618) Kolbendampfmaschinen. Bei Verwertung des gesamten Abdampfes kommen Einzylindermaschinen, bei Verwertung eines Teiles des Abdampfes oder bei kurzzeitiger Überlastung der Maschinen Zweifach-Expansionsmaschinen mit einem Dampfverbrauch von 10 bis 11 kg/kWh oder Dreifach-Expansionsmaschinen mit 7 bis 10 kg/kWh mit Kondensation und Überhitzung zur Verwendung. Mit Rücksicht auf die bessere thermische Ausnutzung, die höhere Umdrehungszahl, Platz- und Gewichtersparnis und geringere Anschaffungskosten sind Dampfmaschinen stehender Anordnung vorzuziehen. Dampfmaschinen werden in Größen bis 5000 kW ausgeführt. Verbundmaschinen finden zweckmäßig bis 750 kW, darüber Dreifach-Expansionsmaschinen Anwendung. Für Leistungen über 1500 kW wird in den meisten Fällen die Aufstellung von Dampfturbinen vorzuziehen sein. Eine Verbesserung bedeutet die Stumpfsche Gleichstromdampfmaschine, die nur Einlaßventile besitzt, während der Auspuff durch die in der Mitte des Zylinders angebrachten Schlitze erfolgt, die durch den Kolben gesteuert werden. Die Anordnung ermöglicht eine gute thermische Ausnutzung, kleine schädliche Räume, hohes Vakuum, hohe Überhitzung, einzylindrige Ausführung, Vereinfachung der Anlage und dadurch Platz-, Gewichts- und Preisersparnis. Der Dampfverbrauch ist wesentlich günstiger als bei Verbundmaschinen und fast so günstig wie bei Dreifach-Expansionsmaschinen. Die Lokomobilen haben infolge der vorzüglichen Durchbildung (R. Wolf, Magdeburg-Buckau, und H. Lanz, Mannheim) ihren Platz in kleineren und mittleren Anlagen und als Spitzendeckungsmaschinen behauptet. Sie werden bis zu Größen von 750 kW

gebaut und zwar für die größeren Leistungen als Zwillingsstandemaschinen mit Überhitzung und Kondensation. Der Zusammenbau von Dampfmaschine und Kessel ergibt im wesentlichen folgende Vorteile: Gute Wärmeausnutzung durch schwach belastete Heizfläche des Röhrenkessels, Möglichkeit der Verbrennung minderwertiger Brennstoffe, hohe Dampfspannung, Überhitzung, geringe Verluste durch Niederschlag des Dampfes, Heizung der Zylinder durch Kesselabgase und billige, wenig Raum beanspruchende Anlage. Der Kohlenverbrauch ist infolge vorstehender Vorteile günstiger als bei sonst gleich starken Dampfmaschinen; er beträgt bei Lokomobilen von 8 bis 150 kW 1,35 bis 1,2 kg/kWh und von 150 bis 750 kW 0,9 bis 0,7 kg/kWh.

(619) Dampfturbinen. Man unterscheidet Gleichdruck-(Aktions-) und Überdruck-(Reaktions-)turbinen. Bei den **Aktionsturbinen** wird der Dampf in den Leitschaufeln entspannt und ihm Geschwindigkeit und Richtung erteilt. Der Dampf tritt als freier Strahl in die Laufräder ein und verliert an Geschwindigkeit. Die Laufräder werden partiell beaufschlagt und haben gleiche Ein- und Austrittsquerschnitte. Die Aktionsturbine besitzt daher keinen Axial Schub und keine Spaltverluste, die Zwischenräume zwischen Leit- und Laufkränzen können verhältnismäßig groß gewählt werden. Bei der **Reaktionsturbine** findet in den Leitschaufeln nur eine teilweise Dampfentspannung statt, so daß die Geschwindigkeit des in die Laufräder eintretenden Dampfes geringer als bei der Aktionsturbine ist, dagegen noch einen gewissen Druck aufweist. Die Dampfentspannung verteilt sich also auf Leit- und Laufräder. Die Leitschaufeln werden voll beaufschlagt und erfahren eine Querschnittsverengung an der Austrittsseite. Die Reaktionsturbine weist demnach einen Axial Schub und Spaltverluste auf; ersterer muß durch besondere Entlastungskolben abgefangen, letztere müssen durch kleine Zwischenräume zwischen Leit- und Laufkränzen verringert werden. Zusammenfassend kann man sagen, bei der Aktionsturbine wird die Verminderung des Druckes und der Geschwindigkeit nacheinander getrennt in Leit- und Laufkränzen vorgenommen, bei der Reaktionsturbine finden diese Vorgänge dagegen gleichzeitig in Leit- und Laufkränzen statt.

Wegen der hohen Dampf- und Umfangsgeschwindigkeit der Schaufeln werden die Turbinen für größere Leistungen mehrstufig ausgeführt. Die Verminderung der Umfangsgeschwindigkeit erfolgt in mehreren Druckstufen mit je einem Laufkränzen (Z o e l l y , P a r s o n s) oder in Geschwindigkeitsstufen mit 2 bis 3 Laufkränzen hintereinander (C u r t i s). In ersteren findet eine Verminderung der Dampfgeschwindigkeit, in letzteren die der lebendigen Kraft statt. Die neuerdings viel verwendeten **k o m b i n i e r t e n T u r b i n e n** erhalten, nachdem der Dampf in einer ersten Druckstufe teilweise entspannt ist, ein zweikränziges Curtisrad, dem sich eine Anzahl von Zoelly- oder Parsons-Druckstufen anschließen. Man erhält dadurch folgende Vorteile: Schonung der Turbine durch geringere Temperatur, leichtere Abdichtung der Hochdruckstopfbüchse, bessere Ausnutzung des Wärmegefälles, geringere Gesamtstufenzahl und kürzere Baulänge.

Wenn es möglich ist, Abfall- oder Auspuffdampf zu verwenden, finden **A b d a m p f t u r b i n e n** mit einer geringeren Stufenzahl als Frischdampfturbinen Anwendung. In diesem Falle ist der Einbau eines Wärmespeichers vielfach sehr zweckmäßig, um die Turbine gleichmäßig ausnutzen zu können. Reicht der Abdampf nur teilweise aus, so verwendet man **Z w e i d r u c k t u r b i n e n**, deren Hochdruckteil Frischdampf zugeführt wird. Wird Dampf für Heiz- oder Industrielle Zwecke benötigt, so wählt man **G e g e n d r u c k - u n d A n z a p f t u r b i n e n**. Erstere besitzt meistens nur eine Druckstufe, letztere eine der Frischdampfturbine entsprechende Anzahl.

Der Dampfverbrauch der Turbinen entspricht dem guter Kolbenmaschinen, liegt teilweise sogar darunter. Er ist sehr abhängig von der Güte des Vakuums und der Höhe der Überhitzung und beträgt 8 bis 5 kg/kWh. Drehstrom-Turbo-Generatoren für 3000 U/min werden bis 12 500 kVA, solche für 1500 U/min bis

25 000 kVA und für 1000 U/min bis 60 000 kVA ausgeführt. Gleichstromturbo-
generatoren werden bei 3000 U/min bis 1000 kW, bei 1500 U/min bis 2500 kW
gebaut. (Vgl. Abb. 298 bis 301.) Die Vorteile der Dampfturbinen gegenüber
Kolbenmaschinen sind: höhere Umdrehungszahlen, billigere Anlagekosten, ölfreies
Kondensat, geringer Raumbedarf, Gewichtersparnis, gleichförmiger Gang und
geringere Abnutzung und Bedienung.

(620) **Dampfkessel.** Die wichtigsten für elektrische Kraftwerke in Frage
kommenden Kesselarten sind in der folgenden Übersicht gekennzeichnet:

Nummer	Kesselart	Heizfläche in m ²	Auf 1 m ² Heizfläche bezogen					Wirkungsgrad	Bemerkungen.	
			Grundfläche m ²	Wasserinhalt l	Dampf- inhalt kg	Verdamp- fende Ober- fläche in m ²	Ge- wicht kg			Verdamp- fung kg/h
1.	Einflam- rohrkessel	5	0,55	150	50	0,2	210	20	68	Gallowayrohre zur Ver- stärkung des Wasser- umlaufes nur bei gutem Zug.
		bis 40	0,82	260	90	0,4	270	25		
2.	Zweiflam- rohrkessel	30	0,40	190	65	0,22	240	25	68	Notwendig für größere Heizflächen.
		bis 120	0,55	240	100	0,30	280	30		
3.	Heizröhren- kessel	20	0,19	65	20	0,06	90	15	69	Große Heizfläche auf kleiner Grundfläche. Rostfläche gering, gutes Speisewasser und Bedienung nötig.
		bis 150	0,40	130	60	0,15	110	20		
4.	Wasserrohr- kessel mit einem Ober- kessel	10	0,1	47	23	0,05	100	18	70	Starker Wasserumlauf, großer Rost möglich. Hohe Kesseldrücke üblich. Schwierige Reinigung.
		bis 300	0,2	70	50	0,18	300	25		
5.	Steilrohr- (Hoch- leistungs-) Kessel	150 bis 750	0,07 0,15	35 60	15 20	0,02 0,03	153 166	30 40	75	Querkessel an der Stirn- seite, kleine Grund- fläche, Ekonomiser direkt über dem Kessel, tadelloses Speisewasser. Schnelle Dampfzeugung.

Der unter 5 genannte Kesseltyp ist neuerdings in großen Kraftwerken mit
stark wechselnder Belastung vielfach in Anwendung gekommen. Kessel in
Kraftwerken erhalten meistens automatische Wanderroste mit einstellbarer Ge-
schwindigkeit. Für minderwertige oder feuchte Brennstoffe werden Schräg- oder
Treppenroste oder eine Verbindung von Schräg- mit Kettenrost verwendet. Auch
die Frage der Unter- bzw. Überwindfeuerung ist neuerdings eingehender be-
arbeitet worden. Infolge der Kohlenknappheit werden vielleicht Ölf Feuerungen
eine gewisse Bedeutung erlangen. Diese arbeiten mit Zentrifugal-Dampfstrahl-
und Druckluftzerstäubern. 1 kg Öl von 10 000 kcal soll 10 kg Dampf erzeugen.
Vorteile: Fortfall der Kohlentransportanlage, Asche und Schlacke. Möglichkeit
der Anbringung neben der Kohlenfeuerung. Die Frage der Kohlenstauffeuerung
ist im Begriff, einer befriedigenden Lösung entgegengeführt zu werden. Die

leichte Regulierbarkeit macht sie für Kraftwerke mit stark schwankender Belastung besonders wertvoll.

(621) Nebenapparate. Einen wesentlichen und wichtigen Bestandteil der Dampfanlagen bilden die Einrichtungen zur Kondensation des Dampfes zwecks Rückgewinnung bereits warmen Wassers zur Kesselspeisung. Man unterscheidet Misch-, Oberflächen- und Strahlkondensationsanlagen. Bei den Mischkondensatoren wird der Dampf mit dem eingespritzten Kühlwasser vermischt. Sie sind billiger, sicherer im Betrieb und gebrauchen etwa $\frac{1}{3}$ weniger Kühlwasser als Oberflächenkondensatoren, geben aber ein geringeres Vakuum. Bei Oberflächenkondensatoren wird der Dampf in Metallröhren niedergeschlagen, die durch Kühlwasser kalt gehalten werden. Dampf und Kühlwasser kommen nicht in Berührung miteinander. Bei dem Strahlkondensator wird durch Wasser von 0,6—0,8 Atm Druck Dampf und Luft durch Düsenwirkung abgesaugt und der Dampf niedergeschlagen. Bei Dampfturbinen wird meist Oberflächenkondensation angewendet. Das Absaugen der Luft geschieht durch Luftpumpe oder Strahlapparat, dem durch besondere Pumpe das Druckwasser zugeführt wird. Die Kühlwasserpumpen mit Strahlpumpe und Kondensatpumpe sind oft in einem Aggregat vereinigt, das durch eine kleine Dampfturbine oder durch Elektromotor angetrieben wird. Für Mischkondensation mit getrennter Luftabsaugung ist eine Warmwasser-, für Oberflächenkondensation eine Kaltwasserpumpe, bei Oberflächenkondensatoren außerdem eine Kondensatpumpe erforderlich. Zum Absaugen des mit Öl vermischten Niederschlagswassers der Dampfmaschinenanlagen aus dem Ölabscheider gelangt eine Ölwasserpumpe zur Aufstellung. Bei Mangel an Kühlwasser werden sog. Kühltürme aufgestellt.

Um die aus dem Kessel abziehenden Heizgase weiter auszunutzen, werden im Fuchs Vorwärmer (Ekonomiser) eingebaut, die das Kesselspeisewasser bis auf 130° C erwärmen können. Das zuzuführende Wasser soll wegen des Schwitzwassers an den Vorwärmerrohren auf mindestens 30° C vorgewärmt sein. Die Rohre werden stehend und schlangenförmig angeordnet und außen durch dauernd auf- und abgehende Schaber vom Ruß befreit. Der Antrieb der Schaber erfolgt durch Elektromotor. Die Erzeugung des erforderlichen Zuges geschieht auf natürlichem (Schornstein) Wege oder durch künstlichen Zug unter Verwendung von meist durch Elektromotoren angetriebenen Schleuder- oder Strahlgebläsen. Die Gebläse werden vor oder hinter dem Rost angebracht. Bei Anwendung von Unterwindfeuerung muß der Aschenraum geschlossen sein. Die Zuführung des Brennstoffes zum Rost erfolgt in größeren Kesselanlagen automatisch unter Wägung. Für zweckmäßige und billig arbeitende Entschungsanlagen ist zu sorgen. Die Beförderung der Schlacke und Asche aus dem Kesselhause erfolgt in größeren Werken durch besondere Förderanlagen, die Rückgewinnung der noch unverbrannten Kohleteilchen neuerdings durch Magnetscheider. Für die Kesselspeisung dienen Kolbendampfpumpen, seltener Schleuderpumpen mit elektrischem Antrieb. Die Aufstellung geschieht am besten in einem besonderen Raume dicht neben dem Kesselhause.

(622) Verbrennungsmaschinen. Das Kraftgas wird unter Druck im Arbeitszylinder entzündet und plötzlich oder allmählich (Diesel) verbrannt. Die auf 13—14 bzw. 30—35 At. gespannten Verbrennungsgase übertragen durch Expansion die Arbeit auf den Kolben. Man unterscheidet Zwei- und Viertaktmotoren. Bei ersteren wird das bereits durch besondere Pumpe verdichtete Gemisch dem Zylinder zugeführt. Die verbrannten Gase werden durch das frische Gemisch oder durch Spülluft aus dem Zylinder getrieben.

Bei den Viertaktmaschinen spielt sich der Arbeitsvorgang in 4 Hüben ab. 1. Ansaugen des Gas- und Luftgemisches, 2. Verdichtung der Ladung, 3. Verbrennen unter Leistung von Arbeit, 4. Ausstoßen der verbrannten Gase.

Die Zündung erfolgt durch Glührohr, Induktor oder durch die Kompressionswärme (Diesel). Die Regelung der Umdrehungen oder der Leistung erfolgt durch Veränderung der Menge der Ladung, durch Veränderung der Zusammensetzung der Ladung, durch Ermöglichung beider Regelungsweisen an derselben Maschine und durch Regelung auf gleichbleibendes Gemenge und gleichen Enddruck der Verdichtung. Das Anlassen geschieht durch Druckluft oder durch eine als Motor geschaltete Dynamomaschine. Der Kühlwasserbedarf beträgt bei Gasmaschinen 15—75, bei Dieselmotoren 15—35 l/kWh.

Für den Kraftwerksbetrieb kommen hauptsächlich Dieselmotoren in Frage, die in stehender Ausführung von 20—150 kW einzylindrig und von 80—300 kW zweizylindrig, darüber hinaus drei- bis vierzylindrig ausgeführt werden. Nach dem Kriege sind vielfach U-Boots-Dieselmotoren zur Aufstellung gekommen. Neuerdings werden auch liegende Dieselmotoren als Tandemmaschinen mit zwei Zylindern von 600—2000 kW und Zwillingstandemmaschinen mit vier Zylindern von 1200—4000 kW ausgeführt. Der Bau liegender Dieselmotoren bietet konstruktive Schwierigkeiten bezüglich der dauernden Dichtigkeit der Kolben und der Brennstoffeinführung.

Der Platzbedarf und die Gebäudekosten eines Kraftwerkes für Dieselmotoren sind bedeutend geringer als für eine Dampfanlage, da die Kessel- und Kondensationsanlagen fortfallen. Da der Dieselmotor innerhalb weniger Minuten angelassen werden kann, eignet er sich vorzüglich für die Deckung von Spitzenbelastungen.

für	Maschinen		Kraftstoff	
	übliche Größe in kW	minutliche Umdrehungszahl	mittlerer Heizwert	Verbrauch für 1 kWh
Leuchtgas	4—15	200	—	880 l
	15—75	180	5000 kcal/m ³	750 l
	75—750	130	—	700 l
Kraftgas (Anthrazit)	15—75	180	—	0,7 kg
	75—750	130	7900 kcal/kg	0,55 kg
Benzin	4—57	—	11 000 „	0,7—0,33 kg
Petroleum	4—25	—	10 750 „	0,7 kg
Spiritus	4—45	—	6000 „	0,64 kg
Paraffinöl (Dieselmotor) stehend und liegend	20—750	250—150	10 000 „	0,34—0,26 kg
	600—4000	150—94	10 000 „	0,33 kg

(623) Wasserkraftmaschinen. Die Ausnutzung der natürlichen Kraftquelle, des Wassers, wird voraussichtlich die nächste Zukunft beherrschen. Für Kraftwerke kommen fast nur Turbinen in Frage. Man unterscheidet entsprechend der Durchflußrichtung des Wassers durch das Laufrad 1. Axial-, 2. Zentripetal-, 3. Zentrifugal- und 4. Tangentialturbinen, und nach den Druckverhältnissen im Laufrad Druck- und Überdruckturbinen. Es gibt eine ganze Anzahl Abarten und Kombinationen dieser Turbinentypen. Von besonderer Bedeutung sind die Tangentialdruck- (Pelton- und Löffel-) und die Zentripetal-Überdruck-(Francis-)Turbinen. Man verwendet für Gefälle bis 15 m vertikale Einrad- oder horizontale Ein- und Mehrrad-Francisturbinen, letztere zur Erhöhung der Drehzahl und besseren Angleichung an die Generatortypen. Für Gefälle über 15 bis 50 m nimmt man horizontale Kessel- oder Spiral-Francisturbinen oder, wo der Einbau möglich, vertikale Einradturbinen; für noch höhere Gefälle Francis-Spiral- oder Peltonurbinen in horizontaler Ausführung. Die an der Turbinenwelle zur Verfügung stehende Leistung berechnet sich aus der Faustformel $7,5 \cdot Q \cdot H$ in kW bei einem Wirkungsgrad von 75% der Anlage. Die Leistung an den

Klemmen des Stromerzeugers wird $N = \frac{1000 \cdot Q \cdot H \cdot \eta \cdot \eta_1}{102}$ kW, wo η und η_1 den Wirkungsgrad der Turbine und des Stromerzeugers bedeuten. Durch geeignete Turbinen können Gefälle von 0,5 bis 500 m ausgenutzt werden.

Die Leistung der Turbinen wird durch Drosselung, durch Abdeckung der Leitkanäle oder noch besser durch Anwendung von Drehschaufeln, die die Querschnitte der Leitkanäle je nach der Leistung verändern, geregelt. Bei Drehschaufelregulierung erzielt man folgende Wirkungsgrade:

bei Langsamläufern	75—80%
bei Normalläufern	80—85%
bei Schnellläufern	70—80%

Die Regulierung moderner Turbinen erfolgt durch automatische Regler, die bei Hochdruckturbinen mit Druckwasser, sonst mit Drucköl betrieben werden. Dieses wird bis max. auf 20 Atm gepreßt und betätigt durch geeignete Steuerorgane die eigentlichen Steuerkolben. Die Regler müssen mit einer beweglichen Rückführung ausgestattet sein, damit bei jeder Öffnung der Turbine die Regulierung von einer Nulllage des Stellzeuges aus erfolgen kann. Die Änderung der normalen Umdrehungen kann durch Hand und durch einen kleinen sog. Servomotor von der Schaltbühne aus vorgenommen werden.

Anlage der Kraftwerke.

(624) Wahl des Grundstückes. Bei der Auswahl des Grundstückes für ein Kraftwerk sind folgende Gesichtspunkte maßgebend:

1. Das Grundstück muß mit Rücksicht auf Erweiterungsbauten und Nebenbaulichkeiten reichlich groß gewählt werden. Zu berücksichtigen sind dabei die Gründungsverhältnisse. Geeignet sind Felsboden, Gerölle, Kies, grobkörniger Sand, Mergel, fester Ton, feinkörniger Sand und trockener Lehm oder mittelfester Tonboden bei genügender Mächtigkeit und zuletzt weicher Ton- und feuchter, feinkörniger Sandboden. Boden unter 1 kg/cm² Tragfähigkeit ist zu vermeiden, andernfalls muß er künstlich befestigt werden. Das Grundstück soll ferner möglichst billig sein, dabei aber sich in zentraler Lage zum Versorgungsgebiet befinden. Bei Stadtwerken ist diese Bedingung vielfach nicht einzuhalten. Eine stark exzentrische Lage des Werkes verteuert die Kosten für die Verteilungsleitungen bedeutend. Eine sorgfältige Abwägung der gegensätzlichen Kosten ist in diesem Falle unbedingt notwendig.

2. Antriebsmaschinen. Bei Verwendung von Dampfmaschinen sind die gesetzlichen Bestimmungen für die Aufstellung von Kesselanlagen, bei Dampfturbinen außerdem die Belästigungen der Anlieger durch Geräusche zu berücksichtigen.

Diesel- und Gasmaschinen unterliegen weniger Beschränkungen, jedoch ist auch hierbei darauf zu achten, daß die Nachbarschaft nicht durch Geräusche (Fehlzündungen) oder Abgase belästigt wird. Bei Stadtzentralen ist für schallsichere Fundierung der Maschinen Sorge zu tragen.

3. Wasserbeschaffung. Diese ist oft von entscheidendem Einfluß besonders bei Dampfturbinenanlagen. Ein reichlicher, nach der Maschinenart zu berechnender Wasserzufluß von gleichbleibender Stärke ist Hauptbedingung. Bei Dampfanlagen ist auch die Eignung des Wassers zur Kesselspeisung zu untersuchen. Hat dieses mehr als 10 Härtegrade, so müssen besondere Wasserreiniger aufgestellt werden. Bei geringer Wasserergiebigkeit werden Rückkühlanlagen angewendet, die eine große Fläche in Anspruch nehmen.

4. Wasserabfluß. Dieser soll wenn möglich in ein Kanalisationssystem oder direkt in einen Fluß erfolgen. Bei stark ölhaltigem Wasser wird der Einbau von Ölabscheidern vorgeschrieben. Die Rückleitung des warmen Wassers, falls es nicht für Bade- oder Heizzwecke nutzbringend verwertet werden kann, erfolgt bei Flüssen unterhalb der Entnahmestelle.

5. **Kohlenzufuhr.** Der Transport der Kohlen soll möglichst billig sein, daher Anschlußgleis erstrebenswert. Anderenfalls sind besondere Transportbahnen mit selbsttätigen Kohlenkippern bzw. bei Flüssen Kohlenentladevorrichtungen nötig. Zur Förderung in die Kohlenbunker des Kesselhauses vom Lagerplatz aus wählt man Hängebahnen, Becher- und Bandwerke. Wägevorrichtungen für die angelieferten Kohlen sind ebenfalls notwendig.

Vorteilhaft ist es, wenn das Elektrizitätswerk in die Nähe des Gaswerkes gesetzt wird, dessen Einrichtungen zum Teil mitbenutzt und dessen Nebenprodukte oftmals günstig ausgenutzt werden können.

(625) Anordnung der Gebäude- und Maschinenanlagen. Die das Kraftwerk umfassenden Gebäude bestehen aus Maschinenhaus, Kesselhaus, Schalthaus, Werkstätten, Lagerräumen und Verwaltungsgebäuden bzw. Beamtenwohnhäusern. Die Gebäude sind möglichst auf die eine Seite des Grundstückes zu setzen, um später bei Erweiterungen in keiner Weise hinderlich zu sein. Je nach Größe und Art des Kraftwerkes sind für die genannten Räume eigene Gebäude zu erstellen, oder die einzelnen Räume zusammenzufassen. Bei Wasserkraft-, Diesel-, Leuchtgas- und Lokomobilanlagen fallen die Kesselräume naturgemäß fort. Für Sauggasanlagen sind außer den kleinen Kesselhäusern besondere Räume für die Gasreinigung vorzusehen. Die Längsachsen der Maschinen- und Kesselhäuser werden bei Dampfmaschinenanlagen zweckmäßig parallel, bei Dampfturbinenanlagen meist senkrecht zueinander angeordnet. Hauptgewicht ist auf möglichst kurze Rohrleitungen zu legen. Die Werkstatt soll so liegen, daß der Transport der ausbesserungsbedürftigen Teile möglichst einfach und leicht erfolgen kann. Die Maschinenhäuser sind bis 2 m Höhe mit Kacheln oder Verblendsteinen, mit hellgestrichenen Wänden, reichlicher Anzahl von Fenstern und einer Decke ohne störende Resonanzwirkung zu versehen. Der Fußboden ist zweckmäßig mit geriffelten Fliesen zu belegen. Für gleichmäßige Beleuchtung ist zu sorgen. Fundamente sind möglichst aus (dunkelgestrichenem) Beton herzustellen. Türen und Kellertreppen sollen genügend breit sein, um Transporte zu erleichtern. Bei Kesselhäusern ist auf reichliche Belüftung unter Vermeidung von Zugluft zu achten. Der Bedienungsgang soll mindestens 3 m breit sein. Bei Wasserrohrkesseln ist darauf zu achten, daß der Raum hinter den Kesseln Platz zum Ausziehen der Rohre bietet; wenn dieses nicht möglich, müssen Fenster zu diesem Zwecke vorgesehen werden. Die Akkumulatorenbatterieräume müssen säurefesten, mit Gefälle verlegten und mit Ablaufrinnen versehenen Bodenbelag, reichliche Entlüftung, säurebeständigen Wandastrich und Decken aus Beton erhalten, (602, 603). Die Gase dürfen nicht in Maschinen- oder Schalträume gelangen können. Kondensations- und Pumpenräume sollen keine Schmutzlöcher, sondern so gebaut sein, daß auch sie übersichtlich und leicht zu reinigen sind. Dampfleitungen sind sorgfältig zu isolieren (auch die Flanschen); Ausbildung als Ringleitung ist zweckmäßig. Die Dampfgeschwindigkeit ist möglichst hoch zu wählen.

(626) Gleichstrom-Kraftwerke. Der Gleichstrom besitzt bezüglich seiner Verwendbarkeit eine Anzahl von Vorzügen gegenüber dem Wechselstrom, ist aber in seinem Aktionsradius beschränkt. Auch die Möglichkeit der Akkumulierung ist ein nicht zu unterschätzender Vorzug. Er wird daher in den größeren Städten angewendet. Die Maschinensätze sind nach dem Charakter der Belastungen so zu bemessen, daß sie möglichst rationell ausgenutzt werden können. Für Spitzenbelastungen werden oft besondere, leicht anlaßbare Aggregate vorgesehen, sofern nicht die Batterie die Deckung übernehmen kann. Die Zahl der Zusatzaggregate ist tunlichst zu beschränken. Erreicht wird dieses dadurch, daß eine oder mehrere Hauptmaschinen für erhöhte Spannung gebaut sind. Ausgleichsaggregate lassen sich durch Aufstellung spannungsteilender Batterien (Kraftwerk und Unterstation) vermeiden. Zusatzmaschinen kann man bei Vorhandensein einer Pufferbatterie für die Straßenbahn umgehen, wenn man eine Hauptmaschine mit der gesamten Batterie zusammen auf besondere Sammel-

schiene für erhöhte Spannung schaltet. Da die Gleichstromwerke neuerdings vielfach Energie von Fernkraftwerken beziehen, haben die Motorgeneratoren, Einanker- und Kaskadenumformer sowie Großgleichrichter eine erhöhte Bedeutung gewonnen (569 u. f.). Um in diesem Falle bei Störungen die notwendige Reserve zu haben, werden trotz der hohen Kosten nicht zu kleine Batterien mit kurzzeitiger Entladung aufgestellt. In der Batterie gehen zwar etwa 25% der eingeleiteten Energie verloren, es ist aber dabei zu berücksichtigen, daß nur ein geringer Bruchteil der vom Kraftwerk abgegebenen Energie auf Batteriestrom entfällt.

(627) Drehstrom-Kraftwerke. Zur Verteilung der elektrischen Energie auf große Gebiete und weite Entfernungen wird wegen der Möglichkeit, leicht hohe Spannungen zu erzeugen, der Wechselstrom, und zwar wegen seiner Vorteile für die Verteilung (663), (666) und der einfach zu bedienenden Motoren (721 b, c), (724) in der Form des Drehstroms angewandt. Die Generatoren werden bis zu einer Spannung von 10 000 V noch betriebssicher gebaut. Sie werden meistens mit den Antriebsmaschinen direkt gekuppelt. Für größere Werke ist besonders die Dampfturbine in Aufnahme gekommen. Es sind Maschinensätze bis 60 000 kW Einzelleistung bereits ausgeführt worden. Derartige Sätze arbeiten jedoch nur dann wirtschaftlich, wenn eine genügend hohe Grundbelastung vorhanden ist. Bei Kraftwerken mit vorwiegend landwirtschaftlichem Absatzgebiet ist es vorteilhaft, verschieden große Aggregate zu wählen, um die einzelnen Maschinen je nach den Betriebsverhältnissen günstig ausnutzen zu können. Mit Rücksicht auf die bei Drehstrom auftretenden Blindströme müssen die Generatoren nach der scheinbaren Leistung in kVA gewählt werden, während die Bestimmung der Antriebsmaschinen stets nach der wirklichen Leistung zu erfolgen hat. Für ein genügend großes Schwungmoment ist Sorge zu tragen. Man legt dieses in den Läufer oder verteilt es auf diesen und ein besonderes Schwungrad, um bei Ausbesserungsarbeiten am Läufer nicht zu schwere Werkstücke zu erhalten (Abb. 303, 304). Die Erregung der Generatoren geschieht durch Gleichstrom von 110 oder 220 V. Die Erregermaschinen werden entweder direkt auf die Hauptwelle des Generators gesetzt (Abb. 299, 300, 301, 306) oder erhalten eigene kleine Antriebsmaschinen, wenn die Erregung zentralisiert ist. Als Reserve dienen Motorgeneratoren oder kleine Batterien. Um ein Parallelschalten von Drehstromgeneratoren zu ermöglichen, müssen gleiche Frequenz, Phasengleichheit, gleiche Spannung und gleiche Drehfeldrichtung an den zusammenschaltenden Maschinen vorhanden sein (481 u. folg.). Die Regulierung der Spannung erfolgt durch Hand oder bei größeren Werken durch Schnellregler (584 und 585) oder Eilregler (583). Die gebräuchliche Frequenz der Drehstromgeneratoren für gemischten, d. h. Licht- und Kraftbetrieb, beträgt 50 Per/s. Wechselstrombahnwerke arbeiten vielfach mit 25 Per/s. Die Wahl der Spannung richtet sich nach der Größe des Versorgungsgebietes und der Entfernungen. Die Umsetzung der Generatorspannung auf die Netzspannung erfolgt durch Transformatoren, die in besonderen, abschließbaren Kammern Aufstellung finden.

Die Kühlung der Generatoren erfolgt durch die im Läufer und Ständer angeordneten Ventilationswege (359, 367, Abb. 298 bis 301). Bei Dampfturbinenanlagen wird den Generatoren durch Filter gereinigte Luft zugeführt.

Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke.

(628) Betriebskosten der Kraftwerke. Die jährlichen Betriebskosten setzen sich zusammen aus:

1. veränderlichen Kosten, die von der jährlichen Stromerzeugung abhängig sind. Sie umschließen a) Kraftstoff, b) Schmier- und Putzmaterial, c) Wasserbeschaffung, d) Instandhaltung (Ausbesserungen), e) Löhne und Gehälter für das Betriebspersonal, f) allgemeine Unkosten (Steuern).
2. festen Kosten, die von der Größe des Werkes und des für die Anlage angewendeten Kapitals abhängig sind, und zwar a) Gehälter für das Verwal-

tungspersonal, b) Abgaben, Versicherungen und sonstige Ausgaben, c) Tilgung (Amortisation), d) Erneuerung, e) Verzinsung.

Die unter 1 e genannten Ausgaben für Löhne und Gehälter sind eigentlich nur teilweise von der Jahresstromerzeugung direkt abhängig, da ein bestimmter Personalstand auch bei der schlechtesten Ausnutzung des Werkes vorhanden sein muß. Aus den unter 1 genannten Kosten errechnen sich die reinen Gestehungskosten. Treten hierzu die Kosten unter 2 a und b, so erhält man die wirklichen Gestehungskosten und unter Berücksichtigung der übrigen unter 2 genannten Ausgaben die Gesamtkosten der Stromerzeugung. Werke, deren Konzessionsdauer begrenzt ist, müssen das Kapital innerhalb der Konzessionsdauer tilgen. Es kann entweder das Aktien- oder das Anlagekapital getilgt werden. Letztere Form ist der Einfachheit und Gleichmäßigkeit wegen vorzuziehen. Die jährliche Tilgungsquote bestimmt sich aus der Formel $K \cdot p \cdot (1+p)^n / [(1+p)^n - 1]$, wo K = Anlagekapital, p = Zinssatz (3% = 0,03), n = Anzahl der Jahre bedeuten. Aber auch Werke mit unbegrenzter Konzessionsdauer und der Staat sehen oft eine bestimmte jährliche Tilgungsquote (0,5—1%) vor. Mit Rücksicht auf die Abnutzung der Anlageteile oder Neuerungen auf technischem Gebiet ist der Erneuerungsfond von besonderer Wichtigkeit. Hierfür wird jährlich ein bestimmter Prozentsatz der Anlagekosten dieser Teile von dem Gewinn abgeführt, und zwar für

1. Gebäude	0,5—1%	10. Kabelnetze	2%
2. Wasserwerksanlagen . .	0,5—1%	11. Transformatoren	3—5%
3. Dampfmaschinen, Turbinen	4—5%	12. Holzmasse	8—10%
4. Kesselanlagen u. Rohrleitungen	5%	13. Eisen u. Betonmasse . .	4—5%
5. Verbrennungsmaschinen .	5%	14. Zähler	6%
6. Dynamomaschinen	4%	15. Oberleitungsmaterial f. Bahnen	2%
7. Schaltanlagen	4%	16. Gleismaterial f. Bahnen .	1%
8. Akkumulatoren	6—10%	17. Werkzeug, Inventar . . .	4—10%
9. Freileitungsnetze	2—3%	18. Kraftwagen	10—20%

Durchschnittlich beträgt der dem Erneuerungsfond zuzuführende Betrag jährlich $1\frac{1}{2}$ —2% des Anlagekapitals.

Da die festen Kosten etwa $\frac{2}{3}$ der jährlichen gesamten Betriebskosten ausmachen, ist es von größter Wichtigkeit und einschneidendem Einfluß, die Anlagekosten für 1 kW so niedrig wie möglich zu gestalten. Nach Dettmar betragen vor dem Kriege die mittleren Anlagekosten für 1 kW für Werke bis 1000 kW Leistung 1122—1312 GM., von 1001 bis 5000 kW 1002 GM. und von 5001 und darüber 868—990 GM. Dieselben Kosten betragen je nach der Antriebsart: für Wasser 1300 GM., Dampf 1125 GM., Verbrennungsmotoren 1330 GM., Wasser und Dampf 1437 GM. für 1 kW Leistung. Die Folgen des Krieges haben große Umwälzungen in den finanziellen Verhältnissen der Werke hervorgerufen. Wenn auch durch die Verordnung vom 1. 2. 1919 über die Erhöhung der Gas-, Wasser- und Elektrizitätspreise diese den veränderten Verhältnissen einigermaßen angepaßt werden konnten, war es in den meisten Fällen durch die rasch steigende Geldentwertung nicht möglich, die erforderlichen Mittel für Neuanschaffungen, Ersatzstücke usw. bereit zu stellen. Das Vorhandensein von Gold- und Papiermarkwerten in derselben Anlage schuf Verwirrung, zumal eine gesetzliche Regelung und Festsetzung für die Zwecke der Bilanz ausblieb. Um die Erneuerungsfonds entsprechend zu speisen und das Anlagekapital bei später eintretender Besserung substantiell zu sichern, haben die meisten Werke besondere Konten (Werkerhaltungs- und Wertverminderungskonten) eingestellt. Durchaus notwendige Erweiterungen mußten durch Ausgabe von Schuldverschreibungen, starke Erhöhung des Anlagekapitals oder durch Zwangsanleihen finanziert werden. Der Gang der weiteren Entwicklung ist noch nicht zu übersehen. Die Rückkehr zur Goldmarkrechnung gibt den Werken wenigstens die Möglichkeit, endlich ein klares Bild über die finanziellen

Verhältnisse sich zu verschaffen und durch angemessene Preise den Substanzverlust etwas auszugleichen.

(629) Betriebsführung und Statistik. Von der größten Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit der Kraftwerke ist eine gewissenhafte Betriebsführung und genaue Kontrolle der die Erzeugung beeinflussenden Faktoren. Die Kontrolle erstreckt sich auf die Erzeugung, die abgegebene Energie und die Auswertung des gesammelten Materials durch die Betriebsstatistik. Zur Überwachung der Erzeugung benutzt man je nach ihrer Art automatische Wagen, Gas- und Wassermesser, Rauchgasanalysatoren, Luftmengenmesser, Speisewassermesser, Dampfverbrauchsmesser, Kalorimeter, Indikatoren. Das Schmieröl ist dauernd auf Güte und Höhe des Verbrauches zu kontrollieren. Zeitweise sind kalorimetrische Untersuchungen der Kohle und Verdampfungsversuche an den Kesseln vorzunehmen. Auch der Wirkungsgrad des Betriebspersonals läßt sich durch durchdachte Anweisungen, gutes Handwerkszeug, geeignete maschinelle Vorrichtungen und dauernde genaue Kontrolle erhöhen. Die elektrischen Meßinstrumente, wie Zähler, registrierende Volt-, Watt-, Phasemesser und Thermometer gestatten eine bequeme Überwachung der erzeugten Energie und der dazu gehörenden elektrischen Maschinen und Apparate. Die Messung der für eigene Kraft- und Lichtzwecke verbrauchten Energie ist ebenfalls nicht zu vernachlässigen. Wo Akkumulatoren vorhanden sind, sollte auf die genaue Messung der eingeleiteten und abgegebenen Energie nicht verzichtet werden. Die Angaben aller dieser Instrumente erhalten aber erst Wert, wenn sie systematisch und regelmäßig statistisch verwendet werden. Daher ist besondere Sorgfalt auf die Ausgestaltung und Ausarbeitung der monatlichen bzw. jährlichen Betriebsübersicht zu legen. Diese soll alle wirtschaftlichen und technischen Angaben des Werkes in übersichtlicher Form enthalten, so daß der Stand des Unternehmens und die Ausnutzung der Maschinen daraus klar ersichtlich ist.

(630) Ausnutzung der Kraftwerke. Diese wird charakterisiert durch Höhe, Verteilung und Dauer der Belastung. Eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Belastung ist durch eine überlegte Tarifpolitik anzustreben. Ein Bild von der Verteilung der Belastung erhält man durch die aus den stündlichen Zählerablesungen oder Notierungen der Leistung des Kraftwerkes gewonnenen Unterlagen. Meistens werden die Tage schwächster und stärkster Belastung zur Charakterisierung herangezogen. Ein genaueres Bild der tatsächlichen Verhältnisse erhält man nach dem Verfahren von Schendell, bei dem sämtliche stündlichen Belastungen während eines Monats in Tabellenform zusammengestellt, die Höchst-, berechneten Mittel- und die Niedrigstwerte durch Farbstift kenntlich gemacht, herausgezogen und dann graphisch aufgetragen werden (Abb. 349 u. 350). Man gewinnt auf diese Weise Belastungskurven, bezogen auf die gleichen Stunden sowie die Tage des Monats und, wenn man diese Werte für alle Monate zusammenfaßt, neue Kurven, bezogen auf die gleichen Stunden, gleichen Tage und die Monate des Jahres. Aus ihnen sind sämtliche für den Betrieb wichtigen Verhältnisse, wie Ausnutzung der vorhandenen Maschinen, noch bestehende Anschlußmöglichkeiten in bezug auf Größe und zeitliche Verteilung, das Verhältnis der Spitzenleistungen zu den mittleren Belastungen, Inanspruchnahme des Stauraumes bei Wasserkraftanlagen, Größe der erforderlichen Maschinenleistung für Spitzendeckung, des kleinsten Maschinensatzes für Niedrigstleistungen und die für einen bestimmten Zeitpunkt bereitzustellenden Maschinenleistungen zu entnehmen. Kraftwerke mit reiner Lichtbelastung weisen sehr ungünstige Belastungskurven auf. Günstiger liegen die Verhältnisse bei Werken mit Straßenbahn- und Kleingewerbeanschluß; noch günstiger bei Anschlüssen von Großindustriewerken. Den Mangel der schwachen nächtlichen Belastung sucht man durch den Anschluß eigener oder fremder Akkumulatorenbatterien, durch industrielle oder chemische Nachtbetriebe nach Möglichkeit zu beseitigen. Zur Beurteilung der Ausnutzung eines Kraftwerkes sind folgende Faktoren von Wichtigkeit:

1. Benutzungsziffer = Erzeugte kWh/Spitzenleistung in kW,
2. Belastungsfaktor = Benutzungsziffer/Anzahl der Jahres-Betr.-Stunden,
3. Ausnutzungsfaktor = Mittlere Belastung in kW/vorh. Masch. Leistung,
4. Betriebszeitfaktor = Maschinenbetriebsstunden/Maschinenzahl × Jahres-Betr.-Stunden,

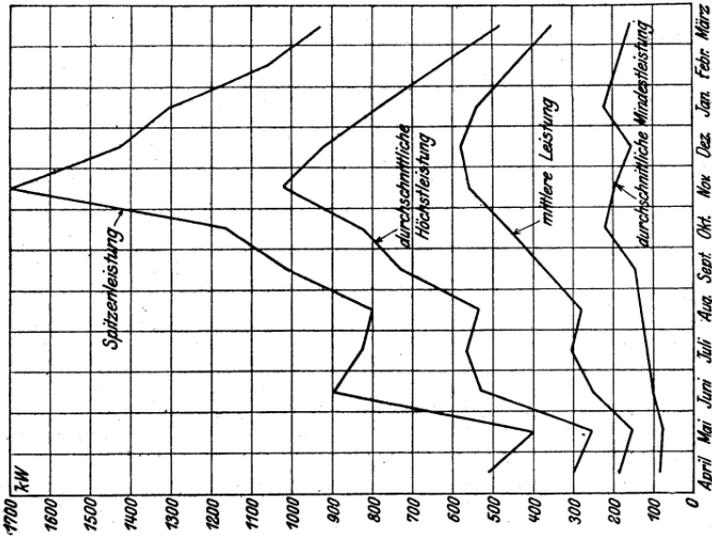


Abb. 350.

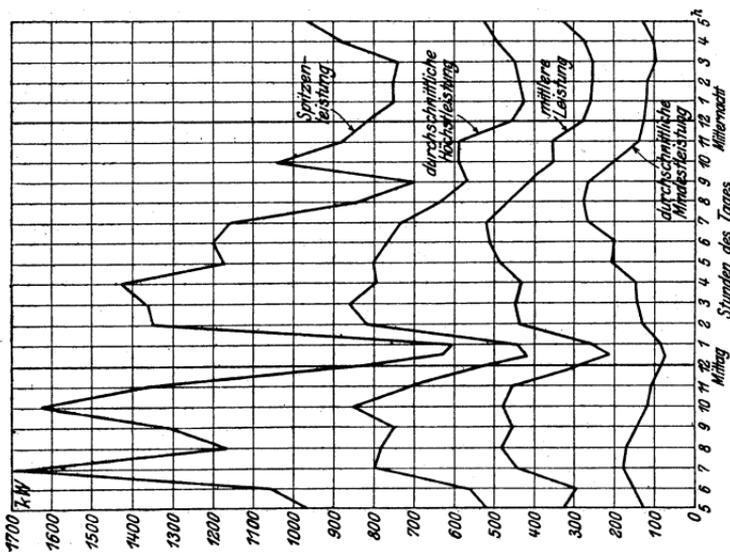


Abb. 349 u. 350. Belastungskurven.

Abb. 349.

5. Reservefaktor = Spitzenleistung in kW/Maschinenleistung in kW,
6. Belastungsschwelligung = Spitzenleistung in kW/Mittlere Belastung in kW,
7. Abnehmerbenutzungsziffer = verkaufte kWh/Anschlußwert in kW,
8. Leistungsbedarf = Maschinenleistung in kW/Anschlußwert in kW.

Bei Anschluß von Großabnehmern bedarf die Festlegung des Strompreises ganz besonderer Überlegung und Würdigung aller in Betracht kommenden Faktoren, wie Höhe, Verteilung und Benutzungsziffer der neu hinzutretenden Belastung. Die verwendeten Selbstkostenformeln müssen eine angemessene Verteilung der veränderlichen Kosten auf die kWh, der festen Kosten auf die in Anspruch genommenen kW und die Benutzungsziffer berücksichtigen. Sind infolge des neuen Anschlusses Erweiterungen im Kraftwerk notwendig, so sind die Kosten anteilig dem neuen Stromabnehmer ebenfalls in Anrechnung zu bringen.

Literatur: W. Meyer, Die Bedeutung neuerer wirtschaftl.-techn. Erfahrungen u. Erfolge. ETZ 1911, S. 203. — Klingenberg, Richtl. f. d. Bau groß. El.-W. mit Dampftrieb. ETZ 1912, S. 731. — Frey u. O. Albrecht, Das Kraftwerk Wyhlen. ETZ 1913, S. 1048. — E. Josse, Die gegenw. Entw. hochwert. Kondensationsanlagen. ETZ 1914, S. 581. — H. R. Trinkler, Kraftgaserzeug. b. gleichzeitig. Gewinnung von Nebenprodukten. ETZ 1914, S. 672. — G. Klingenberg, Über d. Kraftbedarf d. Kondensationsanlagen. ETZ 1915, S. 197. — Techn. u. wirtsch. Erfahrung. im Dampfturbinenbetrieb. ETZ 1916, S. 23. — Die Statistik als Hilfsmittel f. Betriebsverwaltungen. ETZ 1916, S. 628. — G. Schendell, Belastungskurven von Kraftwerken. ETZ 1916, S. 381. — Fr. Münzinger, Erfahrung. im Bau u. Betrieb hochbeanspruchter Dampfkessel. Z. V. D. I. 1916, S. 933. — B. Schäfer, Neue Umformeranlagen mit Großgleichrichtern. ETZ 1917, S. 89. — Kollbohm, Die Kraftwerke des Kom. El.-W. Mark. ETZ 1917, S. 157. — Die Dampfturbinen der Masch.-Fabr. Augsburg-Nürnberg. ETZ 1917, S. 220. — G. Styff, D. Phasenvergleich b. d. Parallelschaltung v. Wechselstrommaschinen. ETZ 1917, S. 461. — A. Graf, Neue Wasserturbinenanlagen in Deutschland. Z. V. D. I. 1917, S. 5. — O. Wirmser, Versuche z. Verbrennung von Koksgrus auf Unterdampfer-Wanderrosten. Z. V. D. I. 1917, S. 818. — G. Klingenberg, Die Wirtschaftlichkeit von Nebenprodukten f. Kraftwerke. Z. V. D. I. 1918, S. 1. — H. R. Trinkler, D. Nebenproduktgewinnung aus Generatorgas. Z. V. D. I. 1918, S. 85. — G. Brecht, Verteilung d. wattl. Arbeit b. d. Parallelschaltung v. Kraftwerken. ETZ 1919, S. 125. — W. Strauß, Der günstige wirtschaftl. Wettbewerb zwischen Dampf- u. Wasserkraft. ETZ 1919, S. 200. — E. Philippi, Torfkraftwerke. ETZ 1919, S. 422. H. Ott, Wirtschaftliche Stromabgabe. ETZ 1920, S. 511. — E. Cramer, Ein französisches Großkraftwerk. ETZ 1920, S. 528. — G. Klingenberg, Neuere Gesichtspunkte f. d. Bau v. Großkraftwerken. ETZ 1920, S. 561. — M. Gercke, Die Abwärmeverwertung bei Dampfkraftwerken. ETZ 1920, S. 601. — H. Probst, Die elektr. Einrichtungen d. Kraftw. Golpa. ETZ 1920, S. 665. — F. Schrottko, Schutzrichtungen in Großkraftübertragungen. ETZ 1920, S. 827. — F. Bartel, Torf-Großkraftwerke. ETZ 1920, S. 865. — F. Münzinger, Kohlenstaubfeuerungen f. Elektr.-Werke. ETZ 1921, S. 97. — Keinauth, Temperaturüberwachung in Kraftwerken. ETZ 1921, S. 459. — W. Schüle, Die Gas- u. Ölturbine. ETZ 1921, S. 777. — F. Fischer, Ziele u. Ergebnisse der Kohlenforschung. ETZ 1921, S. 809. — Die cos φ-Tagung der Verein. d. Elektr.-Werke (Sondernummer) und ETZ 1921, S. 1505. — C. Liebisch, Das Murgkraftwerk in Baden. ETZ 1922, S. 533. — K. Neumann, Untersuchungen an der Dieselmachine. Z. V. D. I. 1918, S. 763. — W. Stiel, Üb. d. Dampfverbrauch u. d. Wirtschaftlichkeitsgrenzen von Kolbenmaschinen u. Dampfturb. f. Heizdampftrieb. Siemens Zeitschr. 1922, S. 377. — H. Gleichmann, Die Verbesserungen d. Wirtschaftlichkeit v. Dampfturbinen. S. Z. 1923, S. 845. — Die Kohlenstaubfeuerung im Kraftw. Herdecke. Mitt. d. V. d. El. W. 1923, S. 55. — Über d. Größenordnung d. Reserve in Dampfkesselanlagen. M. d. V. d. El. W. 1923, S. 209. — O. Lasche, Neuzeitl. Gesichtspunkte b. Bau u. Betr. v. Turbodynamos. M. d. V. d. El. W. 1923, S. 279. — F. Ohmüller, Das Elektr. Werk v. Gennevilliers. ETZ. 1923, S. 681. — W. Windel, Der Energiebedarf landwirtschaftl. Versorgungsgebiete. ETZ. 1923, S. 633. — Bücher: F. Seufert, Anleitung z. Durchführung v. Versuchen an Dampfmaschinen, Kesseln, Dampfturbinen u. Dieselmotoren. Verl. Jul. Springer, Berlin. — St. Löffler und A. Riedler, Ölmaschinen. Verl. Jul. Springer. — G. Liekfeld, Petroleum- und Benzinmotoren m. bes. Berücks. d. Treibölmotoren. Verl. R. Oldenbourg, München. — H. Guldner, Entw. u. Berechn. d. Verbrennungs-Kraftmasch. u. Kraftgasanlagen. Verl. Jul. Springer. — F. Barth, Wahl, Projekt. u. Betr. v. Kraftanlagen. Verl. Jul. Springer. — O. Marr, D. neueren Kraftmasch., ihre Kosten u. Verwendung. Verlag R. Oldenbourg. — J. Stumpf, Gleichstrom-Dampfmaschine. Verlag R. Oldenbourg. — L.udin, Die Wasserkräfte. Verlag Jul. Springer. — Stodola, Die Dampfturbinen. Verlag Jul. Springer. — G. Klingenberg, Bau großer elektr.-Werke. Verlag Jul. Springer. — M. Berthold, Verwaltungspraxis bei El.-W. u. el. Straßenbahnen. Verlag Jul. Springer. — Fleig, Stromtarife f. Großabnehmer. Verl. Jul. Springer. — O. A. Essich, Die Ölfeuerungstechnik. Verl. Jul. Springer. — E. Philippi, Torfkraftwerke u. Nebenproduktenanlagen. Verl. Jul. Springer. — L. Schneider, Die Abwärmeverwertung im Kraftmaschinenbetrieb. Verl. Jul. Springer. — J. Brand, Techn. Untersuchungsmethoden z. Betriebskontrolle. Verl. Jul. Springer. — H. Dubbel, Kolben-dampfmaschinen u. Dampfturbinen. Verl. Jul. Springer. — F. Münzinger, Kohlenstaubfeuerungen f. ortsfeste Dampfkessel. Verl. Jul. Springer. — H. Gröber, Die Grundgesetze der Wärmeleitung u. d. Wärmeübertragung. Verl. Jul. Springer. — H. Thoma, Hochleistungskessel. Verl. Jul. Springer. — Die Wasserwirtschaft v. Bayern, h. v. Staatsministerium des Innern. Verl. A. Mahr, München.

Geschäftliche Bedingungen der Stromlieferung.

(631) Stromlieferungsverträge. Die Beziehungen zwischen dem EW und dessen Stromabnehmern sind in den meisten Fällen durch allgemeine, für fast alle Abnehmer gleichlautende „Bedingungen“ oder „Satzungen“ geregelt. Die Abnehmer haben bei ihrer Anmeldung zum Anschluß und Strombezug durch einzureichende Vordrucke, welche über Umfang und Art der mit elektrischer Arbeit zu versorgenden Anlagen Aufschluß geben, die allgemeinen Bedingungen als für sie bindend anzuerkennen. Diese sollen enthalten: Angaben über die Stromart, die Höhe der zu liefernden Durchschnittsspannung, über Art und Ausführung der Hausanschlüsse einschließlich Stellung der Zähler, ferner Bestimmungen über die Herstellung, Prüfung und Überwachung der Inneneinrichtungen. Bei den jetzigen hohen Gestehungskosten der Hausanschlüsse empfiehlt es sich, vorzusehen, daß das Werk für eigene Zwecke oder Dritte Abzweige außerhalb wie innerhalb der Grundstücke bereits angeschlossener Abnehmer herstellen oder herstellen lassen darf. Aufzunehmen sind auch Bestimmungen bei auftretenden Störungen und Unfällen, bei unrichtigem Gang und der allenfalls notwendigen Prüfung der Zähler, ferner Absperrmaßnahmen zur Gewährleistung eines geordneten Betriebes und zur Sicherung der Ansprüche des Werkes mit sofortiger Stromentziehung in bestimmten Fällen, besonders bei Mißbrauch und Diebstahl elektrischer Arbeit.

Die verschiedenen Gebühren für den Strombezug, für Benutzung der Zähler und sonstigen Meßapparate, Transformatoren, selbsttätigen Schaltapparate [Sperrschalter und Treppenschaltuhren, worüber Näheres (637)] welche früher bei feststehenden Preisen aufgenommen waren, wird man bis zur Wiedererreichung stetiger Verhältnisse wegen der infolge der Geldentwertung fortwährend vorzunehmenden Änderungen aus den Stromlieferungsbedingungen fortlassen und solche von Fall zu Fall in den Amtsblättern und Tageszeitungen mit den jeweiligen Ableszeiten und Zahlungsbedingungen bekannt geben. Man geht bei den äußerst ungünstigen wirtschaftlichen Verhältnissen in Deutschland dazu über, Vorauszahlungen zu verlangen und führt zur Ersparnis von Beamten Ableszeiten von 2—3 Monaten ein. Diese Notmaßnahmen werden sicher bei Eintritt geordneter Verhältnisse geändert und wird dann wieder auf die monatlichen Ablesungen zurückgegriffen werden¹⁾.

Die Bezugsbedingungen sollen im übrigen nicht kleinlich und engherzig sein, sondern von kaufmännisch-wirtschaftlichem Geist getragen werden.

Das Verbot der Stromabgabe gegen Entgelt an Dritte, welches früher seine Berechtigung hatte, ist z. Zt. höchstens bei Großabnehmern in deren Verträgen aufzunehmen. Allgemein kann dasselbe wegen der vielen Abvermietungen von Teilwohnungen infolge der Wohnungsnot nicht aufrecht erhalten werden.

Wenn man auch den berechtigten Forderungen der Abnehmer in den Verträgen und allgemeinen Bedingungen, soweit als nur möglich, entgegenkommen muß, um die Anschlußbewegung zu fördern, so ist dies bei den jetzigen wirtschaftlichen Verhältnissen, unter denen auch die EW leiden, nicht mehr in dem Maße wie früher möglich. Die Herstellung der

(632) Hausanschlüsse, welche fast stets von den Werken selbst ausgeführt werden, kann nicht mehr, wie solches von manchen Werken früher geschah, kostenlos erfolgen; doch empfiehlt es sich auch jetzt noch, einen Teil der Kosten auf die Werke zu übernehmen und Einheitsgebühren, die nach der Größe der Anschlüsse abgestuft sind, zu erheben, um zu vermeiden, daß die nicht durch ihr Verschulden zum vorhandenen Leitungsnetz ungünstiger liegenden Abnehmer höhere Anschlußkosten bezahlen müssen. Entstehen in besonderen Fällen, namentlich bei Großabnehmern infolge Erweiterung des Leitungsnetzes, erheblichere Anschlußkosten,

¹⁾ Jetzt (Ende 1923) ist man bereits wieder zu monatlichen Ablesungen und Rechnungen mit Goldmarkpreisen übergegangen, nachdem man durch Schaffung wertbeständigen Geldes wieder zu festen Verhältnissen zu kommen sucht.

dann wird man diese, soweit solche vom Abnehmer getragen werden sollen, entweder auf mehrere Jahre verteilen (wohl auch für Transformatoren dauernde jährliche Gebühren erheben) oder in die meist hierbei zu vereinbarenden Strompreise mit einschließen, wobei gewöhnlich auch der Bezug jährlicher Mindeststrommengen auf längere Zeit gewährleistet werden muß. Die Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit einer größeren Leitungsnetzerweiterung erfolgt zuweilen auch dadurch, daß zu den entstehenden Kosten der oder die Abnehmer so lange einen entsprechenden Betrag zinslos zur Verfügung stellen, bis durch den Strombezug aller an der Erweiterungsstrecke liegenden Anlagen eine bestimmte für die Wirtschaftlichkeit notwendige Reineinnahme erzielt wird. Die heutigen Verhältnisse haben es mit sich gebracht, daß zu den durch Anschluß größerer Anlagen erforderlichen Netzerweiterungen, sowie zur Aufstellung besonderer Transformatoren für die an das Hochspannungsnetz anzuschließenden Anlagen erhebliche Überteueringezuschüsse seitens der Abnehmer geleistet werden müssen, deren Höhe sich der Geldentwertung anpaßt. Für kleinere Anlagen werden wohl auch neben den eigentlichen Hausanschlußkosten von verschiedenen Werken noch Anschlußgebühren für jede Lampe oder für je 100 Watt Anschlußwert erhoben.

(633) Inneneinrichtungen. Werden die Leitungen von den Hausanschlüssen bis zu den Zählern, wenn solche im Untergeschoß oder Erdgeschoß vereinigt untergebracht werden, meist noch von den Werken selbst hergestellt, so ist andererseits die Ausführung der hinter den Zählern liegenden Inneneinrichtungen auf Grund der Stromlieferungsbedingungen dem Wettbewerb zugelassener Unternehmer freigegeben. Solches ist auch dringend notwendig, denn die noch vereinzelt bestehenden Vorrechte von EW für die Herstellung der Anschlußanlagen, und seien es auch nur versteckte Monopole (in Form von hohen Prüfungs- und Anschlußgebühren für die von anderer Seite ausgeführten Anlagen), bilden wegen des hierdurch gespannten Verhältnisses zwischen Installateuren und Werk ein starkes Hemmnis für die Entwicklung der Werke. Die Erhebung von Gebühren für Prüfung der seitens der Unternehmer einzureichenden Entwürfe, ferner für Prüfung, Abnahme und Anschluß der fertigen Anlagen sollte überhaupt gänzlich in Fortfall kommen, da hierdurch die Abnehmer nur verärgert werden und oft aus diesem Grunde von der Einführung elektrischer Beleuchtung ganz absehen.

War man schon nahe daran, dieses Ziel allgemein zu erreichen, so ist dasselbe durch die Ungunst der wirtschaftlichen Verhältnisse wieder in weite Ferne gerückt, da hauptsächlich die Überlandwerke, welche infolge der geringeren Konsumdichte in ihren Netzen schon höhere Stromgebühren als die Werke in den Städten erheben müssen, die Unkosten solcher Abnahmeprüfungen nicht auch noch in die Stromgebühren mit einrechnen können und daher die Erhebung besonderer Abnahmegebühren beibehalten müssen.

Vor dem Krieg und besonders während desselben suchte man die Anschluß-tätigkeit durch Erleichterungen bei der Errichtung von Innenanlagen durch Übernahme eines Teiles oder der gesamten Herstellungskosten zu fördern. Das geschah auf mannigfache Art, und man unterschied nach Klein, Offenbach (Mitt. Ver. EW 1915, Nr. 371, S. 391) folgende Hauptsysteme:

1. **Leihsystem.** Die Anlage wird auf Kosten des Werkes erstellt und bleibt dauernd dessen Eigentum; sie steht dem Stromabnehmer zur vertraglichen Benutzung unentgeltlich zur Verfügung. Ein späterer käuflicher Erwerb ist zuweilen zulässig.

2. **Mietsystem.** Einrichtung wie unter 1, nur wird, wie bei einer Wohnung, eine monatlich oder vierteljährlich zu zahlende Miete erhoben oder zuweilen solche durch einen Zuschlag zum Strompreis in Ansatz gebracht. Auch hier ist käuflicher Erwerb unter bestimmten Bedingungen möglich.

3. **Teilzahlungs-system.** Die Anlage wird vom Werke erstellt, die Kosten werden durch Hausbesitzer oder Abnehmer in Teilzahlungen getilgt, worauf die Anlage in deren Besitz übergeht. Frühere Ablösung durch sofortige Zahlung der restlichen Raten auf Wunsch möglich.

4. **Beisteuersystem.** Die Anlage wird vom Benutzer oder Hauswirt bezahlt. Das Werk leistet zu den Kosten meist einmalige bare Zuschüsse nach der Größe der Anlagen, die zuweilen in Raten zurückbezahlt werden, oder durch Gewährung kostenloser Hausanschlüsse oder Steigleitungen, schließlich auch noch durch Abgabe kostenlosen Stromes meist auf 1 Jahr. Im letzteren Falle sind gewöhnlich die Abnehmer zu längerem Strombezug auf eine Reihe von Jahren verpflichtet.

5. **Freiinstallationsystem.** Das Werk erstellt auf seine Kosten die ganze Anlage und hält sich meist durch einen höheren Strompreis schadlos. Sehr oft sind derartige Anlagen mit Münzmessern versehen.

6. **Gemischtes System.** Durch Vereinigung zweier oder mehrerer vorgenannter Systeme werden neue Formen von Erleichterungen geschaffen. Die meiste Verbreitung haben die Teilzahlungs- und Beisteuersysteme gefunden; bei letzteren ist die Gewährung der Beisteuer in Form kostenlosen Stromes seltener, jedoch mit glänzendem Erfolg in Gottenburg (Schweden) eingeführt. Häufiger vertreten ist auch noch das Mietsystem, während das Leihsystem und das Freiinstallationsystem nur in wenigen Fällen anzutreffen sind.

Bei den hohen Beträgen, die heute für Inneneinrichtungen bezahlt werden müssen, ist es nicht möglich, solche Erleichterungen weiter zu gewähren.

(634) Zählergebühren (Miete). Die durch Verzinsung, Abschreibung, Unterhalt und Ablesung der Zähler den Werken entstehenden Unkosten können nicht allein durch die Zählermiete Deckung finden, sondern müssen zum Teil in die Strompreise mit eingerechnet werden, damit sie gegenüber den Mieten für Gasmesser, für die öfters überhaupt keine Mietgebühr erhoben wird, nicht zu sehr abweichen. Man findet zuweilen mit Rücksicht auf die Bestimmung des § 448, Abs. 1 des BGB. die Anschauung vertreten, daß die Messung von Gas, Elektrizität, Wasser usw. ebenso kostenlos erfolgen müsse, wie die Messung oder Wägung irgendwelcher Stoffe (Petroleum, Kohlen, Holz oder dgl.) durch den Kaufmann gesetzlich ohne Berechnung irgendwelcher Gebühren für die Benutzung der Meß- oder Wiegeeinrichtungen zu erfolgen hat. Man vergißt aber hierbei, daß diese Einrichtungen dem Kaufmann in seinem Verkaufsraum für jeden Abnehmer zur Verfügung stehen, während beim Verkauf von Gas, Wasser oder Elektrizität umgekehrt jedem Abnehmer eine besondere Meßeinrichtung dauernd bereit gestellt werden muß. Wenn dabei noch berücksichtigt wird, daß einerseits die Anschaffungskosten der Zähler zurzeit sehr hoch sind, andererseits aber der Stromverbrauch in kleinen Anlagen mit schwacher Ausnutzung außerordentlich gering ist und daher die Roheinnahme hierfür in gar keinem Verhältnis steht zu den auf die Zähler Bezug habenden Betriebskosten, so ist klar, daß die Erhebung einer, wenn auch nur mäßigen, Zählermiete nicht nur berechtigt, sondern sogar dringend notwendig ist. (Siehe hierüber auch Dr. Schwagmeier, Mitt. Ver. EW. Nr. 297, Jahrg. 21, S. 352 u. Jahrg. 22, Nr. 309, S. 157.) Das vorstehend über die Zähler Gesagte gilt selbstverständlich in gleichem Maße auch für andere den Zwecken der Strommessung oder der Beschränkung freier Stromverwendung dienende Apparate, wie Strombegrenzer, Sperrschalter, Schaltuhren für selbsttätige Treppenbeleuchtung. Für Strombegrenzer wurden wohl bisher in Rücksicht auf die geringen Anschaffungskosten Mietgebühren nicht erhoben, weil auch naturgemäß bei Verrechnung nach Pauschaltarif die Apparategebühr leicht in die für die Stromlieferung zu leistenden festen Kosten einbezogen werden kann. Für Treppenschaltuhren und andere Sperrschaltereinrichtungen, die eine Stromentnahme nur zu bestimmten Stunden gestatten und größere Anlagekosten bedingen, wird aber eine Miet- oder Benutzungsgebühr nicht zu entbehren sein.

Bei den hohen Anschaffungskosten der Zähler und den naturgemäß hiernach zu fordernden hohen Zählergebühren gebietet die Pflicht zur Einsparung von Zählern, die Tarife so zu gestalten, daß namentlich für Kleinabnehmer Kraft- und Lichtverbrauch nicht durch zwei Zähler gemessen werden muß.

(635) Strompreise (Tarife). Die Strompreise sind der wichtigste Teil der Stromlieferungsbedingungen. Dieselben müssen den Forderungen der äußerst verschiedenen Abnehmer nach Möglichkeit angepaßt werden. In Rücksicht auf möglichst einfache Verrechnung und des leichten Verständnisses wegen wäre ein Einheitspreis für die Kilowattstunde, wie solcher neuerdings vielfach für das Kubikmeter Gas eingeführt worden ist, sehr zu begrüßen. Das ist aber unmöglich, weil elektrische Arbeit nicht so leicht wie Gas aufgespeichert werden kann. Es ist also für die Wirtschaftlichkeit des Werkes notwendig, zu berücksichtigen, daß die Einrichtungen für die Erzeugung, Fortleitung und Verteilung des Stromes während eines möglichst großen Teiles des Jahres voll ausgenutzt werden. Dieser Forderung steht entgegen die verhältnismäßig geringe Ausnutzung fast aller Lichtenanlagen, weshalb für diese, bezogen auf den für eine volle Jahresausnutzung sich berechnenden Einheitspreis, ein verhältnismäßig viel höherer Kilowattstundenpreis erhoben werden muß. Andererseits muß bei Anschluß großer Licht- und Kraftanlagen der Gesteungskostenpreis durch eigene Stromerzeugung für die Festsetzung der Grundpreise und Nachlässe entsprechend berücksichtigt werden. Für gut ausgenutzte Kraftanlagen können niedrigere Preise eingeräumt werden, insbesondere für den Verbrauch, der in die hellen Tagesstunden (namentlich im Sommer) oder in die eigentlichen Nachtstunden fällt, zu welcher Zeit nur eine geringe Inanspruchnahme der Werke stattfindet. Lediglich die gleichzeitige Ausnutzung der Licht- und Kraftanlagen in den Abendstunden im Winter beeinflusst die Wirtschaftlichkeit eines Werkes ganz bedeutend, eine Tatsache, welche auch zur Einführung der Doppeltarife mit hohem Preis in den Abendstunden Veranlassung gab, um hierdurch die Einschaltung aller zu dieser Zeit nicht unbedingt notwendigen Verbraucher zu vermeiden und die Besitzer der Kraftanlagen dazu anzuhalten, ihre Arbeitszeiten mehr diesen Tarifen anzupassen. Es ist hiernach klar, daß bei Wahrung der Wirtschaftlichkeit der Werke nur durch das Vorhandensein mehrerer Tarife den Forderungen der Allgemeinheit Rechnung getragen werden kann. Bei deren Aufstellung muß oberster Grundsatz sein erstens, daß sie dem Abnehmer einen Anreiz zum Stromverbrauch in der für die Werke stillen Zeit bieten, so daß der Abnehmer nach weiterer Verwendung elektrischer Arbeit in seinem Betrieb sucht, und zweitens, daß die festen Kosten (für Verzinsung, Tilgung usw.) am geringsten werden, wenn die Benutzungsdauer des Jahresmaximums auf eine möglichst große Stundenzahl gebracht werden kann. Dem Abnehmer muß also die Wahl zwischen mehreren Tarifen, welche seinen Zwecken am besten entsprechen, gelassen werden, wenn hierdurch auch die Buchführung etwas erschwert wird. Die Anzahl der Tarife soll aber nicht zu groß sein, um den Abnehmer nicht zu verwirren oder mißtrauisch zu machen. Für besonders auftretende Fälle, wo keiner der vorhandenen Tarife geeignet ist, müssen die Direktoren der Werke oder mindestens die dafür ernannten Ausschüsse bei den städtischen Werken oder die Aufsichtsräte bei den Privatwerken befugt sein, Sonderverträge abzuschließen, wenn das EW nicht auf diesen oder jenen Abnehmer verzichten will, der trotz zu gewählender günstiger Bedingungen besonders meist einen angemessenen Nutzen für das Werk bringt.

Man hat bei den Stadtverwaltungen, die in dieser Beziehung oft noch recht rückständig waren, in den letzten Jahren mehr und mehr eingesehen, daß solche Ausnahmen gewährt werden müssen, wenn die Städte solche gewerbliche Betriebe, wie Gaswerke und EW, in kaufmännischem Geist betreiben und verwalten wollen, und daß in allen derartigen Fällen nicht erst viel Zeit beanspruchende Beschlüsse der Gesamtverwaltungen herbeigeführt werden können, vielmehr schnell durch eine oder doch nur wenige Personen behandelt werden muß.

Man unterscheidet drei Hauptformen von Tarifen, nämlich

1. **Zähler tarife**, die nur von der Zahl der verbrauchten Kilowattstunden ausgehen,
2. **Pauschaltarife**, die die Zahl der verbrauchten Kilowattstunden

völlig oder nahezu unberücksichtigt lassen und nur die höchst beanspruchte Leistung zur Zahlungsgrundlage nehmen,

3. gemischte Tarife, die als eine Vereinigung der beiden vorgenannten Tarife anzusprechen sind und daher neben einer sogenannten Grundgebühr für die höchst beanspruchte Leistung auch noch eine Bezahlung für jede bezogene Kilowattstunde bedingen.

Nachlässe, welche früher in der Regel bei den Zählertarifen und gemischten Tarifen entweder auf die Höhe der bezogenen Kilowattstunden oder auf die Benutzungsstunden der angeschlossenen Anlagen gewährt wurden, dürften bei den jetzigen hohen Stromgebühren, bei welchen sich der Preisunterschied zwischen Kraft- und Lichtverbrauch und zwischen Groß- und Kleinbezug elektrischer Arbeit immer mehr verwischt, wohl nur noch in besonderen Fällen vorzusehen sein.

(636) Die Zählertarife sind zweifellos die verbreitetsten, und wenn sie für die verschiedenen Verhältnisse richtig bemessen sind, auch die gerechtesten, vielleicht mit Ausnahme einiger besonderer Fälle, wie bei sogenannten Reklamebeleuchtungen, die nur vor Weihnachten einige Wochen in Betrieb sind und für welche ein außergewöhnlich hoher Preis gefordert werden müßte, wenn man, wie durch die vorhergehenden Ausführungen dargelegt, die gesamten Selbstkosten (einschließlich fester Kosten) für die Stromlieferung an solche Anlagen berücksichtigt. Bei den Zählertarifen unterscheidet man nun wieder solche, die den Strompreis nach dem Verwendungszweck oder nach der Bezugszeit verschieden bemessen.

A. Tarif nach Verwendungszweck. Für Licht- und Kraftzwecke werden verschiedene Grundpreise für die Kilowattstunde gefordert, wobei ersterer das 2—3fache des letzteren beträgt. (Vor Kriegsbeginn für Licht 40 bis 60 Pf., für Kraft 12—25 Pf.) Infolge der ungeheuren Geldentwertung sind solche, wenn auch in den meisten Fällen nicht dieser entsprechend, auf ein Mehrhundertfaches gestiegen¹⁾. Nachlässe werden kaum noch gewährt und vielfach im Einheitspreis für Licht und Kraft berechnet. Es ist aber falsch, die Spannung der Preise zwischen der Licht- und Kraftkilowattstunde oder für Großabnehmer und Kleinabnehmer zu klein zu wählen oder gar ganz verschwinden zu lassen aus den bereits Eingangs von (635) angeführten Gründen. Besonders günstige Einheitspreise werden für Straßenbahnen, Straßenbeleuchtungen, Bahnhofsbeleuchtungen sowie auch für automatische Treppenbeleuchtungen [siehe auch (637) S. 453] wegen der hierbei feststehenden hohen Ausnutzungszeit eingeräumt.

B. Tarif nach Bezugszeit. Bei diesem wird ohne Beachtung des Verwendungszweckes zur Zeit der höheren Inanspruchnahme der Werke (meist Abendstunden im Winter) ein hoher Grundpreis für die Kilowattstunde berechnet, der unter Berücksichtigung aller bestehenden Betriebsausgaben aufzustellen ist, während für die übrige Zeit ein niedriger Preis, ausreichend zur Deckung der unmitteldbaren Betriebsausgaben, und meist nur die Hälfte bis ein Drittel des hohen Preises betragend, verlangt wird. Bei dieser Tarifart müssen die Zähler zwei Zählerwerke erhalten, die abwechselnd durch eine Uhr zu bestimmten Zeiten eingeschaltet werden. Die Uhr wird entweder mit dem Zähler zu einem Apparat fest verbunden, oder auch von diesem getrennt aufgestellt. Die letztere Anordnung ist verbreiteter und empfehlenswerter, weil sie die Verwendung nur einer Uhr für alle in einem Gebäude aufgestellten Doppeltarifzähler gestattet, wodurch an Anlagekosten erheblich gespart werden kann [siehe auch (637) S. 454]. Die sogenannten Sperrzeiten (Zeiten für hohen Preis) beginnen in der Regel mit Eintritt der Dunkelheit, endigen aber verschieden (8—10 Uhr abends). Auch werden für Licht- und

¹⁾ Vom Jan. 1924 an werden wieder sämtliche Preise auf Goldwährung eingestellt. Man wird hierbei in Rücksicht auf die gestiegenen Rohstoffpreise, besonders wegen der doppelten Kohlenpreise Strompreise fordern, die um etwa die Hälfte höher liegen wie die obigen oder man wird, was in der Regel angestrebt werden dürfte, diese Preise als Grundpreise beibehalten und den jeweiligen höheren Kohlenpreisen entsprechende Zuschläge fordern, was durch Einführung einer sogenannten Kohlenklausel am einfachsten erreicht wird (640).

Kraftanlagen oft zweierlei Sperrzeiten festgesetzt. Der Doppeltarif hat große Verbreitung gefunden und wird namentlich da angewandt, wo die Erweiterung der Stromerzeugungsanlagen oder die Verstärkung der Leitungsnetze außergewöhnliche hohe Kosten bedingen würde.

Wie man bereits bei dem Tarif nach Verwendungszweck schon zu einem Einheitsstarif übergegangen ist, hat man letzteren vielfach auch beim Tarif nach Bezugszeit eingeführt, nicht zum wenigsten aus dem Grunde, um an Personal für das Ablesen der Zähler und Ausfertigen der Rechnungen in den heutigen Zeiten der Not zu sparen. Die Werke, welche später in die Lage kommen, sogenannten Abfallstrom, namentlich aus Wasserkraftanlagen, günstig beziehen zu können, dürften aber gut tun, ihre Doppeltarifzähler nebst Uhren für solche Zeiten aufzuheben, da alsdann dieser Abfallstrom besonders für Wärmezwecke zu billigem Preis in Stunden schwacher Belastung zur Verfügung zu stellen und solches nur unter Verwendung von Doppeltarifzählern möglich ist.

Eine Art Doppeltarif ist auch derjenige, bei welchem ein Benutzungsdauernachlaß dergestalt gewährt wird, daß zunächst ein höherer Preis so lange berechnet wird, bis die Verzinsungs- und Tilgungskosten für die maximal beanspruchte Leistung gedeckt worden sind. Hierfür wird in der Regel eine Benutzungsdauer von jährlich 300—400 Stunden zugrunde gelegt; alle weiteren Benutzungstunden werden mit einem ganz niederen Preis zur Deckung der entstehenden reinen Betriebskosten berechnet. Beispiel für die Vorkriegszeit: Für die ersten 400 Benutzungstunden 50 Pf. für 1 kWh, alle weiteren Stunden 10—4 Pf.

Die von Wright zuerst angegebene und mancherlei Abweichungen bei den verschiedenen Werken zeigende Tarifart erfordert keine zwei Zählwerke und keine Uhr, dagegen einen sogenannten Maximumzeiger, der die höchste viertelstündig dauernde Höchstbeanspruchung anzeigt.

(637) Pauschaltarife. Diese Tarifart wurde früher wegen der hohen Preise für Zähler ziemlich häufig angewandt und bestand darin, daß für jede angeschlossene Lampe und jeden angeschlossenen Motor eine feste, meist monatlich zu zahlende Gebühr für Stromverbrauch erhoben wurde, die öfters noch nach der voraussichtlichen Jahresbenutzungsdauer abgestuft war. Durch die Herstellung billiger und sehr zuverlässiger Zähler wurde die Anwendung von Pauschaltarifen im Laufe der Jahre außerordentlich eingeschränkt und meist nur noch von Werken, welche mit Wasserkraft arbeiten, in größerem Maße beibehalten.

Wegen der zeitigen hohen Anschaffungskosten der Zähler macht sich jetzt wieder eine allgemeine Bewegung zugunsten der Pauschaltarife geltend; bei Erzeugung elektrischer Arbeit in Wärmekraftwerken wird sich jedoch in Rücksicht auf den heute mehr als je aufgetretenen Mißbrauch bei Pauschaltarifen die Beibehaltung von Zählern als wirtschaftlicher erweisen.

Eine Belegung erfuhren die Pauschaltarife vor einigen Jahren durch die Einführung der Strombegrenzer; das sind Apparate, welche bei Überschreitung einer bestimmten, verschieden hoch einstellbaren Belastungsgrenze (Stromstärke) den Strom in raschem Wechsel ein- und ausschalten, wodurch für die angeschlossenen Lampen ein für die Augen unerträgliches Flackern des Lichtes entsteht. Diese Erscheinung dauert so lange, bis durch Ausschalten von Lampen oder sonstigen Stromverbrauchern die Stromstärke auf oder unter die eingestellte Belastungsgrenze sinkt. Pauschaltarife unter Verwendung solcher Strombegrenzer würden in den letzten Jahren von einer Reihe von EW wegen der gegen Zähler nur etwa die Hälfte bis ein Drittel betragenden Anschaffungskosten warm empfohlen und aus diesem Grunde in größerem Maße für kleine Abnehmer eingeführt. Als Vorteile wurden hierbei genannt außer den infolge geringerer Anschaffungskosten auch für Verzinsung und Abschreibung entstehenden geringeren Kosten der Fortfall der monatlichen Ablesung der Zählerstände, geringere Unterhaltungskosten gegenüber Zählern, bessere Ausnutzung der pauschalierten Strommengen für die verschiedenen Verwendungszwecke, Einzug gleichmäßig hoher Monats-

beträge, welche dem Abnehmer vorher bekannt sind, wodurch Beanstandungen fortfallen und Buchführung und Geldeinzug ganz wesentlich vereinfacht werden. Diesen gewiß nicht zu verkennenden Vorteilen stehen jedoch schwerwiegende Nachteile gegenüber. Bei Pauschaltarifen ohne Strombegrenzer wird das EW nicht selten dadurch betrogen werden, daß die Abnehmer statt der vereinbarten kleineren Lampengrößen Lampen mit wesentlich größerer Leuchtkraft verwenden. Bei Verwendung von Strombegrenzern wird dieser Übelstand zwar beseitigt, andere Mängel dagegen hierdurch herbeigeführt; so beispielsweise, daß der Abnehmer eine verhältnismäßig hohe Stromstärke vereinbaren muß, wenn er der äußerst selten in seiner Anlage auftretenden Höchstbelastung Rechnung tragen will, oder er muß sich in der Einrichtung seiner Beleuchtung für Nebenräume einen außerordentlichen Zwang auferlegen, wodurch gerade die Vorteile der elektrischen Beleuchtung nach dieser Richtung gänzlich aufgehoben werden. Auch der Anschluß anderer für den Haushalt heute bereits in größtem Umfang eingeführter Gebrauchsgegenstände mit verhältnismäßig geringer Benutzungsdauer, wie namentlich Bügeleisen, ist bei Pauschaltarifen für den Abnehmer äußerst ungünstig, da der Stromverbrauch solcher Gegenstände nicht unerheblich ist und die alsdann zu zahlenden Jahreskosten unverhältnismäßig hoch werden. Der Hauptfehler jeden Pauschaltarifs ist jedoch, daß er äußerst ungerecht ist und daß der in sparsamster Weise bei der Einschaltung seiner Verbrauchsapparate verfahren der Abnehmer, auf die bezogene Kilowattstunde berechnet, oft den vier- bis fünffachen Preis hierfür bezahlen muß wie ein anderer Abnehmer, welcher die Benutzung seiner Lampen und sonstigen Stromverbraucher bis zur höchsten Verschwendung treibt. Aus diesen Gründen haben sich viele erfahrene Leiter großer Werke gegen diesen unsozialen Tarif ausgesprochen. Unter den heutigen, durch den verlorenen Krieg für uns eingetretenen Verhältnissen wird man wohl sogar die weitere Verwendung von Pauschaltarifen wegen der für uns so dringend notwendigen Ersparnis von Brennstoffen bei allen nicht mit Wasserkraft arbeitenden Werken verbieten müssen.

Eine besondere Art von Pauschaltarif für Beleuchtung ist die Festsetzung fester Jahresgebühren für die in Treppenhäusern eingerichteten Lampen mit selbsttätiger Ein- und Ausschaltung. Hierzu bedient man sich der Schaltuhren, die bei Beginn der Dunkelheit die Beleuchtung einschalten und zu einer bestimmten einstellbaren Stunde, 8, 9 oder 10 Uhr abends, die Lampen ausschalten. Neben dieser, durch die Uhr selbsttätig erfolgenden Dauerbeleuchtung ist auch noch durch die beim Hauseingang und in jedem Stockwerk einzurichtenden Drucktaster eine wiederum von der Uhr beeinflusste Zeiteinschaltung, auf die Dauer von 3—5 Minuten möglich. Bei diesem Pauschaltarif ist die Benutzungsdauer begrenzt und, abgesehen von der geringen Benutzung der Zeiteinschaltung, im voraus festgelegt, und da stets alle Lampen gleichzeitig brennen, ist der Stromverbrauch annähernd genau zu bestimmen, wenn durch den Einbau von besonderen Fassungen und Glühlampen mit dazu passenden Sockeln die Verwendung von Lampen größerer Leuchtkraft möglichst ausgeschlossen wird und die zugelassenen Lampen durch das Werk selbst geliefert werden.

Diese sehr verbreiteten Treppenschaltuhren haben in den letzten Jahren durch den Einbau einer astronomischen Zeiteinstellung eine wesentliche Verbesserung erfahren, so daß die durch den verschiedenen Zeiteintritt der Dunkelheit etwa alle Monate zweimal notwendige Einstellung der Einschaltungszeit selbsttätig durch die Uhr erfolgt. Neben der meist in vierteljährlichen Teilzahlungen zu erlegenden Jahresgebühr für jede eingerichtete Treppenlampe wird noch eine Gebühr für die Benutzung der aufzustellenden Schaltuhr erhoben.

An Stelle der Treppenschaltuhren treten neuerdings wegen der geringeren Anschaffungskosten sogenannte Minutenschalter. Bei diesen ist eine Dauerbeleuchtung im Treppenhaus nicht möglich, vielmehr nur eine zeitweise auf einige Minuten, wie solche auch bei Aufstellung von Treppenschaltuhren während der Nachtzeit (nach 8, 9 oder 10 Uhr) betätigt werden kann.

Bei dieser Gelegenheit sei auch darauf hingewiesen, daß es zur Ersparnis von besonderen Schaltuhren für Doppeltarifzähler gelungen ist, die sämtlichen für diese wie auch für die automatische Treppenbeleuchtung notwendigen Schaltvorgänge in einem Uhrwerk zu vereinigen. Solche kombinierte Uhren werden von der Firma J. G. Mehne in Schwenningen i/Wttbg. hergestellt.

(638) Gemischte oder Grundtaxentarife. Diese berücksichtigen den Standpunkt, daß durch die für die bezogene Höchstleistung in Kilowatt zu bezahlende Gebühr vor allen Dingen die festen Betriebsausgaben des EW gedeckt werden müssen und alsdann für die bezogenen Kilowattstunden noch ein Preis gefordert wird, der unter Berücksichtigung eines angemessenen Nutzens die reinen beweglichen Betriebsausgaben der Stromerzeugungsanlagen ersetzt.

Eine derartige Berechnung ist zweifellos die gerechteste und richtigste, weil sie sich am besten den Selbstkosten anpassen läßt. Es haftet ihr weder der Mangel des Zählertarifes an, welcher bei geringem Stromverbrauch einen viel zu geringen Preis fordert, noch enthält sie den Fehler des Pauschaltarifs, der die Höhe des Verbrauchs unberücksichtigt läßt und infolgedessen den Abnehmer oder das Werk schädigt.

In früheren Jahren wurde diese Tarifart meist nur für größere gewerbliche oder industrielle Anlagen derart angewandt, daß durch den Einbau von Höchstverbrauchsmessern die eine Viertelstunden- oder Stunden-Jahreshöchstleistung in Kilowatt festgestellt wurde und letztere zu dem vertraglich für das Kilowatt Leistung vereinbarten Einheitspreis zur Verrechnung gelangte, für die verbrauchten Strommengen aber ein niedriger Kilowattstundenpreis meist noch mit Verbrauchs- oder Benutzungsdauernachlaß berechnet wurde; zuweilen war zur Vermeidung der besonderen Meßvorrichtungen (Höchstleistungszeiger) wohl auch der Anschlußwert der Anlagen für die Berechnung der Grundgebühren als maßgebend festgelegt.

Derart gemischte Tarife haben sich in den letzten Jahren auch für Beleuchtungsanlagen kleineren Umfangs eingeführt, indem hier die Grundgebühr nicht nach der Höchstleistung, sondern nach der Zahl der angeschlossenen Lampen oder der eingerichteten Zimmer berechnet wird, wie bei dem sog. „Potsdamer Tarif“, oder für die Bodenfläche der zu beleuchtenden Räume für jedes Quadratmeter eine entsprechend geringe Grundgebühr neben der Kilowattstundengebühr entrichtet werden muß. Letztere Berechnungsart ist beispielsweise in Berlin eingeführt. (Die neuen Tarife der St. EW. Berlin. Mitt. Ver. EW. Jahrg. 21, Heft 281, S. 16.)

Zu den gemischten Tarifen zählt der erst in späterer Zeit eingeführte „Überverbrauchtarif“. Dieser verlangt einen sogenannten Spitzenzähler, der auf eine bestimmte Höchstleistung, für welche die Grundgebühr zu zahlen ist, eingestellt wird. Der Zähler zeigt aber die innerhalb dieser Höchstleistung auftretende Verbrauchsmenge nicht an, sondern nur bei deren Überschreitung die überschießenden Kilowattstunden, welche dann meist mit einem erhöhten Preis zur Verrechnung gelangen.

Ein weiterer gemischter Tarif ist auch der von J u n g 1900 in Halle mit gutem Erfolg eingeführte Zeitzählertarif, bei welchem der Kilowattstundenzähler mit einem Zeitzähler, der erst bei einer bestimmten Leistung anspricht, in Verbindung gebracht wird. Die Einstellung dieser Leistung erfolgte in Halle beispielsweise auf die Hälfte der im täglichen Gebrauch regelmäßig wiederkehrenden Höchstleistungen der angeschlossenen Anlagen. Der Strompreis betrug alsdann, um die festen Kosten decken zu helfen, für die ersten 300, durch den Zeitzähler angezeigten Stunden für 1 kWh ein Zweifaches oder Dreifaches der nach dieser Zeit verbrauchten Kilowattstunden. (Näheres hierüber Dr. Ing. Aug. J u n g, „Der Zeitzählertarif“. Berlin: Julius Springer, 1916.)

Unter dieses Tarifsystem gehört auch ein Vorschlag von S. Meyer, Luzern, für einen Einzählertarif (ETZ Jahrg. 21, Heft 37, S. 1029), welcher aus einem Pauschaltarif für die Beleuchtungs- und Kraftabgabe und gleichzeitig aus einem Zählertarif für diese beiden Verwendungsarten und für die Wärmeabgabe besteht. Die Grundgebühr wird hier als Leistungsgebühr bezeichnet und solche für Licht

höher (etwa viermal so hoch) als für Kraft gefordert, während die Wärmeabgabe von einer Leistungsgebühr frei bleiben soll. Der Kilowattstundenpreis als Zusatzgebühr für die Leistungsgebühr soll für alle Verwendungszwecke gleich sein, dagegen im Sommer (namentlich bei Wasserkraftwerken) niedriger als im Winter festgesetzt werden.

(639) Münzzählertarife. Die Münzzähler haben sich auch, wie die Gasselbtemesser bei den Gaswerken mehr und mehr wegen der bequemen Zahlungsweise Eingang verschafft. Infolge der nicht unerheblich höheren Anschaffungskosten wird jedoch in der Regel bei diesem reinen Zählertarif ein etwas höherer Strompreis erhoben, was eigentlich nicht im Sinne der Kleinabnehmer, für welche dieser Tarif in erster Linie bestimmt sein soll, gelegen ist. Ein weiterer Mangel, der dem Münzzähler anhaftet, ist die schwierige Einstellung auf einen neuen Preis. Die durch Krieg und Revolution entstandenen mißlichen wirtschaftlichen Verhältnisse, welche eine fortwährende Änderung der Stromgebühren bedingten, waren wegen der umständlichen Einstellung der Zählwerke auf die neuen Preise der Weiterverbreitung dieses Bargeldtarifs auch ohne Rücksicht auf die sehr hohen Anschaffungskosten nicht günstig. Um bei den bereits in Betrieb befindlichen Apparaten nicht dauernd, oft in ganz kurzen Zeitabständen, solche notwendigen Änderungen an den Zählwerken vornehmen zu müssen, ist man, wie bei den Münzgasmessern, namentlich auch in Rücksicht auf den Mangel an Hartgeld dazu übergegangen, Wertmünzen zur Betätigung dieser Zählapparate zu schaffen, die zum Bezug einer bestimmten Menge elektrischer Arbeit (meist 1 kWh) berechtigen und deren Preis dem jeweiligen Geldwert anzupassen.

(640) Gleitende Tarife bei Änderung des Geldwertes. Die in Deutschland immer weiter fortschreitende Geldentwertung der letzten Jahre, welche eine dauernde und ungeheure Preissteigerung aller zur Stromerzeugung dienenden Betriebsmittel und Betriebsstoffe und eine ebensolche Erhöhung der Personalkosten zur Folge hatte, ließen es erwünscht erscheinen, die notwendigen Gebührenerhöhungen für die elektrische Arbeit möglichst in eine gesetzmäßige Form, d. h. in Abhängigkeit von einem die Gestehungskosten wesentlich beeinflussenden Faktor, zu bringen. Da hierfür in erster Linie die Kohle in Betracht kommt, wurden durch Einführung sogenannter Kohlenklauseln (für jede Mark Steigerung einer Tonne Kohle ein bestimmter Zuschlag zu dem Grundpreis der kWh) die Stromgebühren selbsttätig gesteigert, so daß die jeweilige Festsetzung derselben entsprechend dem verminderten Geldwert entfiel. Den Kohlenklauseln folgten später auch Lohn- und Unterhaltsklauseln, die sich sowohl auf die Leistungs(Grund)gebühr (kW), als auch auf die Arbeitsgebühr (kWh) erstreckten. Schließlich wurden in Rücksicht auf die notwendigen höheren Rücklagen und Werkerhaltungskosten noch Kapitaldienstklauseln geschaffen, die sich auf den Indexziffern für die Preise der stromerzeugenden Maschinen aufbauten. Die weiteste Verbreitung haben jedoch die Kohlenklauseln aufzuweisen, die meist so ausgebaut wurden, daß dieselben auch Kapitaldienst, Gehälter und Löhne, sowie Unterhaltungskosten durch einen einzigen Faktor berücksichtigen. Schließlich ging man zu einer sehr einfachen Art der Berechnung über, indem man den Wert einer kWh dem jeweiligen Preis einer Anzahl Kilo Kohlen gleich setzte und zwar getrennt für Licht-, Kraftstromverbrauch usw. in einer Höhe, die etwa einer gleichen Kilozahl bei den früheren Friedenspreisen entsprach. Diese Maßnahmen haben zu vielen verschiedenen Vorschlägen geführt, die in der Literatur (s. unten) zu finden sind.

Mit Rücksicht auf bestehende langfristige Verträge, in denen die Strompreise unveränderlich auf die gesamte Vertragsdauer festgelegt waren, war es notwendig, um die Elektrizitätswerke vor schwerem Schaden zu bewahren, der möglicherweise zum Erliegen der Werke geführt hätte, in solchen Fällen durch gesetzliche Regelung, wenn erforderlich, eine Erhöhung der Strompreise zu erzwingen. Dies geschah durch die Reichs-Verordnung über die schiedsgerichtliche Erhöhung von Preisen bei der Lieferung von elektrischer Arbeit, Gas und Leitungswasser vom 1. Febr.

1919 (mit Erläuterungen von Ziekursch und Dr. Kauffmann, Berlin 1919, J. Springer).

(641) Soziale Staffelung der Preise. Bei der außerordentlichen Höhe, welche die Stromgebühren im Laufe der Zeit erreichten und dem Bestreben, das ganze wirtschaftliche Leben auf soziale Grundlage zu stellen, lag es nahe, Strom- und Gaspreise für die minderbemittelte Bevölkerung zu Lasten der wirtschaftlich stärkeren Abnehmer zu verbilligen. Eine solche Maßnahme wurde z. B. von der Stadtgemeinde Köslin durchgeführt (ETZ Jahrg. 1921, Heft 16, S. 402, Ing. Laub-scher), welche für alle Kleinverbraucher bis zu 7 kWh monatlichen Verbrauchs die kWh um rund 20 v. H. billiger berechnete. Ähnliche Erleichterungen sind auch von anderen Stadtgemeinden versuchsweise eingeführt und teilweise wohl schon wieder aufgehoben worden. Es ist auch zuzugeben, daß, so löblich das Bestreben ist, den wirtschaftlich Schwachen in jeder Beziehung zu helfen, solche Maßnahmen doch nicht in den Rahmen eines gewerblichen Betriebes, wie es ein Elektrizitätswerk ist, hineinpasse. Hier muß sich alles dem kaufmännisch-wirtschaftlichen Geist einordnen, und die Unterstützung Minderbemittelter muß seitens der Behörden mit von der Allgemeinheit bereitgestellten Mitteln durch solche Stellen erfolgen, welche zur Prüfung der wirtschaftlichen Verhältnisse der Einzelnen berufen sind.

(642) Berechnung des Blindverbrauchs und Leerlaufverbrauchs. Die großen Belastungen, welche sich schon mit längeren, besonders aber in den letzten Jahren bei den Wechselstromwerken durch vermehrten Anschluß schlecht belasteter Asynchronmotoren und hierdurch eingetretener, großer Phasenverschiebung in Form von Scheinleistungen gezeigt haben, brachten die Notwendigkeit, diese Schein- oder Blindverbrauchsleistungen auch denen, die sie verursachen, zu berechnen. Die Messung dieses Blindverbrauchs im Gegensatz zu der eigentlichen Nutzarbeit (Wirkverbrauch) erfolgt in der Regel durch besondere Blindverbrauchs-zähler (Sinuszähler), deren Angaben meist zu einem entsprechenden Teil des Wirkstrompreises berechnet werden. Dem Abnehmer (hier kommen meist nur größere Verbraucher in Betracht), dem in der Regel eine gewisse Phasenverschiebung durch eine Anlage zugestanden ($\cos \varphi = 0,8-0,7$) wird, verrechnet das Werk in der Regel nur die über diese Phasenverschiebung hinausgehende Blindverbrauchsleistung, während demselben die bei Unterschreitung dieser Phasenverschiebung eintretenden Minderverbrauchsleistungen selbsttätig durch Anzeige am Zähler im umgekehrten Sinn gut gerechnet werden. Die Literatur gibt über diese Verrechnungsmethoden weitgehendste Auskunft.

Als Leerlaufverbrauch wird der Verbrauch der unbelasteten Transformatoren bezeichnet, welcher bei größeren Anschlußanlagen, die die Aufstellung besonderer Transformatoren bedingen, in entsprechender Weise besonders zur Verrechnung gelangt, wenn der Verbrauch nicht hochspannungsseitig gemessen wird.

Literatur: Siegel, Preisstellung beim Verkauf el. Energie. Berlin 1906, Jul. Springer. — Dr. Passow, Die gemischt-privaten und öffentlichen Unternehmungen auf dem Gebiete der Elektrizität und Gasversorgung. Jena 1912, G. Fischer. — Schmidt, Stromverteilung bei Zählerarten und Zählerkontrolle bei städtischen EW und Überlandzentralen. Berlin 1910, J. Springer. — Fleig, Stromtarife für Großabnehmer. Berlin 1913, J. Springer. — Laudien, Stromtarife. Leipzig 1912, Max Jännecke. — Laudien, Ein neues Benutzungsstundenzählverfahren. Berlin 1917, J. Springer. — Bund der Elektrizitätsversorgungs-Unternehmungen Deutschlands E.V., Bewegung der Preise für el. Arbeit seit dem Jahre 1914. Berlin NW. 7 1918, Selbstverlag. — W. Supf, Tarifnot und Tarifierhöhung in den Gemeindebetrieben und den privaten Straßenbahnen, Gas-, Wasser- und Elektrizitätsuntersuchungen. Berlin 1918, C. Heymann. — Buchholz, Die Verrechnung des induktiven Verbrauches. ETZ 1919, S. 111, 115. — Die Wirtschaftlichkeit der Kochstromabgabe für die Abnehmer und die Elektrizitätswerke. ETZ 1919, S. 499. — Warrelmann, Die Bedeutung der Tarife für die Entwicklung der ländlichen Stromversorgung. ETZ 1919, S. 577. — v. Baum, Die Pauschalquittungskarte. ETZ 1919, S. 585. — Koepchen, Der RWE-Tarif mit Teuerungsklausel. Mitt. Ver. EW 1919, S. 18. — Bloch, Die Kohlenklausel. ETZ 1920, S. 150. — Soziale Preisstaffelung für Gas- und Elektrizitätsverbrauch. ETZ 1920, S. 78. — Schmidt, Das Tarifwesen der Überlandwerke. ETZ 1920, S. 654. — Kopp, Über die Bewertung des wattlosen Verbrauchs beim

Verkauf elektr. Stromes. ETZ 1920, S. 772/790. — Rehmer, Strompreise für die offenen Ladengeschäfte. Mitt. Ver. EW 1920, S. 52. — Petri, Die Elektrizitätsversorgung auf dem flachen Lande. Mitt. Ver. EW 1920, S. 21. — Mohl, Vorschläge zu einer neuen Preisberechnung für die Abgabe von Elektrizität, Gas und Wasser. ETZ 1921, S. 344. — Liebe, Messung der Großabgabe unter Berücksichtigung des Leistungsfaktors. ETZ 1921, S. 393. — Hoppe, Abbautarif zur Vermeidung verhängnisvoller Folgen für die Rentabilität der Werke bei sinkenden Kohlenpreisen. ETZ 1921, S. 883. — Siegel, Betrachtungen über zeitgemäße Strompreispolitik. ETZ 1921, S. 1129. — Klein, Der gleitende Tarif der Stadt Offenbach für den Verkauf elektrischer Arbeit. ETZ 1921, S. 1161. — Greve, Ein Tarif, welcher die Wirtschaftlichkeit eines Überlandwerkes sichert und zugleich werbend wirkt. ETZ 1921, S. 1192. — Laubscher, Die Heranziehung der Stromverbraucher zur Deckung der festen Kosten eines Elektrizitätswerkes. ETZ 1921, S. 1313. — Rosenbaum, Tarifierhöhungen der Elektrizitätswerke. Mitt. Ver. EW 1921, S. 460. — Siegel, Erfahrungen mit der Strompreisverordnung vom 1. Febr. 1919. Mitt. Ver. EW 1921, S. 468. — Rosenbaum, Strompreisbewegung und Tarifgestaltung. ETZ 1922, S. 212. — Wichmann, Über den Einfluß des Leistungsfaktors auf den Strompreis. ETZ 1922, S. 270. — Biermann, Beschleunigtes Geldeinzugsverfahren bei Elektrizitätswerken, „Der Verrechnungsverkehr“. ETZ 1922, S. 1340. — Mathy, Die Kohlenpreise als Maßstab für die Strompreise. Mitt. Ver. EW 1922, S. 126. — Wunder, Der Einfluß der Geldentwertung auf die Selbstkosten und die Preise des elektrischen Stromes. Mitt. Ver. EW 1922, S. 366. — Schmidt, Berücksichtigung der Phasenverschiebung bei der Stromverrechnung. Mitt. Ver. EW 1922, S. 357. — Greve, Grundlage für die Festsetzung der jeweiligen Elektrizitätsabgabe-Preise unter Berücksichtigung der sich verändernden Werte des Geldes. Mitt. Ver. EW 1923, S. 12. — Elvers, Festpreise für Gas, Wasser u. Elektrizität u. Kreditbeschaffung. Mitt. Ver. EW 1923, S. 87. — Dr. Lambertin, Das Stromverkaufsgeschäft des E. W. Halle, Einziehen von Stromgeldern, Stromverrechnung. Mitt. Ver. EW 1923, S. 391, 394, 395.]

Sechster Abschnitt.

Leitung und Verteilung.

(643) **Allgemeines.** Erzeuger und Verbraucher der elektrischen Energie sind durch Leitungen miteinander verbunden. Die Leitung, ein nicht minder wichtiger Teil einer elektrischen Anlage als Erzeuger und Verbraucher, ist verhältnismäßig einfach zu behandeln, ihre Wirkung beruht im allgemeinen auf einfacheren physikalischen Gesetzen als die jener Teile. Verschieden von jenen ist die Leitung vor allem dadurch, daß sie sich nicht in einem geschlossenen Raume unter absichtlicher oder unwillkürlicher Aufsicht befindet, sondern sich entweder draußen im Freien als unterirdische Leitung jeder Überwachung fast entzieht oder als oberirdische (Frei-) Leitung jeder Unbill der Witterung ausgesetzt ist und dann im allgemeinen unter besonders organisierte Überwachung gestellt werden muß.

(644) **Aufgaben der Leitung.** Die Leitung hat die Aufgabe, dem Verbraucher die Energie in der Weise zuzuführen, wie sie ihm zukommt, so daß er ordnungsgemäß arbeiten kann — z. B. eine Lampe stetig leuchtet, ein Motor mit der Leistung und Geschwindigkeit, die der Benutzer verlangt, umläuft. Dabei darf die Leitung dadurch, daß sie ihre Aufgabe erfüllt, weder selbst Schaden leiden noch ihrer Umgebung Schaden zufügen. Schließlich soll sie ihre Aufgabe nicht nur technisch, sondern als Teil einer wirtschaftlichen Anlage wirtschaftlich einwandfrei erfüllen. Hiernach ist die Behandlung der Leitungen einzuteilen.

(645) **Die fünf Grundgrößen der Leitungsberechnung¹⁾.** Ist A_0 die von dem oder den Erzeugern gelieferte, A die von dem oder den Verbrauchern aufgenommene Arbeit, so geht die Arbeit

$$a = A_0 - A$$

insofern verloren, als sie nicht nützlich verwendet, sondern in der Leitung in Wärme umgesetzt wird. Dieser Arbeitsverlust, noch mehr sein Relativwert

$$\alpha = \frac{a}{A}$$

und dann der Arbeitswirkungsgrad

$$\eta_a = \frac{A}{A_0} = \frac{1}{1 + \alpha}$$

muß für die Wirtschaftlichkeit der Leitungen eine große Bedeutung haben.

Greift man einen bestimmten Augenblick des Betriebes heraus, etwa den der Höchstbelastung, so treten an Stelle der Arbeits- die Leistungsgrößen, und aus den obigen Arbeitsgleichungen werden die Gleichungen:

¹⁾ Die auf Erzeuger und Verbraucher bezüglichen Größen werden durch große lateinische Buchstaben, A Arbeit, N Leistung, U Spannung, die auf Verlust bezüglichen Größen durch kleine lateinische Buchstaben für die Absolutwerte (a, n, u), kleine griechische Buchstaben für die Relativwerte bezeichnet. — Die Relativgrößen sind entweder Zustands- oder Schwankungsgrößen; die zusammengehörigen Größen dieser Art werden durch verwandte Buchstaben, ξ und ζ , ν und ω bezeichnet (ν kleines griechisches Ypsilon).

für den Leistungsverlust $n = N_0 - N$

für den relativen Leistungsverlust $\zeta = \frac{n}{N}$

und für den Leistungswirkungsgrad $\eta_n = \frac{N}{N_0} = \frac{1}{1 + \zeta}$

Leistungsverlust und Leistungswirkungsgrad bei Höchstbelastung sind in der Technik im allgemeinen von ganz besonderer Bedeutung, hauptsächlich auch dann, wenn die erzielbaren Leistungen durch die zulässige Temperaturerhöhung begrenzt werden. Aber obwohl die Temperaturerhöhung bei den Leitungen von größter Wichtigkeit ist, spielt der Leistungsverlust in ihnen doch nur eine untergeordnete Rolle, und zwar weil Leistungsverlust und Temperaturerhöhung nicht in einer einfachen Beziehung zueinander stehen (646). Von sehr großer Bedeutung sind Leistungsverlust und Leistungswirkungsgrad der Leitung insofern, als sie die Elektrotechnik wesentlich mitbestimmt haben sich so zu entwickeln, daß die Verbraucher (und die Erzeuger) im allgemeinen nebeneinander geschaltet werden, und dadurch den Anlagen ihren besonderen Charakter aufgedrückt haben. Vergleichen wir nämlich zwei Anlagen mit reiner Reihenschaltung und reiner Nebeneinanderschaltung der Verbraucher (siehe Abb. 351 und 352) mit einander, so finden wir folgendes:

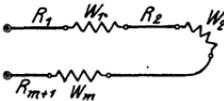


Abb. 351. Reine Reihenschaltung.

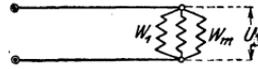


Abb. 352. Nebeneinanderschaltung der Verbraucher.

Soll die Leistungsaufnahme in den Stromverbrauchern konstant sein, so muß bei Reihenschaltung die Stromstärke I der Anlage, bei Nebeneinanderschaltung die Spannung U konstant sein. Diese Konstanz soll (mit möglichst geringen Abweichungen) bestehen, wie man auch die Zahl der Verbraucher in der Anlage ändern mag, und zwar soll sie ohne Regelung im Maschinenhause von selbst, trotz des Einflusses der dem entgegenwirkenden Leitungen erhalten bleiben. Man sieht nun auch ohne Rechnung sofort, daß in der Reihenschaltungsanlage bei Veränderung der Zahl der Verbraucher (vom Widerstand W_1 bis W_m) sich die Stromstärke I dann am wenigsten ändern wird, wenn ΣW möglichst klein gegen ΣR , dem gesamten Leitungswiderstand, ist; dann ist aber der Verlust in den Leitungen $I^2 \cdot \Sigma R$ sehr groß gegen den nützlichen Verbrauch $I^2 \cdot \Sigma W$, der Wirkungsgrad η_n also sehr klein. — Bei Nebeneinanderschaltung dagegen soll die Spannung der Verbraucher möglichst konstant sein. Diese ist aber $U = U_0 - I \cdot R$, worin I der Strom ist, der alle Verbraucher insgesamt, also auch die Leitung durchströmt. U ändert sich also offenbar dann am wenigsten mit der Zahl der angeschlossenen Verbraucher, also mit der Änderung der Stromstärke I , wenn der Leitungswiderstand R möglichst klein ist; dann ist aber auch der Verlust $I^2 \cdot R$ klein, der Wirkungsgrad η_n groß. Rein technische Rücksichten fordern somit bei Reihenschaltung einen schlechten, bei Nebeneinanderschaltung einen guten Wirkungsgrad. Das in erster Linie hat der letzteren das unbedingte Übergewicht in der Elektrotechnik gegeben. Wir werden uns nur mit Nebeneinanderschaltungsanlagen beschäftigen.

Haben wir hiernach unter den beiden grundsätzlich verschiedenen Arten von Anlagen die Parallelschaltungsanlage deshalb ausgewählt, weil bei ihr die erste der unter (644) ausgesprochenen Forderungen dann am besten erfüllt ist, wenn gleichzeitig der Wirkungsgrad groß ist, so tritt nun an derartige Anlagen diese Forderung mit ihrer ganzen Strenge heran. Wir fassen sie folgendermaßen: Ändert man während des Betriebes, etwa durch Änderung der Zahl der angeschlossenen

Verbraucher, die Leistungsentnahme in willkürlicher Weise, so ändert sich die Leistungsentnahme in den in Betrieb gebliebenen Verbrauchern in unwillkürlicher und unwillkommener Weise; diese Änderung soll möglichst klein sein, jedenfalls gewisse Grenzen nicht überschreiten.

In einer Anlage nach Abb. 352 sei die einem der Verbraucher vom Widerstand W normalerweise zugeführte Leistung (N), die Änderung, die sie durch Wirkung der Leitung beim Aus- oder Einschalten beliebig vieler Verbraucher erleiden kann, im Höchstwert $\Delta(N)$; in dem betrachteten Verbraucher ist dann die relative Leistungsschwankung

$$\xi = \frac{\Delta(N)}{(N)}$$

Diese Größe kann bequem aus der relativen Spannungsschwankung

$$\omega = \frac{\Delta U}{U}$$

erklärt werden, die an den Klemmen der nebeneinander geschalteten Verbraucher bei deren Aus- und Einschalten beobachtet werden kann.

Die Spannungsschwankung ihrerseits steht aber in enger Beziehung zu dem relativen Spannungsverlust oder Spannungsabfall

$$v = \frac{u}{U}$$

worin $u = U_0 - U$ ist; v ist als griechisches Ypsilon zu lesen.

Wir haben hiermit die für das Verhalten und die Beurteilung der Leitung und für ihre rechnerische Behandlung maßgebenden Größen in der umgekehrten Reihenfolge kennen gelernt, nach der wir die Aufgaben der Leitungen in (644) überblickt hatten.

(646) Bedeutung der fünf Grundgrößen für die Leitungsberechnung. Sehen wir somit, daß in arbeitenden Leitungen ein gewisser Arbeits-, Leistungs- und Spannungsverlust auftritt und daß bei Ausschaltung der ganzen Belastung in dem zur Beobachtung zurückgebliebenen kleinen Verbraucher eine gewisse Leistungsschwankung und an seinen Klemmen eine gewisse Spannungsschwankung auftritt, so können wir umgekehrt die Leitung so vorausberechnen, daß diese Größen einen bestimmten vorgesetzten Betrag annehmen, der als Grenzwert für zulässig erachtet wird; wir berechnen dann auf Leistungsschwankung ξ , auf Spannungsverlust v usw. Der Gegenstand der Berechnung ist dabei nur der Leitungsquerschnitt q .

Die Berechnung auf Arbeitsverlust α hat offenbar einzusetzen, wenn die Leitung als Teil einer wirtschaftlichen Anlage betrachtet wird. Sie ist die Grundgröße für die Berechnung auf Wirtschaftlichkeit. Die Berechnung auf den Leistungsverlust ζ ist nach (645) nicht von großem Interesse, nicht einmal für die Frage der zulässigen Erwärmung der Leitungen. Das letztere ist sofort klar aus der Tatsache, daß zwei Leitungen mit denselben Widerständen R , die also bei gleicher Größe der übertragenen Leistung — gleiche Verbraucherspannung, also auch gleichen Übertragungsstrom vorausgesetzt — auch denselben Verlust und denselben Wirkungsgrad aufweisen, ganz verschiedene Oberflächen, also ganz verschiedene Abkühlungsverhältnisse haben können; die eine Leitung nämlich, die eine große Länge l_1 haben möge, hat einen großen Querschnitt q_1 , die andere von geringerer, vielleicht halb so großer Länge $l_2 = \frac{1}{2}l_1$, hat bei demselben Leitungsmetall auch nur den halben Querschnitt, also den 0,707fachen Durchmesser $d_2 = 0,707 d_1$. Die Oberflächen $F_1 = \pi l_1 d_1$ und $F_2 = \pi l_2 d_2$ sind also sehr verschieden voneinander, es ist nämlich

$$\pi l_2 d_2 = \pi \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,707 l_1 d_1; \quad F_2 = 0,354 F_1.$$

Die Größe der Oberfläche ist aber bei derselben Wärmeentwicklung, wie sie hier auftritt, von bestimmendem Einfluß auf die Erwärmung; diese nimmt mit zunehmender Oberfläche ab. — Von maßgebender Bedeutung für die Leitungsberechnung ist grundsätzlich die relative Leistungsschwankung ξ . Denn sie ist es, die den Einfluß der Leitungen auf das Verhalten der Verbraucher wesentlich ausmacht. Auf diese Größe sollte man also die Leitungen immer berechnen, wenn die Berechnung ein ordnungsgemäßes Arbeiten der Verbraucher zum Ziele hat. Wenn trotzdem die Größe ξ gegenüber der relativen Spannungsschwankung ω an Bedeutung stark zurücktritt, so liegt das an äußeren Gründen, hauptsächlich daran, daß man die Spannungsschwankung leicht beurteilen und messen kann und daß sie bei der Rechnung bequem zu handhaben ist. Dabei — und das ist wichtig — spricht nichts dagegen, bei Parallelschaltungsanlagen das Arbeiten der Verbraucher unmittelbar in seiner Abhängigkeit von der Spannung ins Auge zu fassen; eine Glühlampe z. B. wird einen konstanten Lichtstrom liefern, solange die Spannung an ihren Klemmen konstant ist, und die Lichtstromschwankungen können auf die bequemste Weise als Funktion der Spannungsschwankungen ausgedrückt werden. Hierbei bedarf es für unseren Zweck nicht etwa eines mathematischen Ausdrucks, sondern es genügt vollständig, mit dem Auge, das durch das Photometer unterstützt sein mag, festzustellen, innerhalb welcher Grenzen die Spannung schwanken darf, wenn die Lichtstromschwankungen in erträglichen Grenzen bleiben sollen, und man braucht nicht von der Schwankung der elektrischen Leistung zu sprechen. Auf diese Weise kommt die Spannungsschwankung ω zu ihrer überragenden Bedeutung für die Berechnung der Leitungen.

Mit dieser Behauptung steht die unzweifelhafte Tatsache, daß der Spannungsverlust v bei den Methoden der Leitungsberechnung die größte Rolle spielt, in scharfem, aber doch nur scheinbarem Widerspruch. Der numerische Wert von v wird nämlich immer oder fast immer nur mit Rücksicht auf die Spannungsschwankung ω festgesetzt, und ω kann bei allen Arten von Leitungsanlagen stets leicht auch rechnerisch auf v zurückgeführt werden. Daß man v in den Formeln so bevorzugt, findet seine einfache Erklärung darin, daß diese Größe sehr leicht als Funktion aller Bestimmungsgrößen, wie vor allen Dingen der Länge und des Querschnitts der Leitung und der zu übertragenden Leistung ausgedrückt werden kann, so daß die Formeln für die Berechnung des Querschnitts sehr einfache Gestalt annehmen. Zu einem beträchtlichen Teil ist die Bevorzugung von v bei den Methoden der Leitungsberechnung allerdings auch geschichtlich begründet¹⁾.

Gleichstromleitungen.

(647) Beziehungen der Grundgrößen zueinander bei Gleichstromleitungen.

Die in (645) aufgestellten fünf Grundgrößen für die Leitungsberechnung, der Arbeitsverlust α , der Leistungsverlust ζ , die Leistungsschwankung ξ , die Spannungsschwankung ω und der Spannungsverlust v , alle in ihren Relativwerten, stehen für den Fall einer nur am Ende belasteten Gleichstromleitung — vgl. Abb. 352 — in sehr einfachen Beziehungen zueinander, zumal wenn die Belastung, abgesehen von den vorübergehenden kurzdauernden Leistungsschwankungen ξ , konstant ist. Es ist nämlich

$$\alpha = \frac{a}{A} = \frac{I^2 R \cdot t}{UI \cdot t} = \frac{R}{W}$$

und

$$\zeta = \frac{n}{N} = \frac{I^2 \cdot R}{U \cdot I} = \alpha$$

¹⁾ Über die fünf oder — nach Auslassung der Größe α — vier Grundgrößen als Grundlage der Leitungsberechnung hat der Verfasser dieses Abschnitts 6 Aufsätze veröffentlicht, die dem Folgenden zu Grunde liegen, insbesondere den Abschnitten (647), (648), (659) bis (661), (665) bis (668). Die Aufsätze sind in ETZ 1916, S. 397, 1917, S. 533, 1919 S. 45, 1919, S. 580, 1921, S. 301 u. 1921, S. 780 abgedruckt und als Sonderdrucke im Selbstverlage des Verfassers erschienen.

wenn R der Gesamtwiderstand der Leitung, W der Gesamtwiderstand der bei Höchstbelastung angeschlossenen Verbraucher, I die Stromstärke bei Höchstbelastung und t die Zeit ist. (Hierbei sind Verbraucher angenommen, in denen die Arbeit wie bei Glühlampen nur in Wärme umgesetzt wird; andernfalls, z. B. bei Motoren, ist ein ideeller Widerstand vom Betrage $U : I$ anzunehmen.) — Die größte Spannungsschwankung ΔU tritt ein, wenn die Belastung von ihrem Höchstwerte auf Null geändert wird. Wir denken uns die Belastung hierbei nicht ganz ausgeschaltet; vielmehr sei noch ein Verbraucher von verschwindend kleinem Verbräuche angeschlossen geblieben, dessen Verhalten wir beobachten. Ohne diesen würde die Spannungsschwankung nicht unmittelbar zum Ausdruck kommen. Mit dieser Ausschaltung ist aber der Spannungsverlust vom Betrage $u = IR$ ebenfalls auf Null herabgesunken; die Spannung an den Klemmen des übriggebliebenen sehr kleinen Verbrauchers ist also dabei von U auf U_0 gestiegen. Es ist also

$$\Delta U = u$$

und da

$$v = \frac{IR}{U} = \frac{IR}{IW} = \zeta = \alpha$$

so ist auch

$$\omega = v = \zeta = \alpha$$

Nur für die relative Leistungsschwankung ξ ergibt sich etwas anderes. Um ihre Beziehung zur Spannungsschwankung festzustellen, betrachten wir das Verhalten des übriggebliebenen Verbrauchers vom Widerstand (W) bei der vorgenommenen Belastungsänderung: Bei Vollbelastung war sein Leistungsverbrauch

$$(N) = \frac{U^2}{(W)}$$

nach Ausschaltung der Leistung ist er

$$(N) + \Delta(N) = \frac{(U + \Delta U)^2}{(W)} = \frac{U^2}{(W)} (1 + \omega)^2 = (N) \cdot (1 + \omega)^2$$

Also ist

$$\xi = \frac{\Delta(N)}{(N)} = 2\omega + \omega^2$$

Im allgemeinen kann man das quadratische Glied vernachlässigen und hat dann

$$\xi = 2\omega = 2v = 2\zeta = 2\alpha.$$

Die Gleichheit der Größen ω , v , ζ und α bei den einfachen Gleichstromleitungen hat ihre klare Unterscheidung lange Zeit verhindert und viele Unklarheiten aufkommen lassen.

(648) Grundformel zur Berechnung der Gleichstromleitungen auf Spannungsschwankung; Vorteil hoher Spannungen. In einer Gleichstromanlage nach Abb. 352 ist der Spannungsverlust

$$u = IR = \frac{I \cdot l}{q} \cdot 2\varrho$$

wenn l die Entfernung zwischen Erzeuger und Verbraucher, q der Querschnitt der Leitung und ϱ der spezifische Widerstand des Leitungsmetalle ist. Hieraus ergibt sich als Formel zur Berechnung des Leitungsquerschnittes q bei gegebenem absolutem Spannungsverlust u und relativem Spannungsverlust v

$$q = \frac{I \cdot l}{u} \cdot 2\varrho = \frac{I \cdot l}{vU} \cdot 2\varrho = \frac{NI}{\omega U^2} \cdot 2\varrho.$$

Der Ersatz von v durch ω in der letzten Formel rechtfertigt sich aus (647).

Bei gegebener Entfernung l der Energieübertragung ist also der Querschnitt unter sonst gleichen Umständen umgekehrt proportional dem Quadrate der Spannung. Umgekehrt ist die mit einem bestimmten Querschnitt bei vorgeschriebener Spannungsschwankung ω erreichbare Übertragungslänge proportional dem Quadrate der Spannung; die Metallmenge nimmt dabei proportional der Länge zu. Fragt man nach der mit einer bestimmten Metallmenge unter sonst gleichen Verhältnissen erreichbaren Übertragungsentfernung, so findet man durch Multiplikation der letzten Gleichung mit l unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Metallmenge $M = 2 q l$ ist, den Satz, daß die Übertragungsentfernung l proportional der Spannung ist. Die hiermit festgestellte Abhängigkeit der Entfernung von der Spannung erklärt die Entwicklung der Elektrotechnik, insofern das Bestreben immer höhere Spannungen zu verwenden, schon sehr bald geweckt und im Laufe der Jahrzehnte unter Ausdehnung der Versorgungsgebiete mehr und mehr befriedigt wurde.

(649) Einfacher belasteter Leitungsstrang. Sind mehrere Verbraucher an einem einfachen Leitungsstrang angeschlossen (siehe Abb. 353, in der Hin- und Rückleitung durch einen einzigen Strich und die Verbraucher durch Pfeile mit den angeschriebenen Verbrauchsstromstärken i_1, i_2 usw. ausgedrückt sind), so ist der Gesamtspannungsverlust

$$u_m = \sum I_v r_v$$

wobei die Leitungswiderstände r_v jeweils zwischen zwei Abzweigpunkten gemessen sind. Dieser zeitlich und örtlich größte Spannungsabfall ist maßgeblich für die größtmögliche Spannungsschwankung: er ist dieser gleich und tritt am letzten Verbraucher ein, wenn gleichzeitig alle Verbraucher aus- oder eingeschaltet werden, natürlich abgesehen von dem einen kleinen Verbraucher, den wir in (647) schon kennen gelernt hatten. Es ist also $u_m = \mathcal{A}U$, wenn $\mathcal{A}U$ diese größte Spannungsschwankung, deren Relativwert ω ist, bedeutet.

Der Gesamtspannungsabfall u_m kann auf die einzelnen Leitungsstücke beliebig verteilt werden. Methodisch geschieht dies, wenn man über das Verhältnis der Querschnitte $q_1 : q_2 : \dots : q_m$ bestimmte Voraussetzungen trifft.

A. Der Querschnitt der Leitung sei überall derselbe; $q_1 = q_2 = \dots = q_m$. Dann läßt sich aus der vorigen Formel der Ausdruck

$$q = \frac{\sum I_v l_v}{u_m} \cdot 2 \varrho = \frac{\sum i_v L_v}{v_m \cdot U} \cdot 2 \varrho = \frac{\sum N_v \cdot L_v}{\omega \cdot U^2} \cdot 2 \varrho$$

ableiten. Daß hierbei $\sum I_v l_v = \sum i_v L_v$ ist, wobei die L_v jeweils die vom Anfangspunkt der Leitung an gemessenen Entfernungen sind, würde eine einfache Überlegung deutlich machen; die N_v sind die abgezweigten Leistungen $N_v = U_v \cdot i_v$, wobei alle U_v als einander gleich angesehen werden, so daß N_v die den Verbrauchern normalerweise zukommenden Leistungen sind.

B. Die Stromdichte $j = I : q$ sei überall dieselbe. Dann ergibt sich für die einzelnen Querschnitte

$$q_v = \frac{I_v L_m}{u_m} \cdot 2 \varrho$$

Man berechnet die Querschnitte dann zweckmäßigerweise so, daß man den des letzten Leitungsstückes aus

$$q_m = \frac{I_m L_m}{\omega \cdot U} \cdot 2 \varrho = \frac{N_m L_m}{\omega \cdot U^2} \cdot 2 \varrho$$

bestimmt und die vorangegangenen Querschnitte proportional den Leitungsströmen verstärkt.

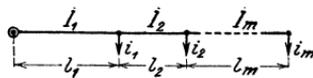


Abb. 353. Einfacher verteilt belasteter Leitungsstrang.

C. Die aufgewandte Metallmenge sei ein Minimum. Soll diese Bedingung, selbstverständlich für einen bestimmten vorgeschriebenen Spannungsabfall, erfüllt sein, so muß, wie eine einfache Rechnung ergibt, $q_v = C \cdot \sqrt{I_1}$ sein¹⁾. Man berechnet so, daß man willkürlich $C = 1$ oder 10 setzt, danach den maximalen Spannungsabfall, der in dem so berechneten Leitungsstrange auftritt, nachrechnet und schließlich alle Querschnitte im Verhältnis dieses falschen Spannungsabfalls (u_m) zum richtigen, gewollten Spannungsabfall u_n umrechnet, nämlich nach der Formel

$$q_v = \frac{(u_m)}{u_m} \cdot (q_v).$$

Hierin ist (q_v) der für $C=1$ oder 10 berechnete, also falsche Querschnitt. — Die unter A und B aufgeführten Verfahren liefern Leitungsstränge von gleicher Metallmenge.

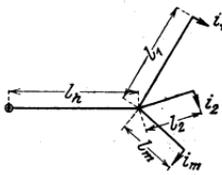


Abb. 354. Leitungsverzweigung in Zweige gleichen Charakters.

(650) Leitungsverzweigungen. A. Verzweigt sich ein Leitungsstrang in Zweige gleichen Charakters (siehe Abb. 354), so soll der Spannungsabfall bis zu den Endpunkten aller Zweige möglichst derselbe und gleich dem zugelassenen Höchstwert u_m sein. Man verteilt dann den Spannungsabfall auf die Nebenzweige einerseits (u_n) und den Hauptstrang andererseits (u_h) zweckmäßig so, daß die Metallmenge ein Minimum wird; das tritt ein, wenn²⁾

$$u_h : u_m = l_h : (l_h + l_f)$$

worin $l_f = \sqrt{(\sum i_j l_j^2) : I_h}$ die „fiktive Länge“ genannt wird.

B. Können ein Hauptstrang und Nebenstränge wie in dem in Abb. 355 gezeichneten Schema einer Hausinstallation unterschieden werden und in jedem Nebenstrange für sich vielleicht wieder ein relativer Hauptstrang und Neben-

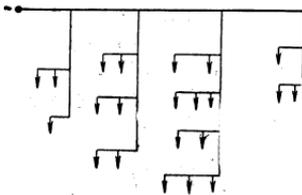


Abb. 355. Leitungsverzweigung; Schaltbild einer Hausinstallationsleitung

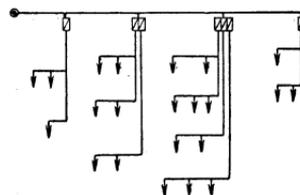


Abb. 356. Schaltbild einer Hausinstallationsleitung mit zusammengebauten Sicherungen.

stränge usw., so ist der Hauptstrang nach einem der in (649) angegebenen Verfahren zu berechnen, wobei die in die Nebenstränge abzweigenden Ströme als Belastungsströme erscheinen. Mit den Nebensträngen macht man es ebenso und mit den Nebensträngen zweiter Ordnung desgleichen. An jedem Endpunkte darf und soll womöglich auch der Spannungsverlust den zugelassenen Höchstwert erreichen.

C. Praktische Rücksichten können zu erheblichen Abweichungen von den beschriebenen Verfahren nötigen. Solche Rücksichten sind die Forderung des VDE, daß grundsätzlich bei jeder Querschnittsänderung eine Sicherung gesetzt werden soll, daß dies aber in Gebäuden bei Niederspannung nicht mehr nötig ist, wenn sich die Leitungen hinter einer Sicherung von höchstens 6 A Nennstromstärke ver-

¹⁾ S. Müllendorf, ETZ, 1892, S. 48.

²⁾ S. Grassi, Zeitschr. f. El. 1890, S. 524.

zweigen; ferner sollen die Sicherungen gemeinsam zusammengebaut werden (wodurch das Schema von Abb. 355 in das der Abb. 356 geändert wird)¹⁾; der Querschnitt von 1 mm² soll bei den in der üblichen Weise verlegten Kupferleitungen nicht unterschritten werden; schließlich sollen die Querschnitte nur nach bestimmten Größen abgestuft werden²⁾. Diese Regeln befolgend, kommt man zu folgendem Verfahren³⁾ für die Wahl der Querschnitte in Hausinstallationen:

Man nimmt für alle Nebenstränge den Querschnitt von 1 mm² an und vergrößert ihn nur da, wo, und nur insoweit, wie es die Rücksicht auf die Erwärmung der Leitungen verlangt (siehe (673)). Danach schätzt man und rechnet in den wichtigsten Nebensträngen den Spannungsabfall für den Fall der Höchstbelastung nach. Ergibt sich dabei für eine der Abzweigleitungen ein im Verhältnis zu den anderen übermäßig großer Spannungsabfall, so vermindert man ihn durch Wahl des nächst höheren Querschnitts. Die Differenz des zulässigen Spannungsverlustes u_m und des höchsten Spannungsverlustes in den Nebensträngen ist maßgeblich für die Berechnung des Hauptstranges, die nach einem der unter (649) genannten Verfahren zu erfolgen hat.

(651) **Der einfache beiderseitig gespeiste Leitungsstrang; das Problem der Bestimmung der Stromverteilung.** Liegt ein Leitungsstrang nach Abb. 357 vor, der von beiden Seiten gespeist wird, so kann über die Ströme in der Leitung von vornherein noch nichts ausgesagt werden; es entsteht also die Aufgabe, erst diese Ströme, die **Stromverteilung**, zu bestimmen. Das geschieht, indem man die eine noch unbekannte Stromzufuhr, etwa I_B als negative Stromabzweigung einführt und aus der Gleichung $\sum i_v \cdot R_v + i_B R_{AB} = 0$ den unbekanntem Strom

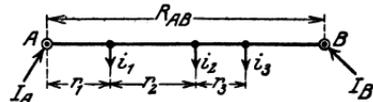


Abb. 357. Einfacher beiderseitig gespeister Leitungsstrang.

$$i_B = - \frac{\sum i_v R_v}{R_{AB}} = + I_B$$

berechnet. Daraus ist dann auch $I_A = \sum i_v - I_B$, also auch die gesamte Stromverteilung bekannt. — Man erkennt, daß die Stromverteilung nur eindeutig bestimmt ist, wenn die Widerstände der Leitungsstücke r_v oder, was praktisch dasselbe ist, die Querschnitte q_v bekannt sind. Es genügt aber auch schon, wenn das Verhältnis der Querschnitte etwa in der Form $q_v = \mu_v \cdot q$ bekannt ist, wobei q ein beliebig gewählter Bezugsquerschnitt ist und μ_v das Verhältnis ausdrückt. Die letzte Formel nimmt dann die Gestalt

$$i_B = - \frac{\sum i_v l'_v}{\sum l'_v}$$

an, worin jeweils $l'_v = \mu_v \cdot l_v$ ist. Im allgemeinen pflegt praktisch $\mu_v = 1$ zu sein, d. h. der Querschnitt ist durchweg derselbe.

(652) **Bestimmung der Stromverteilung in einem nur an den Knotenpunkten belasteten Leitungsnetz.** Um die Stromverteilung in einem Leitungsnetze nach Abb. 358 zu bestimmen, führt man die von den Stromzuführungspunkten, den sogenannten Speisepunkten A, B und C bis zu den Knotenpunkten a, b, c und d meßbaren Spannungsabfälle u_a, u_b usw. als Unbekannte ein und gewinnt durch einfache Anwendung des Ohm'schen und des einen Kirchhoff'schen Satzes, wenn die Leitwerte zwischen den Knotenpunkten und Speisepunkten mit G_{Aa}, G_{ab} usw. bezeichnet werden, das Gleichungssystem:

¹⁾ Siehe Vorschr. des VDE für die Errichtung und den Betrieb von elektrischen Starkstromanlagen, § 14 d und e.

²⁾ Siehe Vorschr. d. VDE für die Errichtung und den Betrieb von elektrischen Starkstromanlagen, § 20, 1 und 3. Siehe auch die Zahlentafel in (673).

³⁾ Teichmüller, „Die elektrischen Gleichstromleitungen“. Stuttgart 1898, S. 116.

$$\begin{aligned}
 u_a \sum_a G - u_b G_{ab} - u_c G_{ac} - u_d G_{ad} &= i_a \\
 -u_a G_{ba} + u_b \sum_b G \dots \dots - u_d G_{bd} &= i_b \\
 -u_a G_{ca} \dots \dots + u_c \sum_c G - u_d G_{cd} &= i_c \\
 -u_a G_{da} - u_b G_{db} - u_c G_{dc} + u_d \sum_d G &= i_d.
 \end{aligned}$$

Hierin bedeutet $\sum_a G$ die Summe aller im Knotenpunkte zusammenstoßenden Leitwerte; die anderen Zeichen erklären sich aus Abb. 358 von selbst. Das lineare Gleichungssystem gestattet die unbekanntenen Spannungsabfälle zu berechnen, wenn die Leitwerte oder die Verhältnisse der Querschnitte [siehe (651)] bekannt sind. Zur Berechnung kann man Näherungsmethoden, insbesondere die von Seidel veröffentlichte (Gaußsche Methode¹⁾ oder auch mechanische Einrichtungen²⁾ benutzen.

(653) Bestimmung der Stromverteilung in einem beliebig belasteten Leitungsnetze. Ein beliebig gestaltetes und beliebig belastetes Leitungsnetz kann, was die Stromverteilung betrifft, in voneinander unabhängige Bezirke zerlegt werden, wo-

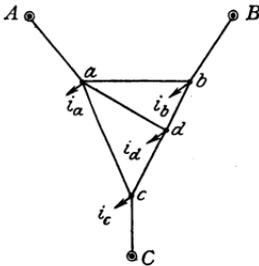


Abb. 358. Nur an den Knotenpunkten belasteter Bezirk eines Leitungsnetzes.

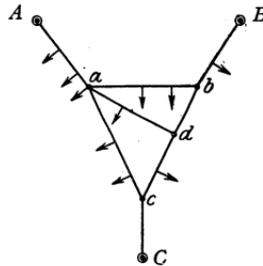


Abb. 359. Bezirk eines Leitungsnetzes mit beliebig verteilter Belastung.

bei unter Bezirk der kleinste Leiterkomplex verstanden werden soll, der durch einen in sich geschlossenen, von Speisepunkt zu Speisepunkt führenden und dabei keine Leitung schneidenden Linienzug umgrenzt werden kann. Ein solcher Bezirk allgemeinsten Gestalt ist in Abb. 359 gezeichnet. Die Aufgabe der Bestimmung der Stromverteilung löst man in zwei Teilen:

1. Man superponiert an allen Knotenpunkten Speisepunkte. Dann bildet jeder Leitungsstrang für sich einen Bezirk vom Charakter des Stranges in Abb. 357. Die Stromverteilung in jedem läßt sich, zumal wenn der Querschnitt in jedem einzelnen Strange sich nicht ändert, leicht bestimmen. Gleichzeitig sind die Ströme bekannt geworden, die den Knotenpunkten zugeführt werden, um sie zu den (superponierten) Speisepunkten zu machen. Durch diese Zuführungsströme ist das Netz gefälscht, sowohl was die Belastungsströme, als was die Leitungsströme betrifft.

2. Die Fälschung hebt man auf, indem man über das Netz mit den superponierten Speisepunkten ein Netz nach Abb. 358 lagert, indem man die Belastungsströme der Knotenpunkte i_a, i_b usw. mit den Werten einsetzt, die sich aus dem ersten Teil der Lösung der Aufgabe ergeben. In der Tat heben sich durch Über-einanderlagern der beiden Netze diese Belastungs- und Zuführungsströme auf. Daß sich durch Über-einanderlagerung der Leitungsströme in jedem Leitungsstück der wahre Leitungsstrom und somit insgesamt die wahre Stromverteilung

¹⁾ Abh. d. math.-phys. Klasse d. Bayer. Akad. 11. Bd., 1874. Siehe auch: Teichmüller, „Über die Stromverteilung in elektr. Leitungsnetzen“ (mit Beispiel einer praktischen Anwendung des Verfahrens). ETZ 1893, S. 539.

²⁾ Nowak'sche Rechenmaschine; siehe ETZ. 1914, S. 973.

ergibt, läßt sich durch eine mathematische Untersuchung nachweisen (Satz von der Superposition der Ströme).

Man kann die Berechnung der Stromverteilung ganz umgehen dadurch, daß man das Netz mit den Verbrauchern im Modell nachbildet und die Spannungsverluste zwischen den Speisepunkten und beliebigen Netzpunkten mißt.

(654) Andere Methoden zur Bestimmung der Stromverteilung. Das oben erklärte von Coltri angegebene und von Teichmüller vervollkommnete Verfahren zur Bestimmung der Stromverteilung hat (siehe ETZ 1903, S. 66 und S. 338) den Vorzug, in mathematisch klarer Weise Einblick in die Wirkungsweise eines Leitungsnetzes zu bieten, und den Nachteil, daß die Berechnung des Gleichungssystems für den mit den Lösungsverfahren nicht vertrauten Rechner umständlich sein kann. Manche benutzen deshalb zur Lösung der Aufgabe andere Verfahren, die (als Sukzessivverfahren) den Vorteil haben, ohne Lösung eines Gleichungssystems die Aufgabe schrittweise lösen zu können. Der Nachteil ist dabei der, daß man leicht falsche Schritte tun kann, die nicht oder nur auf umständlichem Wege zum Ziele führen. Veraltet ist die sogenannte Schnittmethode von Herzog und Stark, ebenso das Verfahren von Teichmüller (ETZ 1893, S. 537). Als schrittweises Verfahren wertvoll ist das Verfahren von Frick (Zeitschr. f. Elektrotechn. 1894, S. 265) und die Transfiguration von Kennelly (El. World and Engineer, Bd. 34, 12), die Herzog und Feldmann mit dem vorgenannten Verfahren vereinigt haben (ETZ 1900, S. 167). Ein graphisches Verfahren von Schwaiger, etwa mit den von Thomälen angegebenen Ergänzungen (ETZ 1920, S. 227 und 1921, S. 694), sei denen empfohlen, die graphische Verfahren zur Ermittlung von Werten bevorzugen.

(655) Vorausberechnung eines Leitungsnetzes. Mit den in (651) bis (654) angestellten Betrachtungen haben wir noch weiter nichts erreicht, als daß wir die Stromverteilung in einem gegebenen Leitungsnetze berechnen können. Unser Ziel ist aber, ein Leitungsnetz so vorauszuberechnen, daß es den Verbrauchern die elektrische Energie so zuführt, wie es zu einem ordnungsmäßigen Betriebe nötig ist. Hierzu bieten sich zwei Wege: entweder man stuft die Querschnitte je nach der Größe der Belastung der Leitungsstränge, nach der Größe der Entfernungen und der Wichtigkeit der einzelnen Strecken — in Städten wird der Charakter der Straße und die daraus auch zu beurteilende Zunahme der Anschlüsse diese Wichtigkeit wesentlich bestimmen — ab; dann ist das Verhältnis der Querschnitte bekannt und die Stromverteilung kann nach (653) bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Stromverteilung sind dann die Spannungsverluste zu berechnen und die Querschnitte ihrem absoluten Werte nach, aber unter Beibehaltung der gewählten Abstufung so festzulegen, daß nirgends der zulässige Spannungsabfall überschritten wird. Sollten dabei die Spannungsabfälle an den Verbraucherstellen, zu denen Strom von zwei Seiten zufließt; sehr verschieden groß sein, so müßte dieser Mangel durch Veränderung des Querschnittverhältnisses an gewissen Stellen des Netzes beseitigt werden. — Oder: Man schneidet das Netz um die Speisepunkte herum und die danach vielleicht noch gebliebenen Maschen so auf, daß nur noch maschenlose Leitungsverzweigungen übrigbleiben. Die Verzweigungen lassen sich nach früherem leicht berechnen. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß an den im geschlossenen Netze zusammenstoßenden Leitungsenden dieselbe Spannung herrscht. Man wird deshalb von vornherein so berechnen, daß die Spannungsverluste bis zu solchen Punkten möglichst dieselben sind.

Für den Anfänger empfiehlt es sich, zur Übung nach beiderlei Weise Leitungsnetze zu berechnen. Er wird dann sehen, daß das Berechnungsergebnis niemals ohne weiteres brauchbar ist, sondern daß zahlreiche Änderungen vorgenommen werden müssen, durch die praktischen Bedingungen Rechnung getragen wird, vor allem auch der Tatsache, daß die Leitungsquerschnitte nur in normalen Abstufungen üblich sind; und er wird dann lernen, während der Berechnung, ja während des Entwurfs des Netzes, schon auf solche Bedingungen von vornherein Rücksicht zu nehmen.

(656) Speiseleitungen. Zu den Speisepunkten muß die Energie von dem Kraftwerke aus erst zugeführt werden, und zwar so, daß die Spannung an allen Speisepunkten dieselbe ist, was in den vorigen Abschnitten als selbstverständlich angenommen war. Die Speiseleitungen müssen also so berechnet werden, daß der Spannungsabfall bei der der Netzberechnung zugrunde gelegten Belastung, in der Regel der Höchstbelastung, in allen derselbe ist. Sehr kurze Speiseleitungen würden dabei unter Umständen einen so kleinen Querschnitt erhalten müssen, daß sich die Leitung zu stark erwärmen könnte; man muß dann den Querschnitt doch größer nehmen und den fehlenden Spannungsverlust durch einen Vorschaltwiderstand hinzufügen. Der Spannungsverlust in den Speiseleitungen pflegt bei maximaler Belastung zu etwa 5 bis höchstens 15% angenommen zu werden. Speiseleitungen, die zu benachbarten (oder überbenachbarten) Speisepunkten führen, können auf ihrem gemeinsamen Wege zu sogenannten Sammelleitungen zusammengefaßt werden. Wesentlich für den Charakter der Speisepunkte und Speiseleitungen ist, daß im Maschinenhause die (mittlere oder auch Einzel-) Spannung an den Speisepunkten durch Prüfdrähte gemessen und danach konstant gehalten wird, und daß an die Speiseleitungen selbst niemals Verbraucher angeschlossen werden, im Gegensatz zu den eigentlichen Netzleitungen, den sogenannten Verteilungsleitungen.

Durch die Messung und Konstanthaltung der Speisepunktsspannung ist das Kraftwerk gleichsam an die Speisepunkte herangerückt, und im eigentlichen Netz erst fordert man so geringe Spannungsschwankungen, wie sie für die in dieser Beziehung empfindlichsten Stromverbraucher, die Glühlampen, erträglich sind. Die Spannungsschwankungen werden auch in geschlossenen Netzen durch den zeitlich und örtlich größten Spannungsabfall bestimmt und begrenzt (649). Die Speiseleitungen müssen bei dieser Betrachtungsweise als ein Teil der Generatoren, ihr Widerstand als ein Zusatz zum Ankerwiderstand aufgefaßt werden. Der Spannungsabfall in diesem Anker wird also vergrößert, und die Regelung auf konstante Spannung dadurch erschwert.

(657) Ausgleichleitungen. Die Spannung an den Speisepunkten soll nicht nur zeitlich, sondern auch örtlich stets dieselbe sein. Man könnte dies durch Einschalten eines regulierbaren Widerstandes in jede Speiseleitung erreichen, verzichtet aber im allgemeinen auf solche Regelung, teils wegen der damit verbundenen Verluste, teils wegen der Umständlichkeit der Bedienung. Dann aber muß das Netz selbst die Fähigkeit besitzen, Spannungsunterschiede, die mit der Belastungsänderung des Netzes zwischen den Speisepunkten auftreten können, auszugleichen. Zu diesem Ausgleich tragen sämtliche geschlossenen Netzleitungen von selbst bei. Leitungen, denen die Aufgabe des Ausgleichs besonders zugewiesen wird, heißen Ausgleichleitungen. Es sind in der Regel die Netzleitungen, die zwei Speisepunkte unmittelbar verbinden. Um ihre Wirkung zu verstehen, denken wir uns die Versorgungsgebiete der beiden ins Auge gefaßten Speisebezirke vollständig getrennt und die Speisepunkte A und B durch eine unbelastete Ausgleichleitung

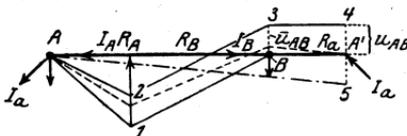


Abb. 360. Verminderung des Spannungsunterschiedes zwischen zwei Speisepunkten durch eine Ausgleichleitung.

vom Widerstande R_a miteinander verbunden; diese Leitung sei aber vorläufig noch geschnitten, und zwar an dem Speisepunkte A . Es entsteht dann das in Abb. 360 gezeichnete Schema. Der vom Speisepunkte A aus gemessene Spannungsabfall wird bei höchster gleicher Belastung durch den Linienzug $A1B$ dargestellt, bei verminderter Belastung durch den Linienzug $A234$. Schließt man jetzt die

Ausgleichleitung durch Verbindung des Punktes A' mit dem Punkte A , so muß der Punkt A' dieselbe Spannung annehmen wie der Punkt A . Der dazu führende Vorgang kann so erklärt werden, als ob ein Strom den aus den Widerständen

R_A , R_B und R_a gebildeten Kreis durchflösse, wie es in Abb. 360 gezeichnet ist; in Wirklichkeit fließt er weder zu noch ab, da ja A und A' identisch sind. Die Größe und Richtung des Stromes bestimmt sich aus der Bedingung, daß der Spannungsabfall bei A' aufgehoben werden muß. Es muß also $A'5 = A'4$ sein. Der nunmehr tatsächlich zustande kommende Spannungsunterschied zwischen den Speisepunkten, wie er sich durch graphische Addition der Ordinaten von $A 2 3 4$ und $A 5$ ergibt, ist

$$\bar{u}_{AB} = I_a R_a$$

Der ohne die Ausgleichleitung vorhandene Unterschied ist

$$u_{AB} = I_A R_A - I_B R_B$$

er ist ein Maß für die Verschiedenheit der Belastung in den beiden Speisebezirken. Daß der Ausgleichstrom ihn überwindet, drückt sich durch die Gleichung

$$u_{AB} = I_a (R_A + R_B + R_a)$$

aus. Die beiden letzten Gleichungen zusammen ergeben

$$\bar{u}_{AB} = \frac{R_a}{R_A + R_B + R_a} \cdot u_{AB}$$

Für ein aus den Verhältnissen beurteilbares u_{AB} kann man den Widerstand R_a der Ausgleichleitung so bemessen, daß \bar{u}_{AB} einen noch zugelassenen Wert, etwa 1% der Verbrauchsspannung, erreicht, oder eine im Netze schon vorhandene Verbindungsleitung auf Ausgleich, d. h. auf den Wert der Größe \bar{u}_{AB} nachrechnen. (Genauerer über diese Rechnung siehe ETZ 1901, S. 229 ff.)

(658) Entwerfen eines Leitungsnetzes. Die Aufgabe, ein Leitungsnetz für Gleichstrom zu entwerfen, liegt z. B. vor, wenn eine Stadt mit elektrischer Energie versorgt werden soll. Durch Erhebungen ist der zu erwartende Verbrauch nach Größe und Ort festzustellen, die Lage des Kraftwerks in der Regel nach äußerlichen Gründen [bequeme Kohlenzufuhr, Schlackenabfuhr, Wasserbeschaffung, Kosten des Bauplatzes usw. (624)] zu bestimmen und die Wahl der Spannung mit Rücksicht auf die Größe des Ausdehnungsgebietes, den Charakter der Belastung (ob vorwiegend Glühlampen oder Motoren) und die Kosten der Glühlampen und der Energie¹⁾ zu wählen. Dann ist zunächst das Netz seiner Gestalt nach zu entwerfen; man belegt dazu im Stadtplan alle Straßen, in denen Verbrauch angenommen ist, mit Leitungen, und zwar in der Regel ihrer ganzen Länge nach, wichtige Straßen beiderseitig, so daß ein engmaschiges Netz entsteht. Zahl und Ort der Speisepunkte ist durch Proberechnung zu bestimmen. Unter Umständen kann die Formel von S e n g e l (ETZ 1899, S. 807) zur Bestimmung der Zahl der Speisepunkte gute Dienste leisten. Über die Netzberechnung siehe (655). Der Geübte wird beim Entwurf und bei der Berechnung nie aus dem Auge verlieren, daß es sich um ein einheitliches Ganzes handelt, das seine Aufgabe nur dann richtig erfüllen kann, wenn in den Verteilungsleitungen der Spannungsverlust, also auch die Spannungsschwankungen, gering sind und der Ausgleich gut ist.

Ein gutes Leitungsnetz gleicht einem Kunstwerk, das um so vollkommener ist, je mehr es der Künstler verstanden hat, alles nebeneinander zu sehen, was der Ungeübte nur langsam voranschreitend erblicken und berücksichtigen konnte.

Wechselstromleitungen.

(659) Die Grundgrößen für einphasigen Wechselstrom.²⁾ Bei Leitungen für einphasigen Wechselstrom werden die Verhältnisse schon dann ziemlich verwickelt, wenn es sich nur um die Übertragung der Energie vom Erzeuger zu einer einzigen

¹⁾ s. Teichmüller, „Beitrag zur Beantwortung der Frage nach der günstigsten Betriebsspannung in elektrischen Anlagen.“ Journ. f. Gasbel. 1909, Heft 29.

²⁾ s. die Fußnote auf S. 461.

Gruppe von Verbrauchern (nach Abb. 352) handelt. Man muß dann mit dem Vektordiagramm arbeiten. Das Diagramm für den in Abb. 352 gezeichneten Leitungsstrang ist in Abb. 361 dargestellt. Dabei ist von der Spannung U an den Verbrauchern ausgegangen. Der Verbraucherstrom i , also auch der Leitungsstrom I folgt der Spannung um den φ , die Selbstinduktion in der Leitung verschiebt den Spannungsabfall gegen den Strom um den λ . Der Leistungsfaktor der Verbrauchergruppe ist also $\cos \varphi$, der der Leitung $\cos \lambda$.

Jetzt ist nicht mehr $u = \Delta U$, vielmehr ist $U_0 - U = \Delta U = u \cdot \cos \varphi + \delta$, worin $\varphi = \varphi - \lambda$ und bei Vernachlässigung von δ , die fast immer unbedenklich zulässig ist, und Division durch U

$$\omega = v \cdot \cos \varphi.$$

Für $\lambda = 0$ einerseits und $\varphi = 0$ andererseits treten die Leistungsfaktoren der Verbrauchergruppe und der Leitung in den Formeln $\omega = v \cos \varphi$ und $\omega = v \cos \lambda$ rein in Erscheinung. Gleichheit von ω und v hat man nicht nur für selbstinduktionsfreie Belastung und selbstinduktionsfreie Leitung, sondern schon, wenn $\varphi = \lambda$ ist.

Auch ζ ist nicht mehr gleich v , sondern, wie aus Abb. 361 hervorgeht,

$$\zeta = v \cdot \frac{\cos \lambda}{\cos \varphi} \quad \text{und} \quad \zeta = \omega \cdot \frac{\cos \lambda}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi}.$$

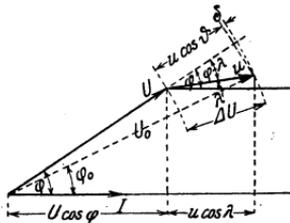


Abb. 361. Vektordiagramm eines nur am Ende belasteten Leitungsstranges bei einphasigem Wechselstrom.

Auch hier gilt, daß $\zeta = v$ und $\zeta = \omega$, wenn $\varphi = \lambda$ ist. — Die Leistungsschwankung ξ ist genau wie früher (647) aus der Spannungsschwankung zu beurteilen. Auch in bezug auf den relativen Arbeitsverlust α ist nichts Neues

zu sagen; die Formel dafür entsteht, wenn in dem Ausdrucke für ζ Zähler und Nenner mit der Zeit multipliziert werden.

(660) Grundformeln zur Berechnung von Einphasen-Wechselstromleitungen. Der einfache am Ende belastete Leitungsstrang. Sehen wir von der Grundgröße α ab, auf die die Leitungen später berechnet werden sollen, so bleibt die Aufgabe, die Leitung auf die vier anderen Grundgrößen zu berechnen. Am wichtigsten ist wie früher die Berechnung auf die Spannungsschwankung ω , weil diese die Leistungsschwankung ξ , und die Berechnung auf Leistungsverlust ζ , sofern dieser den Wirkungsgrad der Leitung bestimmt. Der Spannungsverlust v , an sich wieder fast ohne Bedeutung, erhält seine Bedeutung wie bei Gleichstrom als bequeme Rechnungsgröße, auf die ω und unter Umständen auch ζ zurückgeführt werden können.

Berechnung auf Spannungsschwankung ω . Wir gehen vom Spannungsabfall u aus. Es ist, wenn $2R$, der Scheinwiderstand der Gesamtleitung ist, $u = IR$, oder $u = IR : \cos \lambda$, also

$$u = \frac{I \cdot l}{q} \cdot 2q \cdot \frac{1}{\cos \lambda}.$$

Setzt man $u = vU$ und drückt v durch ω aus, so entsteht, nachdem man noch I durch $N : U \cos \varphi$ ersetzt hat, die Formel

$$q = \frac{Nl}{\omega U^2} \cdot 2q \cdot (1 + tg \varphi \cdot tg \lambda).$$

Der Querschnitt besteht hiernach gleichsam aus zwei Teilen. Der erste, der durch das Glied 1 im Klammerausdruck bestimmt wird, soll **Querschnitt ohne Induktion** heißen; in der Tat macht dieser Teil den ganzen Querschnitt aus, wenn der Verbraucher oder die Leitung induktionsfrei ist. Der zweite Teil kommt

durch die Wirkung der Selbstinduktion in Verbraucher und Leitung hinzu. In der letzten Formel soll die Größe $Nl/\omega U^2 \cdot \varrho$ als Grundquerschnitt, der Faktor 2 als Artfaktor (der einfachen Zweileiterleitung) und der Klammerausdruck als Tangensfaktor bezeichnet werden. — Die für die Querschnittsberechnung nötigen Werte von $\operatorname{tg} \varphi$ und $\operatorname{tg} \lambda$ sind in den beiden folgenden Tafeln enthalten, wobei $\operatorname{tg} \varphi$ einfach für eine Stufenreihe von $\cos \varphi$ ausgerechnet ist, während $\operatorname{tg} \lambda$ aus der bekannten Formel¹⁾ für die Selbstinduktion paralleler gestreckter Leiter (109) für die wichtigsten Leiterabstände D und Querschnitte q , soweit sie für Freileitungen in Frage kommen, berechnet ist. R_G stellt den Gleichwiderstand (mit Gleichstrom gemessenen Widerstand) eines Leiters von 1 km Länge

$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$
0,50	1,7321	0,75	0,8819
0,55	1,5185	0,80	0,7500
0,60	1,3333	0,85	0,6197
0,65	1,1691	0,90	0,4843
0,70	1,0202	0,95	0,3287

Zahlentafel der Werte von $\operatorname{tg} \lambda$.

q in mm^2	10	16	25	35	50	70	95
R_G in Ohm	1,75	1,094	0,700	0,500	0,350	0,250	0,184
D in cm							
30	0,193	0,295	0,441	0,596	0,820	1,106	1,452
40	0,203	0,312	0,467	0,633	0,872	1,176	1,551
50	0,211	0,325	0,487	0,661	0,912	1,233	1,628
60	0,218	0,335	0,504	0,684	0,945	1,281	1,690
70	0,224	0,344	0,517	0,704	0,972	1,321	1,742
80	0,228	0,352	0,529	0,720	0,997	1,354	1,788
90	0,233	0,359	0,540	0,735	1,018	1,382	1,828
100	0,236	0,365	0,549	0,748	1,036	1,408	1,864
120	0,243	0,375	0,566	0,771	1,070	1,454	1,926
150	0,251	0,388	0,586	0,799	1,109	1,511	2,002
200	0,261	0,404	0,612	0,835	1,161	1,583	2,100
250	0,269	0,417	0,632	0,863	1,201	1,640	2,176

dar. Die analogen Werte auch für schwächere Leitungsquerschnitte und geringere Leitungsabstände zu berechnen, wie sie in Hausinstallationen vorkommen, lohnt sich nicht, weil die Selbstinduktion in Hausinstallationen keine Rolle spielt.

Die Tatsache, daß der Leitungsquerschnitt für eine Übertragung mit Einphasenwechselstrom, wenn der Verbraucher oder die Leitung oder beide selbstinduktionsfrei sind, gleich dem Querschnitt einer Gleichstromübertragung ist, verdient besondere Hervorhebung, gerade auch deshalb, weil man in der Literatur nicht selten andere, irrtümliche Ansichten vertreten findet. Man darf natürlich nicht vergessen, daß gleiche Spannungsschwankungen in der Gleich- oder Wechselstromleitung vorausgesetzt sind.

Berechnung auf Leistungsverlust ζ . Aus der Formel für den Leistungsverlust $n = I^2 l 2 \varrho : q$, worin $n = \zeta N$ und $I = N : U \cos \varphi$ ist,

$$q = \frac{Nl}{\zeta U^2} \cdot 2 \varrho \cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi}$$

¹⁾ siehe ETZ 1921, S. 301, wo in Gl. (11) der Wert der Selbstinduktion für die Längeneinheit eines der beiden Leiter ausgedrückt ist.

Im Gegensatz zur Berechnung auf Spannungsschwankung wird also bei der Berechnung auf Leistungsverlust der Querschnitt bei Vorhandensein von Selbstinduktion in den Verbrauchern erheblich größer als bei Gleichstrom, und zwar unabhängig davon, ob die Leitung Selbstinduktion hat oder nicht. Diese Tatsache war die eigentliche Ursache zu den oben erwähnten Irrtümern. Es wurde nämlich übersehen, daß die Berechnung auf Leistungsverlust etwas wesentlich anderes ist als die Berechnung auf Spannungsschwankung, und der ersteren Berechnungsweise eine ungebührliche Bedeutung beigelegt. Die Berechnungsweise hat aber nur sehr geringe Bedeutung, und zwar nur dann, wenn der Leistungswirkungsgrad der Energieübertragung von Wichtigkeit ist. Das ist er wegen der praktisch in der Regel sehr stark veränderlichen Belastung nur selten; an die Stelle des Leistungswirkungsgrades tritt dann der Arbeitswirkungsgrad und mit ihm der relative Arbeitsverlust α ; siehe (675).

Die Berechnung auf Leistungsverlust soll wegen ihrer geringen Bedeutung vorläufig nicht weiter behandelt und erst in (668) zusammenfassend erledigt werden.

(661) Einfacher, verteilt belasteter Leitungsstrang bei einphasigem Wechselstrom. Wird der in Abb. 353 gezeichnete Leitungsstrang mit Wechselstrom gespeist, so können alle Verbraucher i_1, i_2 usw. verschiedene Leistungsfaktoren $\cos \varphi_1, \cos \varphi_2$ usw. haben. Das Vektordiagramm baut man dann in der Weise auf, daß man vom letzten Verbraucher, also der Klemmenspannung U_m ausgeht, und mit den bekannten i_m, φ_m und λ_m das Diagramm gemäß Abb. 361 entwirft. Was in jener Abbildung U_0 ist, wird jetzt U_{m-1} , an dessen Vektor die bekannten Größen φ_{m-1} und i_{m-1} angetragen werden. Aus i_{m-1} und i_m ergibt sich durch graphische Addition der Leitungsstrom I_{m-1} im vorletzten Stück, dessen Betrag zur Auffindung des Spannungsabfalls u_{m-1} nötig ist. Durch dessen Größe und durch die durch $\cos \lambda_2$ festgelegte Richtung erhält man die drittletzte Abzweigschaltung U_{m-2} , und so geht die Konstruktion weiter, bis man die Anfangsspannung U_0 gefunden hat. Diese exakten Diagrammkonstruktionen sind für die praktischen Bedürfnisse zu umständlich. Man hat sich bis jetzt damit begnügt, ein praktisches Verfahren für induktionsfreie Leitungen unter Vernachlässigung der Phasenverschiebung zwischen den Spannungen an den Abzweigungspunkten U_m, U_{m-1} usw. zu entwickeln. Es besteht darin¹⁾, daß man Leitungsstränge gleicher Gestaltung annimmt, von denen aber der eine mit den Wirkströmen $i_{1,v} = i_v \cos \varphi_v$, der andere mit den Blindströmen $i_{1,b} = i_v \sin \varphi_v$ belastet ist. Für jeden werden die Leitungsströme bestimmt und der wahre Leistungsstrom aus dem Wirk- und Blindstrom in dem betreffenden Leitungsstück graphisch oder nach der Formel $I_v = \sqrt{I_{1,v}^2 + I_{1,b}^2}$ rechnerisch ermittelt. — Mit den Spannungsverlusten macht man es ebenso: man berechnet die Spannungsabfälle der Wirkströme und der Blindströme je für sich und addiert sie graphisch. Der am Ende der Leitung zustande gekommene Spannungsabfall ist nach Größe und Phase der für die Berechnung der Leitung im selben Sinne maßgebliche, wie es der Spannungsabfall u in dem Leitungsstrange von Abb. 361 für die nur am Ende belastete Leitung ist. Für die Berechnung des Leitungsquerschnitts bleibt dann die Formel

$$q = \frac{\sum N_v I_v}{\omega U^2} \cdot 2 \rho \cdot (1 + tg \varphi \cdot tg \lambda).$$

(662) Leitungsnetz für einphasigen Wechselstrom. Der für die Leitungsnetze für Einphasenwechselstrom gangbare Weg der Behandlung ist im vorigen Abschnitte schon genau vorgezeichnet. Auch bei den Netzen bzw. Netzbezirken nimmt man ein Netz mit Wirkstrom- und eines mit Blindstrombelastung an. Für jedes bestimmt man nach der in (653) und (654) gegebenen Belehrung die Stromverteilung und addiert die in jedem der beiden Netze erhaltenen Leistungsströme graphisch. Auch für die Vorausberechnung gilt die oben, in (655) gegebene Anleitung. Ebenso ist über Speiseleitungen und Ausgleichsleitungen nichts Neues zu sagen.

¹⁾ Herzog und Feldmann, ETZ 1899, S. 780.

(663) **Der einfache am Ende in Dreieckschaltung belastete Leitungsstrang bei Drehstrom.** In Abb. 362 a ist das Schema einer am Ende in Dreieckschaltung belasteten Drehstromleitung gezeichnet. Eine einfache, am besten durch ein Vektordiagramm der Ströme, Spannungen und Spannungsverluste unterstützte Betrachtung läßt erkennen, daß sich der für den Verbraucher I' wirksame Spannungsverlust u' aus vier Komponenten zusammensetzt, indem nämlich I' in Leitung 1 und Leitung 2 (Komponenten u'_1 und u'_2), I'' in Leitung 2 (Komponente $-u''_2$) und I''' in Leitung 1 (Komponente $-u'''_1$) fließt. Diese Kom-

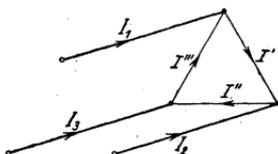


Abb. 362 a. Schema einer Drehstromleitung mit Dreiecksschaltung der Verbraucher.

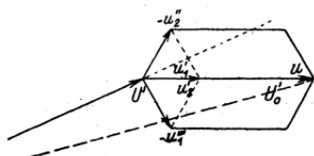


Abb. 362 b. Vektordiagramm der Spannungsgrößen zu Abb. 362 a.

ponenten setzen sich gemäß Abb. 362 b bei Vollbelastung der drei Belastungsdrittel zum maximalen Spannungsabfall $u = 3 u'_1 = 3 I' \cdot R_s$ zusammen, wobei R_s der Scheinwiderstand eines Leitungsdrahtes ist. In Erinnerung an (660) entwickeln wir diese Formel weiter zu der Grundformel zur Berechnung des Leitungsquerschnittes einer Drehstromleitung

$$q = \frac{Nl}{\omega U^2} \cdot q \cdot (1 + tg \varphi \cdot tg \lambda)$$

Für dieselbe Leistung und unter sonst gleichen Bedingungen ist also der Querschnitt halb so groß als bei einphasigem Wechselstrom. Wir sagen: Der A r t f a k t o r (weil er die Art der Leitung bestimmt) ist bei den Leitungen für Gleichstrom und für einphasigen Wechselstrom 2, für Drehstrom 1. — Die gedachte Spannungsschwankung vom Relativwerte ω tritt dann auf, wenn die gesamte Belastung von der Größe $N = 3 U I \cos \varphi$ von diesem Höchstwerte auf Null abnimmt. Sind die drei Belastungsdrittel völlig unabhängig voneinander, so kann man nur annehmen, daß eines der Drittel um seinen vollen Betrag schwanke. Die Spannungsschwankung wird dann $\Delta U = \frac{2}{3} u$ und der Querschnitt der Leitung, in der in diesem Falle dieselbe Spannungsschwankung auftreten soll, $\frac{2}{3}$ mal so groß wie der vorige Querschnitt. Aus Abb. 362 b entnehmen wir noch die wichtige Tatsache, daß der Spannungsabfall, wie auch die Belastung der drei Drittel sein mag, niemals größer werden kann als für den Fall der gleichen Höchstbelastung der drei Drittel.

Bei der Berechnung beliebig belasteter Leitungsstränge oder Leitungsnetze nimmt man im allgemeinen an, daß die Belastung auf die drei Drittel vollkommen gleichmäßig verteilt sei, und berechnet dann, als wenn man es mit einer Einphasenleitung zu tun hätte, bei der jedoch die Längen halb so groß wären wie bei der wirklich vorliegenden Drehstromleitung.

Mehrleitersysteme.

(664) **Allgemeines.** Unter Mehrleitersystemen sollen solche Leitungssysteme verstanden werden, zu denen mehr als zwei Leiter gehören, bei denen aber außerdem diese Leiter als Teile der Gesamtanlage so angeordnet sind, daß die Spannung für die Verbraucher, verglichen mit dem Zweileitersystem, nicht geändert, die Spannung für die Übertragung dagegen vergrößert ist. Das in (663) behandelte Drehstromsystem gehört also in diesem Sinne nicht zu den Mehrleitersystemen, vielmehr entspricht die Dreizahl der Leiter dort der Dreiheit, die zum Wesen des Drehstroms gehört. Gebrauch werden heutzutage das Dreileitersystem für Gleichstrom und Einphasenwechselstrom und das Vierleitersystem für Drehstrom. Ver-

altet ist das im letzten Jahrzehnt des vorigen Jahrhunderts verwendete Fünfleitersystem.

(665) Das Dreileitersystem. Bei dem Dreileitersystem, wie es in Abb. 363 dargestellt ist, sind die Verbraucher und die Erzeuger so hintereinander geschaltet, daß man sich die Anlage aus zwei Zweileiteranlagen in der Weise entstanden denken kann, daß die negative Leitung der einen mit der positiven Leitung der anderen vereinigt ist. Sind dann die Verbraucher auf die so entstandenen Hälften des Dreileitersystems nach Größe, Zahl und Art sehr gleichmäßig verteilt, so ist der Mittel- oder Nulleiter fast stromlos, und es tritt in ihm kein Spannungsverlust auf. Man

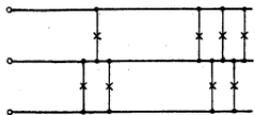


Abb. 363. Dreileitersystem.

ist beim Dreileitersystem auf eine solche möglichst gleichmäßige Belastung bedacht und glaubt deshalb in der Regel den Mittelleiterquerschnitt kleiner als den Querschnitt der Außenleiter machen zu dürfen, so daß $q_a = m \cdot q_m$ gesetzt werden kann, worin q_a und q_m die Querschnitte des Außen- und Mittelleiters und m meistens eine ganze Zahl ist, die nach den Regeln der Praxis zu 2, seltener zu 1 oder 3 gewählt zu werden pflegt.

Betrachten wir zunächst den nur am Ende belasteten Dreileiterstrang und unterscheiden wir darin ähnlich wie bei der Drehstromleitung gleichmäßige Schwankung der beiden Hälften der Belastung und die selbständige Schwankung jeder Belastungshälfte für sich, so erkennen wir, daß im ersten Falle die Leitung sich gerade so verhält wie eine gewöhnliche Zweileiterleitung; der Mittelleiter spielt überhaupt keine Rolle, und jede Verbraucherhälfte steht allein unter dem Spannungsverlust $u = I' \cdot R_a$ im Außenleiter. Bei derselben Verbraucherspannung, d. h. wenn die Spannung einer Dreileiterhälfte gerade so groß ist wie beim Zweileitersystem die Verbraucherspannung, so liegt in einer solchen Dreileiterleitung einfache Spannungsverdopplung vor, und der Querschnitt wird gemäß der in (648) angestellten Überlegung auf ein Viertel vermindert; der Artfaktor in der Querschnittsformel, der bei der Gleichstrom- und Einphasenwechselstromleitung 2 und bei der Drehstromleitung 1 war, wird also jetzt $\frac{1}{2}$; darin liegt der Vorteil des Dreileitersystems. Dieser Vorteil wird um so mehr erreicht, je mehr die Voraussetzung gleicher Belastungsverteilung auf die Hälften des Systems und gleichmäßiger Belastungsschwankung erfüllt ist.

Schwankt die Belastung in jeder Hälfte selbständig, so liegt im Vergleich zur Zweileiterleitung der Fall am nächsten, daß eine Belastungshälfte um ihren vollen Betrag schwankt, und zwar in einem Augenblicke, wo die andere sich nicht ändert. Dann ist die Spannungsschwankung in der Hälfte der schwankenden Belastung gleich dem gesamten Spannungsverluste in dem zugehörigen Außen- und Mittelleiter, also gleich $u = I' \cdot (R_a + R_m) = I' \cdot R_a (1 + m)$. Entwickelt man diese Formel wiederum nach q und führt die Gesamtbelastung der beiden Hälften $N = 2 U I$ ein (worn I als gemeinsames Zeichen für die gleichen Ströme I' und I'' in den beiden Netzhälften gesetzt ist), so ergibt sich als Querschnittsformel

$$q = \frac{N l}{2 \omega U^2} \cdot q (m+1).$$

Außer dem Artfaktor vom Werte $\frac{1}{2}$ erscheint hier der Faktor $m + 1$, der Mehrleiterfaktor genannt werden soll.

Die größte Spannungsänderung kommt vor, wenn die volle Belastung der einen Netzhälfte auf die vorher unbelastete andere Hälfte umschlägt. Dann kann nicht mehr wohl von „Schwankungen“ gesprochen werden, die plötzlich zu denken sind; es soll vielmehr der Ausdruck Änderung gebraucht werden. Die Spannungsänderung ist bei diesem Vorgange in jeder Netzhälfte, wie leicht einzusehen ist, $\mathcal{L}U = u (2m + 1)$, und an Stelle des Mehrleiterfaktors $m + 1$ tritt in der vorigen, im übrigen ungeänderten Formel der Mehrleiterfaktor $2m + 1$. Auf solche un-

gewöhnlichen Belastungsänderungen Rücksicht zu nehmen, hat man bei der Berechnung von Dreileiterleitungen fast nie Anlaß oder richtiger; man soll das Dreileitersystem nur anwenden, wo solche Belastungsänderungen nie vorkommen können.

Bei Dreileiterleitungen für einphasigen Wechselstrom tritt zu den gebrachten Formeln der Tangensfaktor $1 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \lambda$ hinzu.

Bei der Berechnung beliebig belasteter Leitungsstränge oder Leitungsnetze nimmt man, wenn die Umstände es nicht unmöglich machen, an, daß die Belastung auf die beiden Hälften des Dreileitersystems völlig gleichmäßig verteilt und, bei Wechselstrom, die Leistungsfaktoren dieselben seien, und berechnet dann, als ob man es mit einer Zweileiterleitung zu tun hätte, selbstverständlich aber unter Einsetzung des richtigen Artfaktors. Den Mehrleiterfaktor wendet man aus dem weiter oben angegebenen Grunde nicht an.

Den Mittelleiter läßt man häufig ohne Isolation, verlegt ihn auch so in die Erde („blanker“ Mittelleiter); dies erspart Isolation. Nebeneinander liegende blanke Leitungen können vereinigt werden, wobei an Befestigungsmitteln und auch an Leitungsquerschnitt gespart werden kann. Vgl. auch (696). An feuchten Stellen können blanke Leiter, wenn die Befestigungsmittel aus anderem Metall bestehen, elektrolytisch beschädigt werden; vgl. (693). Isolationsfehler können wie Erdschlüsse behandelt werden. Der blanke oder geerdete Mittelleiter darf nicht mit Rohrnetzen verbunden werden, an welche geerdete Telegraphenleitungen angeschlossen sind.

(666) Drehstrom-Sternschaltung. Schaltet man bei Drehstrom die Verbraucher nicht wie in Abb. 362a unmittelbar zwischen die drei Leitungen, sondern zwischen diese und eine gemeinsame Mittel- oder Nulleitung vom Querschnitt q_m (wobei $q_a = m \cdot q_m$), so erhalten wir Sternschaltung in bezug auf die Verbraucher und gleichzeitig ein Vierleitersystem, das dem behandelten Dreileitersystem in manchen Stücken sehr ähnlich ist; siehe Abb. 364. Die Leitungsspannung wird gegenüber der Verbraucherspannung zwar nicht verdoppelt, aber auf das $\sqrt{3}$ -fache erhöht. Wie oben kann man Schwankung der Belastung als Ganzes, Schwankung eines einzelnen Drittels und die in bezug auf die Spannungs-„änderung“ wirksamste Belastungsänderung unterscheiden.

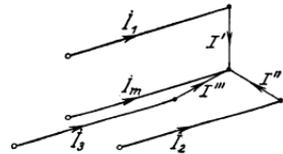


Abb. 364. Drehstrom-Sternschaltung.

Im ersten Falle wird der Querschnitt, der ja mit dem Quadrate der Leitungsspannung abnimmt, auf den dritten Teil des Querschnitts für Drehstromdreieckschaltung vermindert; der Artfaktor ist $\frac{1}{3}$. Bei der Einzelschwankung liegen die Verhältnisse genau wie beim Dreileitersystem, und der Mehrleiterfaktor ist wie bei jenem gleich $m + 1$. Die ungünstigste Belastungsänderung ist die, daß vor der Änderung das eine Drittel, etwa I' , vollbelastet ist, während die anderen beiden Drittel unbelastet sind; nach der Änderung sind diese beiden Drittel voll- und das erste unbelastet. Der Spannungsabfall vor der Änderung setzt sich dann aus dem Abfall im Außen- und im Mittelleiter zusammen, ist also gleich $u(m + 1)$, wenn er im Außenleiter gleich u ist. Nach der Änderung ist der Spannungsabfall in dem völlig entlasteten Außenleiter gleich Null, im Mittelleiter, geradeso wie beim Dreileitersystem gleich $-m \cdot u$, so daß sich die Spannungsänderung in dem jetzt entlasteten Drittel zu $\Delta U = u(2m + 1)$ ergibt. Der Mehrleiterfaktor ist also derselbe wie beim Dreileitersystem, nämlich $2m + 1$.

Artfaktor und Mehrleiterfaktor bestimmen den Leitungsquerschnitt. Da die Mehrleiterfaktoren dieselben sind wie beim Dreileitersystem, der Artfaktor aber $\frac{1}{3}$ gegenüber dem Artfaktor des Dreileitersystems $\frac{1}{2}$ ist, so ergibt sich eine Vergrößerung des Querschnitts im Verhältnis 2 : 3.

Über die Berechnung von Leitungssträngen und Leitungsnetzen gilt das in (663) und (665) Gesagte.

Der Mittelleiter kann auch hier wie der Mittelleiter des Dreileitersystems ohne Isolation gelassen werden (665).

(667) Spannungsteilung. Bei Gleichstrom kann die Teilung der Übertragungsspannung (Außenleiterspannung) in die zwei gleichen Hälften, also in die Verbraucherspannung, in der Weise vorgenommen werden, daß zwei Generatoren hintereinander geschaltet und an den Verbindungspunkt der Mittelleiter angeschlossen wird. Hierzu kann noch ein Generator mit der Außenleiterspannung hinzugefügt werden. Die Anlage kann natürlich durch Akkumulatorenbatterien ergänzt werden. Auch mit Akkumulatoren allein, die neben den Generator für die Außenleiterspannung geschaltet sind, läßt sich die Spannung teilen, doch sind dann zur Ladung der Batteriehälften besondere Vorkehrungen zu treffen (670 Bb). Nachteilig ist außerdem, daß beim Auslaufen einer zersprungenen Zelle die Anlage vorübergehend betriebsunfähig wird. Endlich teilt man auch mit Ausgleichsmaschinen. Die Schaltungsmöglichkeiten, nach denen diese Anlagenteile miteinander verbunden werden, sind zahlreich und ihre Auswahl erfordert aufmerksame Überlegung. Siehe (670)¹⁾. Bei Wechselstrom und Drehstrom teilt man die Spannung mit Transformatoren und unter Umständen auch mit Drosselspulen. Auch hier sind mehrere Schaltungen, die eine gute Spannungsteilung sichern sollen, möglich²⁾.

(668) Allgemeine Formel für die Leitungsberechnung auf Spannungsschwankung und Leistungsverlust. Aus den vorangegangenen Betrachtungen entnehmen wir zusammenfassend, daß sich alle Formeln für die Querschnittsberechnung der Leitungen auf Spannungsschwankung in folgende Formel zusammenfassen lassen:

$$q = C \cdot M \cdot \frac{Nl}{\omega U^2} \cdot \rho \cdot (1 + tg \varphi \cdot tg \lambda).$$

Hierin ist N stets die gesamte angeschlossene Leistung, also beim Dreileitersystem die Belastung in beiden Hälften, bei Drehstromleitungen die Belastung in den drei Dritteln, U ist immer die Verbraucherspannung. Der spezifische Widerstand ρ muß bei Wechselstrom unter Umständen erhöht werden, dann nämlich, wenn der Verlust durch Wirbelströme oder Stromverdrängung (Skinneffekt) vergrößert wird. Über den Artfaktor C und den Mehrleiterfaktor M gibt die folgende Zahlentafel Aufschluß. Die Mehrleiterfaktoren treten (665, S. 475) nicht in Kraft.

	Gleich- und Einphasenwechselstrom		Drehstrom	
	Zweileiter	Dreileiter	Dreieckschaltung	Sternschaltung
C	2	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{3}$
M_g	1	1	1	1
M_{se}	—	$m+1$	$\frac{2}{3}$	$m+1$
$M_{\dot{a}e}$	—	$2m+1$	1	$2m+1$

Hierin deuten die Indizes g auf Gesamtschwankung, se auf Schwankung der Einzelbelastung bei Vorhandensein mehrerer Leiter, $\dot{a}e$ auf diejenige Änderung der Belastung, die die größte Spannungsänderung nach sich zieht. Über $tg \varphi$ und $tg \lambda$ siehe (660). Über die $tg \lambda$ bestimmende Selbstinduktion s. (109, Nr. 10, 14; 110, Nr. 3 bis 5)³⁾.

In ähnlicher Weise kann man eine Formel für die Berechnung auf relativen Leistungsverlust aufstellen. Sie lautet:

$$q = C \cdot \frac{Nl}{\zeta U^2 \cos^2 \varphi} \cdot \rho.$$

Über die Rechnung auf Leistungsverlust ist das wichtigste in (660) gesagt.

¹⁾ Siehe auch Teichmüller: Lehrgang der Schaltungsschemata, 2. Aufl. Berlin und München 1921.

²⁾ Siehe Casselle Buch, Band 2, 2. Aufl. Wird 1925 erscheinen.

³⁾ Siehe auch ETZ 1921, Heft 13 und 14.

Energieverteilung mit Umformung.

(669) **Übertragung der Energie auf große Entfernungen.** Durch die Mehrleitersysteme hatten wir eine gewisse Unabhängigkeit der Verbraucherspannung von der Übertragungsspannung erreicht und dadurch den Vorteil niedriger Verbraucherspannung mit dem hoher Übertragungsspannung verbinden können, — aber doch nur in geringem Grade. Vollkommen unabhängig werden die beiden Spannungen in Wechselstromanlagen durch die Transformatoren.

Die Höhe der Übertragungsspannung richtet sich nach der Größe der Entfernung und der Größe der Belastung; es sind Spannungen von wenigen Kilovolt bis über 100 kV üblich.

A) Anlagen mit einmaliger Transformierung. Bei Anlagen mit mäßiger Hochspannung, bis etwa 20 bis 30 kV, pflegt man die Spannung unmittelbar auf die Verbraucherspannung herabzusetzen. Die Hochspannungsleitung erscheint dann wie ein Leitungsstrang gemäß Abb. 352 oder Abb. 353 oder wie eine Leitungsverzweigung nach Abb. 354 oder auch ein Leitungsnetz, von dem in Abb. 359 ein Bezirk gezeichnet war. An Stelle der Verbraucher treten die Transformatoren. Erst in solchen Fernleitungen, die in der Mehrzahl als Freileitungen ausgeführt werden, ist die Selbstinduktion der Leitungen von großer Bedeutung.

Die so gedachten Einzeltransformatoren bringen im Betriebe einen großen Nachteil mit sich: Sie müssen so bemessen sein, daß sie die größte von ihnen geforderte Leistung ohne gefährliche Erwärmung umzusetzen vermögen, sind aber doch die längste Zeit im allgemeinen nur mäßig belastet. Der Leistungswirkungsgrad nun, den man gerade bei Transformatoren für den Fall der Höchstbelastung sehr groß halten kann, nimmt mit abnehmender Belastung sehr stark ab, so daß der Arbeitswirkungsgrad, etwa über ein Jahr gerechnet, leicht sehr klein werden kann; es kann Anlagen geben, in denen während vieler Stunden des Tages bei weitem der größte Teil der erzeugten Energie in den Transformatoren nutzlos in Wärme umgesetzt wird. Unter Umständen stellt man deshalb zwei Transformatoren, vielleicht verschiedener Größe, auf und schaltet den einen oder den anderen oder beide Transformatoren je nach der Größe der Belastung ein.

Wo ein größeres Gebiet, etwa eine Stadt, zu versorgen ist, vermeidet man die großen Verluste in den Transformatoren dadurch, daß man die Transformatoren auf ein geschlossenes Sekundärnetz arbeiten läßt. Die Höchstbelastung eines Sekundärnetzes ist selbstverständlich viel kleiner als die Summe der Höchstbelastungen aller Anschlüsse, und nur für jene höchste Netzbelastung brauchen die Transformatoren insgesamt bemessen zu werden. Ein solches Sekundärnetz sieht gerade so aus wie das früher behandelte Gleichstromnetz. An den Speisepunkten sind Transformatoren zu denken, die durch ein in der Regel sehr weitmaschiges Primärnetz mit dem Kraftwerke verbunden sind. Das Primärnetz arbeitet gewöhnlich mit einem geringen Verluste. Es kann aber auch vorkommen, daß es vom Kraftwerke aus erst durch Speiseleitungen erreicht werden kann, in denen höhere Verluste zugelassen werden müssen, wobei dann auch die Spannungen an den Speisepunkten beobachtet und konstant gehalten werden müssen.

B) Anlagen mit mehrmaliger Transformierung. Ist eine Spannung über 30 oder 50 kV nötig, so würde man, wenn man bei der Projektierung nach der bisherigen Übung verführe, bald bemerken, daß die Transformatorstationen unverhältnismäßig teuer werden, denn die Spannung bestimmt den Preis zum wesentlichen Teile. Man denke sich dazu ein größeres Gebiet mit Städten und vielen Dörfern und in jedem noch so kleinen Dorfe eine, in den Städten mehrere und unter Umständen viele Transformatorstationen. Man wird dann von selbst auf den Gedanken kommen, näher zusammenliegende Dörfer zusammenzufassen und mit einer Transformatorstation zu versorgen. Weil aber die Dörfer doch zu weit voneinander abliegen, als daß man sie mit der niedrigen Verbraucherspannung wirtschaftlich erreichen könnte, so sieht man sich veranlaßt die Hochspannung erst auf eine Mittelspannung von vielleicht 10 kV herabzusetzen, diese

in einem Mittelspannungsnetze über die Dörfer zu verteilen und erst zuletzt in jedem Dorfe die Mittelspannung auf die Verbraucherspannung herabzutransformieren. Eine Kosten- und wirtschaftliche Berechnung würde lehren, daß durch Hinzufügen von Mittelspannungsnetzen die Anlage billiger und wirtschaftlicher wird.

Das Schema einer solchen Fernverteilung ist in Abb. 365 dargestellt. *a* ist das Kraftwerk, in dem die Energie mit einer Spannung von 10 kV erzeugt werden mag. Die nähere Umgebung des Werkes wird mit dieser Spannung versorgt. Von dem in unmittelbarer Nähe des Kraftwerkes befindlichen Schalthause *b* geht eine

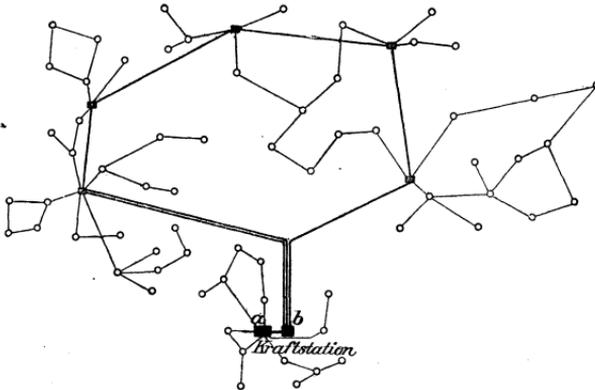


Abb. 365. Hochspannungsnetz und Mittelspannungsnetze einer Fernverteilung.

stärker gezeichnete Hochspannungs-Ringleitung aus, die nach der ersten Transformatorstation links wegen der hohen Belastung dort verdoppelt ist. Die dünner gezeichneten Leitungen sind die Leitungen der Mittelspannungsnetze, die kleinen Kreise Transformatorstationen der Ortschaften. Die Niederspannungsnetze sind nicht gezeichnet.

(670) Umformung mittels Sammelbatterien. Aus wirtschaftlichen und Betriebsgründen fügt man häufig in Verteilungsanlagen Sammlerbatterien ein; die hierdurch erzielbaren Vorteile werden in (614) dargelegt. Über die Berechnung der Batterie- und Zellengröße vgl. (616). Für ortsfeste Batterien kommen nur Bleisammler in Betracht.

A. Ladung und Entladung der Batterien und Dynamomaschinen und Zubehör. Dynamomaschinen, welche mit der Batterie zusammenarbeiten, sollen imstande sein, die normale Ladestromstärke bei dem 1,3fachen und die halbe normale Ladestromstärke bei dem 1,5fachen der Netzspannung mehrere Stunden lang abzugeben. Es werden meist Nebenschlußmaschinen verwendet; wird eine Verbundmaschine benutzt, so muß die Nebenschlußwicklung unbedingt auf der Batterieseite des selbsttätigen Minimalausschalters angeschlossen sein. Der Regler der Nebenschlußmaschine muß eine vollständige Stromunterbrechung ermöglichen. Er wird auf der Batterieseite des Minimalausschalters angeschlossen, damit die Maschine von der Batterie aus erregt werden kann, ehe man sie einschaltet.

Läßt sich die Maschinenspannung nicht über die Netzspannung erhöhen, so kann man die Batterie entweder in 2 oder 3 Reihen geschaltet laden, oder man verwendet eine Zusatzmaschine, welche die nötige Zusatzspannung liefert. Ihre Spannung muß bei Zweileiter-Anlagen in den Grenzen von $\frac{1}{10}$ bis zur halben, bei Dreileiter-Anlagen von $\frac{1}{5}$ bis zur ganzen Verbrauchsspannung zu regeln sein.

Der Minimalausschalter dient zum Schutze der Maschine und ist in deren Zuleitungen angeordnet; er soll bei Stillsetzen der Maschine oder bei Betriebsstö-

rungen verhindern, daß Sammlerstrom in die Maschine gelangt und dieselbe beschädigt. Er besteht aus einem Eisenkern mit einer Wicklung, die von dem Maschinenstrom durchflossen wird, durch dessen Wirkung der Schalter geschlossen wird. Sinkt die Stromstärke auf einen bestimmten Mindestwert, so wird durch den Zug einer Feder oder durch das Gewicht des Schalters die Ausschaltung bewirkt und der Stromkreis unterbrochen.

Der *Zellenschalter* dient dazu, während des Betriebes einer Batterie die Zahl der eingeschalteten Zellen zu verändern, da deren Spannung je nach Ladezustand und Stromstärke schwankt. Auf einer meist runden oder gradlinigen Gleitbahn (Abb. 366) sind Kontakte *a, b, c, d, e* angeordnet, welche durch breite Isolationsstücke voneinander getrennt sind. Die Kontakte stehen mit den Schaltzellen in Verbindung, die Schiene *i* und die erste Zelle mit den Sammelschienen oder dem Netz. Auf dem Schlitten *k* befindet sich eine Schleifbürste *f*, welche etwas schmäler ist als ein Isolationsstück. Damit beim Übergang von einem Kontakt zum anderen der Strom nicht unterbrochen wird, ist an ihr eine Nebenbürste *h* isoliert befestigt, welche durch einen Zwischenwiderstand *g* mit der Hauptbürste *f* verbunden ist. Meist befindet sich auf jeder Seite der Hauptbürste eine Nebenbürste mit Widerstand. Wird der Stromabnehmer auf eine andere Zelle gestellt, z. B. von *a* auf *b*, so schaltet zunächst *h* den Widerstand *g* vor diese Zelle und verbindet sie über *g* mit der Schiene *i*. Hierauf verläßt die Hauptbürste den Kontakt *a* und gelangt dann auf den Kontakt *b*.

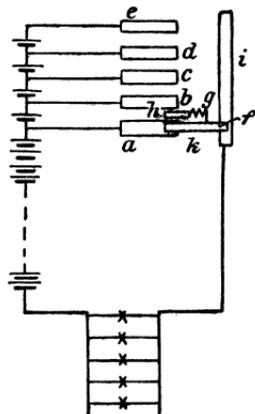


Abb. 366.
Einfach-Zellenschalter.

Der *Doppelzellenschalter* unterscheidet sich von dem einfachen Zellenschalter nur dadurch, daß auf der gleichen Kontaktbahn *a, b, c, d, e* zwei Schlitten oder Kontaktarme gleiten, von denen der eine mit der Stromzuleitung, der andere mit der Stromableitung verbunden ist. Will man nicht nur während der Entladung, sondern auch während der Ladung der Batterie Strom bei gleichbleibender Spannung entnehmen, so muß $\frac{1}{3}$ der Zellen einer Batterie zum Schalten eingerichtet sein. Verzichtet man auf den Strom während der Ladung, so genügt $\frac{1}{3}$. Bei Spannungsverlust muß für je 1,83 V eine weitere Zelle der Batterie zugeschaltet und an den Zellenschalter angeschlossen werden. Während der Entladekontakt des Zellenschalters nach der Höhe der verlangten Entladespannung eingestellt wird, dient der Ladekontakt lediglich dazu, die vorzeitig voll geladenen Schaltzellen abzuschalten.

Die Anordnung des Doppelzellenschalters muß so getroffen werden, daß man beide Bürsten auf denselben Kontakt stellen kann, da dies beim Übergang von Ladung auf Entladung erforderlich ist. Zum Schalten von Ladung auf Entladung wird ein Umschalter ohne Unterbrechung benutzt, wobei die beiden Kontaktarme des Doppelzellenschalters auf demselben Kontakt stehen müssen, da sonst bei Stellung auf verschiedenen Kontakten die Zellen zwischen diesen beiden kurzgeschlossen werden.

Die Größe der Zellen wird durch die aus der Batterie höchstens zu entnehmende Strommenge, die jedoch von der Entladezeit abhängig ist und durch die Höchststromstärke bestimmt (616).

B. Schaltungen. Je nach Art und Zweck einer Anlage wird die Schaltung bestimmt. Eine umfassende Zusammenstellung von wichtigen Schaltungsdiagrammen für Sammleranlagen siehe Taschenbuch der Accumulatoren-Fabrik Aktiengesellschaft, sowie Band 1 der Tafeln zum „Lehrgang der Schaltungsschemata elektrischer Starkstromanlagen“ von Teichmüller.

Nachstehend einige wichtige Schaltungen:

a) Zweileiter- Anlagen.

1. Ladung unter Spannungserhöhung der Maschine. Abb. 367a. Ladung in einer Reihe, eine Nebenschlußmaschine und Doppelzellenschalter. Strom kann während der Ladung abgegeben werden. Der Übergang von Ladung zu Entla-

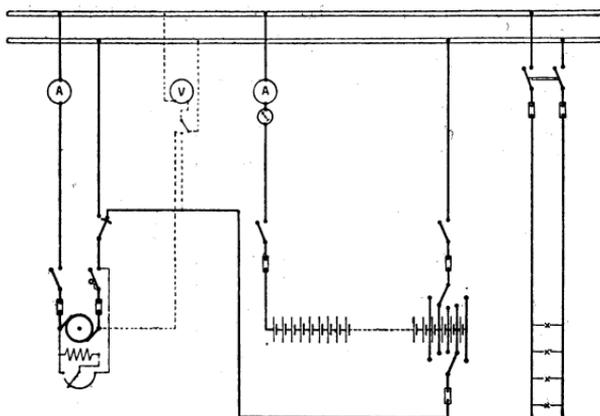


Abb. 367 a. Ladung unter Spannungserhöhung.

dung während des Betriebes erfolgt durch einen Umschalter ohne Unterbrechung. Gebräuchlichste Schaltung, wenn die Batterie im Verhältnis zur Maschine nicht zu klein ist.

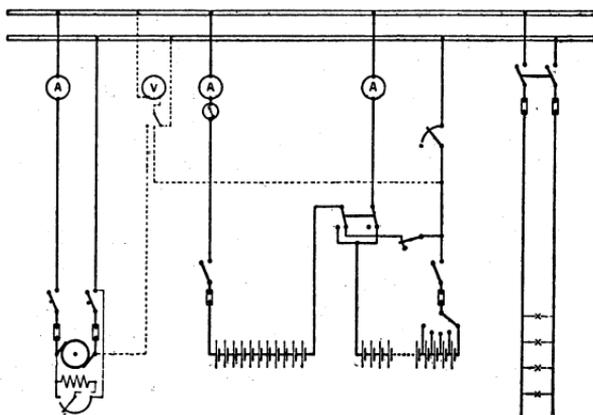


Abb. 367 b. Ladung in zwei Reihen.

2. Reihenschaltung (Abb. 367 b). Ladung in zwei Reihen, eine Nebenschlußmaschine und Einfachzellenschalter. — Micka-Schaltung (Abb. 367 c). Ladung von $\frac{1}{3}$ der Batterie in Reihe mit den unter sich parallel geschalteten anderen Dritteln mit Umschalter von Dr. P. Meyer.

3. Ladung in einer Reihe mit Zusatzmaschine (Abb. 367 d). Schaltung mit Zusatzmaschine und Doppelzellenschalter. Wird häufig benutzt, wenn die Batterie

im Verhältnis zur Maschine klein ist. Antrieb der Zusatzmaschine erfolgt meist durch Elektromotor.

b) Dreileiter-Anlagen. Da diese nur für große Anlagen, wie Elektrizitätswerke, Blockstationen verwendet werden und bei solchen, wo Strom fast immer zu jeder Zeit abgegeben werden muß, finden in der Regel Doppelzellen-

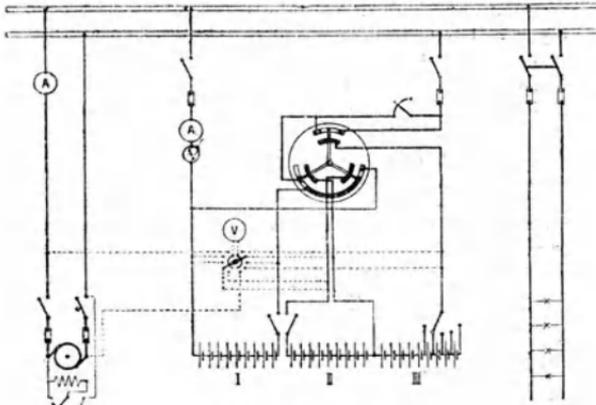
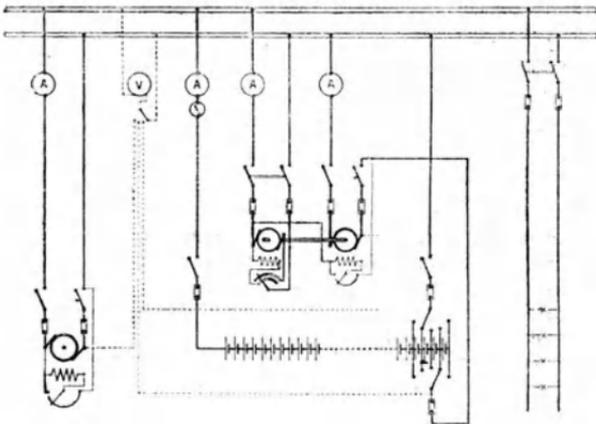


Abb. 367 c. Micka-Schaltung.

schalter Verwendung. Diese können sowohl in der Batteriemitte als auch an den Außenpolen angeordnet werden. Ersteres ist vorteilhaft, da die Spannung der stromführenden Teile der Zellschalter gegen Erde viel kleiner ist; ferner bei



Schaltung mit Zusatzmaschine, da dann nur eine benötigt wird, und schließlich, da die Gesamtspannung der Batterie während der Ladung nicht über die normale Batteriespannung steigt. Die Anordnung an den Außenpolen bietet dagegen bei Doppelzellschaltern den Vorteil, daß eine höhere Netzspannung für entferntere Speisepunkte mit Hilfe der Ladeschalter erhalten werden kann.

Es ist entweder für jede Dreileiter-Hälfte eine Dynamomaschine angeordnet (z. B. Abb. 368 a, Dreileiterschaltung mit zwei hintereinander geschalteten Nebenschlußmaschinen und zwei innenliegenden Doppelzellenschaltern) oder nur eine Maschine von doppelter Leistung und Spannung, welche direkt auf die Außenleiter arbeitet. Im letzteren Falle erfolgt die Spannungsteilung meist durch die Batterie allein. Da dieselbe den Ausgleichstrom für den Mittelleiter liefern muß, wird im allgemeinen die eine Batteriehälfte mehr entladen, als die andere und bei der Ladung wird diese Hälfte hinter der anderen zurückbleiben. Um diesen Ausgleichstrom möglichst niedrig zu halten, belastet man die beiden Netzhälften tunlichst gleich und richtet einige Anschlüsse umschaltbar ein. Die Nachladung der einen Batteriehälfte kann mit der Hauptmaschine bewirkt werden; da die Spannung einer Batteriehälfte gegen Schluß der Ladung etwa $\frac{2}{3}$ der normalen Spannung an den Außenleitern ist, so wird die Maschine bis auf diese Spannung geregelt. Ist eine Zusatzmaschine vorhanden, so kann man diese zur Erzeugung des

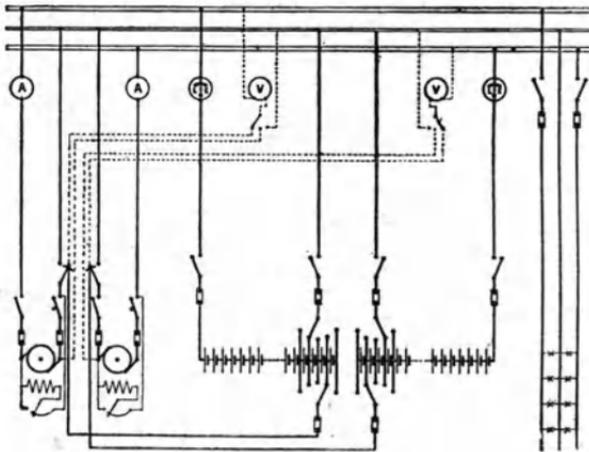


Abb. 368 a. Ladeschaltung mit zwei in Reihe geschalteten Nebenschlußmaschinen und zwei innenliegenden Doppelzellenschaltern.

Ausgleichstromes verwenden; diese Maschine muß ihre Spannung auf die Hälfte der Außenleiterspannung erhöhen können, weil sie die Zellschalterelemente beider Batterien gleichzeitig zu laden hat; man kann daher die Zusatzmaschine während der Entladung zur stärker belasteten Batteriehälfte parallel schalten.

Schließlich kann man auch zur Erzeugung des Ausgleichstromes sogenannte Ausgleichmaschinen verwenden, die aus einem Paar gekuppelter Motoren bestehen, von denen der erste an die eine und der zweite an die andere Netzhälfte geschaltet wird. Die Maschine, welche in die weniger stark belastete Netzhälfte eingeschaltet wird, wirkt als Motor, die andere als Generator. Es wird also einer Netzhälfte Strom entnommen und an die andere abgegeben. Die beiden Motoren können zum Antrieb der Zusatzmaschine dienen. Die Leistung eines jeden Motors muß größer sein, als die halbe Leistung der Zusatzmaschine. Der Antrieb der Zusatzmaschinen mit zwei Motoren gestattet die Verwendung von Einfachzellenschaltern bei Dynamomaschinen, welche nur auf die Außenleiter arbeiten, da die beiden hintereinander geschalteten und mit dem Mittelleiter verbundenen Motoren während der Ladung, bei der die Batterie vom Netz abgeschaltet werden muß, den Ausgleich im Mittelleiter selbsttätig bewirken.

Zwei andere Schaltungen zeigen Abb. 368 b und 368 c.

c) Anschlußbatterien werden die Batterien in solchen Anlagen genannt, welche im Anschluß an ein Gleichstrom-Verteilungsnetz von größeren Strom-

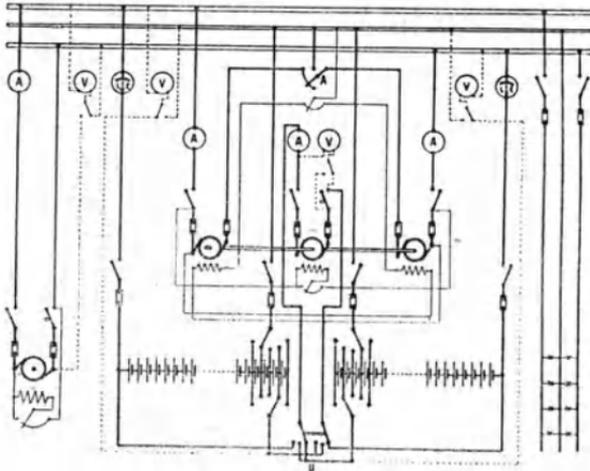


Abb. 368 b. Ladeschaltung mit einer Nebenschlußmaschine, einer Zusatzmaschine und zwei innenliegenden Doppelzellenschaltern.

abnehmern errichtet werden. Sie werden während der Zeit der Höchstbelastung des Elektrizitätswerkes entladen und außerhalb dieser Zeit wieder geladen. Der Ab-

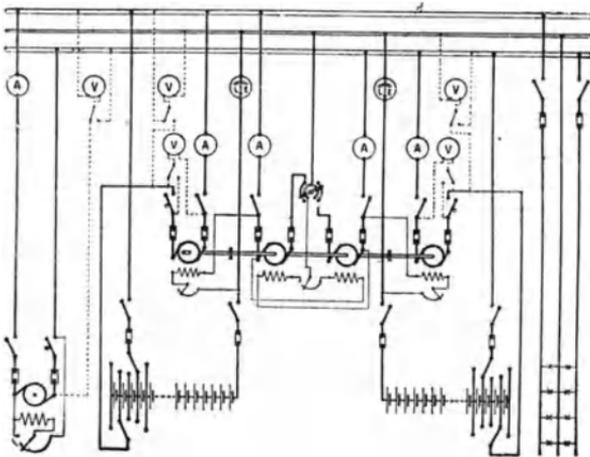


Abb. 368 c. Ladeschaltung mit einer Nebenschlußmaschine, zwei Zusatzmaschinen und zwei außenliegenden Doppelzellenschaltern.

nehmer belastet das Elektrizitätswerk somit nur außerhalb des Höchstbedarfs und erhält daher den Strom zu einem wesentlich niedrigeren Tarife. Das Schalt-

bild einer derartigen Anlage ist in Abb. 369 dargestellt. Darin bedeutet *BZ* den „Bruttozähler“, der die gesamte dem Netz entnommene Arbeit mißt, *LZ* den Ladezähler, der den in die Batterie geladenen, und *EZ* den Entladezähler, der den aus ihr entnommenen Strom registriert. Zwischen den Zählern liegen zwei Umschalter *a*, *d*, die bei Ladung auf *L*, bei Entladung auf *E* gestellt werden. *D* ist eine Zusatzdynamo, *M* der sie antreibende Motor. Der über *M* und *D* gezeichnete Hauptumschalter hat vier Stellungen: *E* für Entladung, *L* für Ladung der ganzen Batterie, wobei die Dynamo *D* zwischen die beiden Batteriehälften geschaltet ist, *N+* und *N-* für die Nachladung der einzelnen Batteriehälften. Je zwei Strom- und Spannungsmesser mit Umschaltern dienen zur Kontrolle der Vorgänge in der Batterie. (Die Ziffern und Buchstaben an den Umschaltern und im Schaltbild bezeichnen die miteinander durch Meßleitungen verbundenen Punkte.) Ein Kontrollapparat *CA* stellt die Betriebszeit fest.

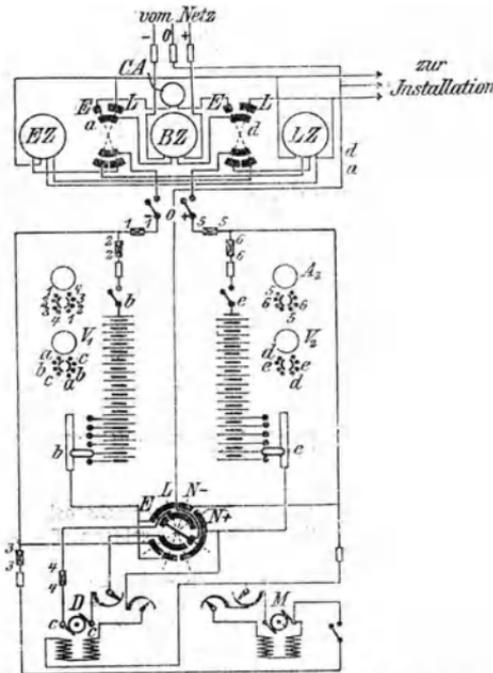


Abb. 369. Schaltung einer Anschlußbatterie.

Da die Spannung der Pufferbatterien im Verlauf der nur kurz dauernden Stromstöße bzw. Änderungen der Stromstärke nur unbedeutend schwankt, sind Zellschalter nicht erforderlich. Falls die Spannung der Maschine bis auf die volle Ladespannung gesteigert werden kann, sind an Apparaten nur erforderlich: ein für Ladung und Entladung nach verschiedenen Seiten ausschlagender Strommesser, ein Spannungsmesser, zwei Abschmelzsicherungen und zwei Ausschalter. Kann die Spannung der Maschine nicht gesteigert werden oder ist eine Erhöhung der Spannung an den Sammelschienen nicht erwünscht, so ist eine Zusatzmaschine zu verwenden. Legt man diese in den geerdeten negativen Pol, so genügt in bezug auf Isolation eine gewöhnliche Lichtmaschine, die auch zur Beleuchtung mitbenutzt werden kann. Am meisten wird als selbsttätige Zusatzmaschine die Pirani- und die Lancashire-Maschine benutzt. Die Pirani-Maschine besitzt zwei Feldwicklungen, deren eine an die Batterie angeschlossen ist, und deren andere vom Netzstrom durchflossen wird. Sie wirken einander entgegen und sind so eingestellt, daß sie sich bei mittlerem Netzstrom aufheben. Damit ist die Zusatzmaschine ohne Spannung und die Batterie, deren Spannung der mittleren Netzspannung entspricht, ist stromlos. Steigt der Verbrauch, so überwiegt die Netzstromwicklung und die Maschine erhält eine dem Mehrverbrauch

(671) Pufferung. Pufferbatterien (788) dienen zum Ausgleich plötzlicher Stromschwankungen für Straßenbahnen sowie für andere Betriebe mit stark schwankender Belastung, z. B. Kranantrieb, Förder- und Walzwerkmaschinen.

entsprechende Spannung, die sich zur Batteriespannung addiert, so daß die Batterie entladen wird. Bei geringer Netzbelastung überwiegt die andere Wicklung; die Zusatzspannung wirkt der entstehenden Batteriespannung entgegen und es erfolgt Ladung (Abb. 370 a, Piranische Schaltung). Meist wird eine besondere Erregermaschine angeordnet, welche die beiden Wicklungen erhält. Ein Regelungswiderstand im Erregerstromkreis der Zusatzmaschine ermöglicht nach Bedarf den

Grad der Pufferung einzustellen. Einer Änderung des mittleren Stromverbrauchs im Netz kann durch Einstellung eines Widerstandes im Stromkreis der an die Batterie angeschlossenen Wicklung Rechnung getragen werden. Letzterer Zweck kann auch durch Einstellung eines parallel zur Hauptstromwicklung liegenden Widerstandes erreicht werden, der vielfach angeordnet wird, um nicht den ganzen Netzstrom über die Magnete der Erregungsmaschine zu führen. Bei der Lancashire-

Maschine wird die Hauptstromwicklung nicht vom Netzstrom, sondern vom Maschinenstrom bzw. einem Teil desselben durchflossen (Abb. 370b). Die andere Wicklung ist an die Netzspannung angeschlossen und eine dritte Wicklung an den Klemmen der Zusatzmaschine. Bei mittlerem Netzverbrauch heben sich die beiden ersten Wicklungen auf, so daß die Maschine spannungslos ist und die Batterie keinen Strom abgibt oder aufnimmt. Steigt der Netzverbrauch, so gibt die Zusatzmaschine die zur Entladung der Batterie nötige Spannung.

Pufferung bei Wechselstrom. Auch für Wechselstromanlagen sind mehrfach Ausgleich- und Puffer-Batterien zur Anwendung gekommen. Für solche müssen besondere Schaltungen vorgesehen und besondere Hilfsmaschinen aufgestellt werden, die in dem „Pufferschaltungsbuch für Wechselstrom“ der Accumulatoren-Fabrik Aktiengesellschaft eingehend dargestellt sind. Abb. 370c stellt

die Grundlage der Schröderschen Schaltung dar (DRP 161 805). *G* ist der Generator, welcher die Drehstromsammelschienen *BC* mit Strom versorgt. Die Gleichstromseite *P* des Motorgenerators *MP* ist an die Batterie *A* angeschlossen. Damit bei wechselnder Belastung des Netzes die Batterie genügend eingreift, um die erstrebte Gleichmäßigkeit der Beanspruchung des Generators zu erreichen, ist

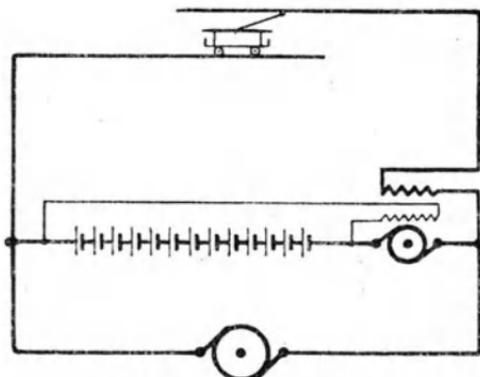


Abb. 370 a. Piranische Schaltung.

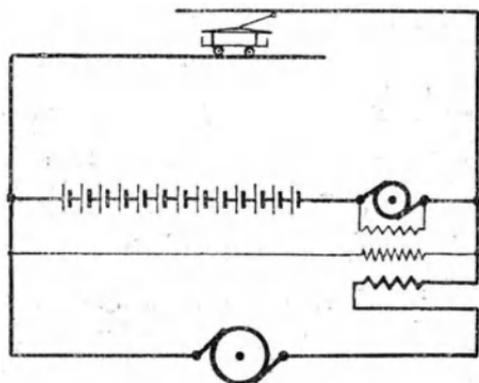


Abb. 370 b. Lancashire-Schaltung.

folgende Einrichtung vorgesehen: In der Netzleitung liegt der Reihentransformator T , dessen Sekundärstrom durch den Einankerumformer R gleichgerichtet wird. Der von letzterem kommende Gleichstrom ist annähernd proportional dem Netzstrom und wird zum Regeln der Zusatzmaschine Z benutzt, indem er durch ihre Magnetwirkung $a b$ geht. Eine zweite Wicklung der Zusatzmaschine $c d$ wird von der Batterie gespeist. Beide Wicklungen wirken einander entgegen, so daß sie sich

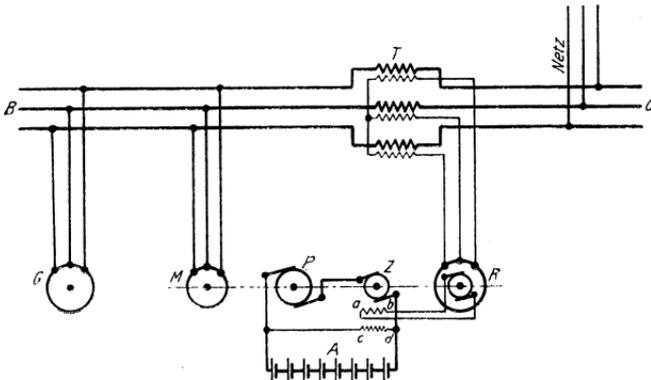


Abb. 370c. Schrödersche Schaltung.

bei mittlerer Belastung des Netzes aufheben, wodurch die Zusatzmaschine spannungslos und die Batterie stromlos wird. Bei größerem Bedarf im Netz überwiegt die Wicklung $a b$, so daß die Zusatzmaschine Spannung zur Entladung der Batterie liefert. Die Batterie treibt dann die Gleichstromseite des Motorgenerators an, so daß die Wechselstromseite M Strom in das Netz abgibt. Umgekehrt wird bei schwacher Netzbelastung die Batterie geladen. Als Regelungsdynamo verwendet man vorteilhaft statt des Einankerumformers R einen Danielsonschen Umformer.

Die Erwärmung der Leitungen.

(672) **Allgemeines.** Die in einer vom Strome I durchflossenen Leitung entwickelte Wärme ist bekanntlich $0,24 I^2 \cdot l \rho \cdot t / q$ cal (72). Erfolgt die Wärmeabgabe auf der ganzen betrachteten Länge l nach demselben Gesetze und im selben Maße und ist ein stationärer Zustand erreicht, so daß in jedem Zeiteilchen die Wärmeabfuhr gleich der Wärmezufuhr ist, und nimmt man mit Newton an, daß die Wärmeabgabe proportional dem Drahtumfang, der Zeit und der Temperaturerhöhung $\Delta \theta$ der Drahtoberfläche gegenüber der Umgebung sei, so ergibt sich $I^2 \cdot \rho = \text{const. } d^3 \cdot \Delta \theta$. Diese Formel galt lange Zeit für Leitungen aller Art als richtig. Genaue Untersuchungen forderten, daß die Verschiedenartigkeit in der Bauart und der Verlegung der Leitungen und die Verschiedenartigkeit der Wärmeabgabe berücksichtigt werde.

(673) **Leitungen für Hausinstalltionen.** Bei den in ruhiger Luft (in geschlossenen Räumen) verlegten Leitungen findet die Wärmeabgabe hauptsächlich durch Konvektion, d. h. durch Bewegung der erwärmten Luftteilchen, statt. Sie ist dann nicht mehr proportional der Oberfläche, sondern bei dünnen Drähten unabhängig vom Durchmesser und erst bei stärkeren diesem proportional, so daß sich für mittlere Querschnitte die Formel

$$I^2 = \Delta \theta (c_1 q + c_2 q^3 / d)$$

ergibt¹⁾. Ausführliche Untersuchungen von Teichmüller und Humann haben ergeben²⁾, daß diese Formel für mannigfaltige Bauarten und Verlegungs-

¹⁾ Über die Ableitung dieser Gleichung siehe Teichmüller: Die Erwärmung der elektrischen Leitungen. Stuttgart 1905.

²⁾ ETZ 1907, S. 475.

arten gilt. Für Gummiaderdoppelleitungen aus Kupfer, die in Isolierrohren unter Putz verlegt sind, sind die Konstanten $c_1 = 4,0$; $c_2 = 1,7$, für offen auf Isolierrollen verlegte $c_1 = 10$; $c_2 = 2,1$. Der VDE hat ¹⁾ eine Temperaturerhöhung von $\Delta\theta = 20^\circ\text{C}$ für zulässig erachtet und die Leitungen bis einschließlich 10 mm^2 nur so zu belasten gestattet, als ob sie immer als Gummiaderdoppelleitungen in Isolierrohren unter Putz verlegt seien. Von 16 mm^2 an ist die stärkere Belastung der offen auf Isolierrollen verlegten Gummiaderleitungen zugelassen. Werden die Leitungen durch Abschmelzsicherungen geschützt, so muß die Nennstromstärke dieser Sicherungen um 20% niedriger gesetzt werden, weil von ihnen durch Verbandsvorschriften verlangt wird, daß sie das 1,25fache ihrer Nennstromstärke dauernd ertragen können. Bei den dünnen Leitungen ist die Nennstromstärke noch etwas niedriger gehalten. Diese Überlegungen und die Rechnungen mit der genannten Formel führen zu folgender Belastungstabelle für Kupferleitungen:

Querschnitt in mm^2	Installationsleitungen in geschlossenen Räumen		Querschnitt in mm^2	Installationsleitungen in geschlossenen Räumen	
	Höchstzulässige Stromstärke	Nennstrom der Abschmelz- sicherungen		Höchstzulässige Stromstärke	Nennstrom der Abschmelz- sicherungen
0,5	7,5	6	70	200	160
0,75	9	6	95	240	190
1	11	6	120	280	225
1,5	14	10	150	325	260
2,5	20	15	185	380	300
4	25	20	240	450	360
6	31	25	310	540	430
10	43	35	400	640	500
16	75	60	500	760	600
25	100	80	625	880	700
35	125	100	800	1050	850
50	160	125	1000	1250	1000

Ist das Leitermetall nicht Kupfer, so sind die zulässigen Belastungsströme nach der Formel

$$I_M = I_K \sqrt{\frac{\rho_K}{\rho_M}}$$

zu berechnen, worin I_K der aus der Tabelle entnommene Belastungsstrom einer Kupferleitung, ρ_K der spezifische Widerstand des Kupfers, ρ_M der des anderen Metalles, I_M der für das andere Metall zulässige Belastungsstrom ist. Die wichtigsten spezifischen Widerstände sind

$$\begin{aligned} \text{von Aluminium } \rho_A &= 0,03, \\ \text{von Eisen } \rho_E &= 0,143, \end{aligned}$$

woraus sich als Belastungsströme für Aluminium- und für Eisenleitungen ergeben

$$I_A = 0,77 I_K \qquad I_E = 0,35 I_K.$$

Benutzt man als Sicherungen Selbstschalter, so dürfen diese auf die zulässige Höchststromstärke eingestellt werden.

(674) Unterirdisch verlegte Kabel. Bei Leitungskabeln sind die metallenen Leiter von mehreren Hüllen umgeben, die teils zur elektrischen Isolierung, teils zum Schutze gegen Feuchtigkeit und chemische Angriffe, teils zum Schutze gegen mechanische Verletzungen dienen. Die Zahl der Leiter innerhalb eines Kabels

¹⁾ Siehe Passavant: Erläuterungen; ETZ 1907, S. 499 und die Berichtigung S. 544.

kann $\nu = 1$ bis $\nu = 3$ oder auch noch größer sein. Durch alle Umhüllungen tritt die in den Leitern entwickelte Wärmemenge nur durch Wärmeleitung hindurch: Auch durch die Erdbodenschicht — Kabel werden meist im Erdboden, und zwar im allgemeinen $h = 70$ cm tief verlegt — wird die Wärme auf diese Weise abgeführt. Diese Wärmeleitung geht nach dem von *Fourier* aufgestellten Gesetze vor sich, das, dem *Ohm* schen Gesetze vergleichbar, für mehrere hintereinander geschaltete Wärmewiderstände W die Form

$$\Delta \theta = N \cdot \Sigma W$$

hat, worin N die Leistung (Intensität der Wärmeströmung) ist. Man kann annehmen, daß die Temperaturerhöhung von der Leiteroberfläche bis zur Erdbodenoberfläche völlig ausgeglichen ist. Dann besteht ΣW aus zwei Gruppen von Gliedern: den Widerständen der Kabelhülle und dem des Erdbodens. Die ersteren lassen sich bei einem Einleiterkabel in der Weise zusammenfassen, daß man an Stelle des äußeren Durchmessers d_a des wahren Kabels einen „reduzierten“ Durchmesser von einer solchen Größe d'_a setzt, daß die mit dem Isolierstoffe ausgefüllte Röhre vom äußeren Durchmesser d'_a und dem inneren Durchmesser d_i des Leiters denselben Wärmewiderstand W_k hat wie das wahre Kabel mit seinen mehreren verschiedenen Umhüllungen. Über die Art der Reduktion siehe *Teichmüller*: „Die Erwärmung der elektrischen Leitungen“, Stuttgart 1905, S. 46. Auch für konzentrische Mehrleiterkabel lassen sich solche reduzierten Durchmesser berechnen. Für verseilte Mehrleiterkabel muß außerdem noch der innere Durchmesser reduziert werden, wobei die zwei oder drei Leiter durch einen einzigen vom Querschnittsdurchmesser = d'_i ersetzt sind¹⁾. Weitere Rechnungen ergeben, daß die einseitig durch eine Ebene begrenzte Erdbodenschicht durch eine zylindrische Schicht vom Durchmesser der vierfachen Verlegungstiefe des Kabels $4h$ ersetzt werden kann. Auf diese Weise entsteht schließlich die Formel

$$I = \frac{C}{\sqrt{\nu \cdot \rho}} \sqrt{\frac{q \cdot \Delta \theta}{\sigma_k \log \frac{d'_a}{d'_i} + \sigma_n \log \frac{4h}{d_a}}}$$

worin σ_k und σ_n die spezifischen Wärmewiderstände der Kabelisolier- und Packungsstoffe und des Erdbodens sind, während q der Querschnitt des einen oder eines der mehreren Leiter des Kabels ist. Für die spezifischen Wärmewiderstände haben Untersuchungen von *Teichmüller* und *Humann* (*ETZ* 1906, S. 579) die mittleren Werte $\sigma_k = 550$, $\sigma_n = 40$ ergeben. Nach der so gestalteten und durch zahlreiche Messungen bestätigten Formel sind die Belastungstabellen des VDE berechnet worden (*ETZ* 1907, S. 500), und zwar unter Zugrundelegung einer Temperaturerhöhung von $\Delta \theta = 25^\circ \text{C}$ und einer Verlegungstiefe $h = 70$ cm. Ein Bild von der Größe der zulässigen Belastungsströme gibt die folgende Zahlentafel:

	Querschnitt in mm ²				
	10	25	50	120	240
Hausinstallationsleitungen . .	43	100	160	280	450
Einleiterkabel	95	170	260	450	670
Verseilte Dreileiterkabel . . .	65	110	165	280	420
Konzentrische Dreileiterkabel .	55	100	150	255	385

Die Mehrleiterkabel in dieser Tafel sind für höchstens 3 kV geeignet. Kabel für 10 kV dürfen nur mit einem etwas niedrigeren Strom belastet werden. — Sind mehr als zwei Kabel verlegt, oder liegen sonstige ungünstige Umstände vor, so muß die Stromstärke um 25% vermindert werden.

¹⁾ Siehe *Mie*: „Über die Wärmeleitung in einem verseilten Kabel“. *ETZ* 1905, S. 137, und *Teichmüller*: a. a. O.

Für Freileitungen sind noch keine wissenschaftlich begründeten Formeln aufgestellt. Man kann sie etwa wie Einleiterkabel belasten.

Wenn für Wechselstromleitungen Eisendraht verwendet wird, so erhöht sich der Widerstand und damit die Wärmeentwicklung durch die sogenannte Hautwirkung. Näheres hierüber siehe (121).

Schutzschaltungen zur selbsttätigen Ausschaltung von Kabelstrecken, deren Isolation schadhaft ist, siehe (281) und Teichmüller, Lehrgang der Schaltungsschemata, Bd. 2, 2. Aufl., 1925.

Wirtschaftlichkeit der Leitungen.

(675) Wirtschaftlich günstigste Stromdichte und Spannung. Der in der ersten Grundgröße genannte Arbeitsverlust $a = \alpha A$ ist, wenn eine Zweileiteranlage vom Gesamtwiderstande R der Leitung angenommen wird,

$$a = I^2 R t$$

worin I der unveränderliche zu übertragende Strom ist. Um ihn zu bezahlen, sind, wenn m_b die Kosten für 1 kWh, etwa in Mark, sind, $k'_v = I^2 R t m_b$ Mark aufzuwenden. Dazu treten die Kosten, die zur Vergrößerung des Kraftwerks geleistet werden müssen, natürlich nicht als einmalige Ausgaben, sondern in ihrem dauernden Betrage während der Zeit t . Ist diese Zeit 1 Jahr und werden die Kosten für Verzinsung, Tilgung und Instandhaltung des Kraftwerks in der Höhe von p_o , nämlich 100 p_o vH, ebenfalls auf 1 Jahr bezogen, so sind die gemeinten Kosten $k''_v = I^2 R m_o \cdot p_o$ Mark, wobei m_o die Kosten des Kraftwerks für 1 W sind. Die gesamten Kosten sind also im Jahre

$$k_v = I^2 \cdot \frac{l}{q} \cdot 2 q \cdot (m_b t + m_o p_o)$$

Daß im 1. Gliede die Zeit ausdrücklich als Faktor erscheint, im 2. dagegen stillschweigend als die eines Jahres angenommen wird, hat seine Berechtigung darin, daß in p_o diese Zeit enthalten ist, und seinen besonderen Grund darin, daß man mit einer Veränderlichkeit des Stromes im Laufe des Jahres rechnen muß und deshalb an Stelle der Jahresdauer t (= 8760 Stunden) die sogenannte Zeit der vollen Leistungsverluste

$$T = \int \left(\frac{i}{I} \right)^2 dt$$

setzt. Hierin ist i der veränderliche, I ein ausgezeichneteter, nämlich der tatsächliche Höchststrom, der für die Erwärmung und die Spannungsschwankungen maßgeblich ist, wie er schon im obigen Ausdruck für k_v vorkommt. — Die Leitung kostet während des Jahres

$$k_l = (a + b q) \cdot 2 l \cdot p_l \text{ Mark}$$

wenn $a + b q$ die Kosten der Leitung bezogen auf 1 m Übertragungsentfernung und p_l der Prozentsatz für Verzinsung, Tilgung und Instandhaltung der Leitungsanlage ist. Die Gesamtkosten $k_v + k_l$ sollen nun ein Minimum werden. Das tritt, wie die Differentiation nach q zeigt, dann ein, wenn

$$q = I \cdot \sqrt{\frac{m_b T + m_o p_o}{b p_l}} \cdot p$$

ist. Hochenegg, dem wir die elegante Lösung dieser Aufgabe verdanken¹⁾ — nachdem William Thomson die erste Lösung gegeben hatte²⁾ — nennt

$$Z_l = \sqrt{\frac{b p_l}{q}} \quad \text{die Leitungszahl}$$

¹⁾ Z. f. El. 1887, S. 11.

²⁾ Rep. of Br. Ass. 1881, S. 526.

und

$$Z_b = \sqrt{m_o T + m_o p_o} \quad \text{die Betriebszahl}$$

und schließt dann aus der Formel, daß das Kostenminimum dann eintritt, wenn die Stromdichte den wirtschaftlich günstigsten Wert

$$j_w = \frac{Z_l}{Z_b}$$

hat. Die Formel setzt einen bekannten Strom I , also für die gegebene Leistung N eine bekannte Spannung U voraus.

Steht die Wahl der Spannung noch offen, so wird man durch Rechnung nur dann zum Ziele kommen¹⁾, wenn man die Anlagekosten als Funktion der Spannung in die Formeln einführen kann. Da das im allgemeinen nicht möglich ist, so muß man so verfahren, daß man die wirtschaftliche Stromdichte für verschiedene Spannungen berechnet, mit ihrer Hilfe die jährlichen Kosten ausrechnet und dann die Spannung wählt, für die die Kosten ein absolutes Minimum ergeben. Auf diese Weise liefert die Berechnung auf Wirtschaftlichkeit gleichzeitig die günstigste Spannung für die Anlage.

Die Formel gilt zunächst nur für den Fall, daß eine Leitung nur an ihrem Ende belastet, also ihrer ganzen Länge nach vom Strome I durchflossen ist. Soll die Energie über eine Strecke oder auch über eine Fläche hin (wobei dann Verzweigungen und unter Umständen Netze nötig sind) verteilt werden, so ist erst festzustellen, wie die Querschnitte am günstigsten abzustufen sind. Die Rechnung ergibt²⁾, daß die Stromdichte konstant sein muß. Als diese konstante Stromdichte wählt man selbstverständlich die wirtschaftliche, die nach der obigen Formel berechnet ist. Es genügt dazu, das erste Leitungsstück, vom Kraftwerke aus gesehen, ins Auge zu fassen und j_w für dieses zu berechnen.

Die Berechnung auf Wirtschaftlichkeit hat sich nicht durchzusetzen vermocht. Vielmehr pflegt man, wo man mit ähnlichen Zielen zu rechnen strebt, Stichrechnungen zu machen, die ergeben sollen, mit welchem geringsten Kostenaufwande sich die Anlage herstellen läßt. Eine solche Anlage wird aber im allgemeinen durchaus nicht am wirtschaftlichsten arbeiten. Rechnungen der in groben Zügen hier entwickelten Art sind deshalb entschieden vorzuziehen. Wenn man genau rechnen und alle Umstände berücksichtigen will, wird die Rechnung allerdings sehr umständlich. W. Meyer³⁾ gibt wertvolle Fingerzeige.

In den Berechnungsformeln erscheint, wie wir gesehen haben, die Grundgröße α als solche nicht. Und doch bildet sie die Grundlage der Berechnung auf Wirtschaftlichkeit, insofern das Rechnungsergebnis den wirtschaftlich günstigsten Arbeitsverlust und damit wirtschaftlich größten Arbeitswirkungsgrad liefert.

Aus der Buchliteratur über elektrische Leitungen:

Herzog u. Eeldmann. Die Berechnung elektr. Leitungsnetze in Theorie u. Praxis, 3. Aufl. Berlin 1921, Julius Springer. — Soschinski, Berechnung von Leitungsnetzen. Aus Heinkes Handbuch der Elektrotechnik, 6. Bd., 3. Abt. Leipzig 1906. S. Hirzel. — Teichmüller, Die elektr. Leitungen. Stuttgart 1899. Ferd. Enke. — Ders., Die Erwärmung der elektr. Leitungen. Stuttgart 1905. Ferd. Enke. — Ders., Die Berechnung d. elektr. Leitungen auf neuer Grundlage. (Im Selbstverlag des Verf. 1921.) — F. W. Meyer, Die Berechnung elektr. Anlagen auf wirtschaftl. Grundlagen. Berlin 1908. Julius Springer. — G. Roebler, Die Fernleitung von Wechselströmen. Berlin 1905. Julius Springer.

Ausführung von Anlagen im einzelnen.

(676) Errichtungsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

Die praktischen Erfahrungen auf dem Gebiete der Installationstechnik sind in den vom VDE herausgegebenen Errichtungsvorschriften niedergelegt, mit deren

¹⁾ Teichmüller: ETZ 1902, S. 190.

²⁾ Siehe Hermann Cahen: „Die Berechnung elektrischer Kraftverteilungsnetze“.

³⁾ W. Meyer: „Die Berechnung elektrischer Anlagen auf wirtschaftlichen Grundlagen“. Berlin 1908.

weiterem Ausbau ein ständiger Ausschub des VDE beschäftigt ist. — Neben den Vorschriften selbst werden ausführliche Erläuterungen¹⁾ herausgegeben. Eine wichtige Ergänzung der Errichtungsvorschriften bilden die ebenfalls vom VDE herausgegebenen *Normalien und Prüfungsvorschriften*. Während die behördliche anerkannten Errichtungsvorschriften ihrer Natur nach vorwiegend grundsätzliche Forderungen enthalten, ohne allzusehr in die Einzelheiten zu gehen, sollen die Normalien, dem jeweiligen Stand der Technik entsprechend, veränderlich und ausbaufähig sein.

Die Verbandsvorschriften behandeln Anlagen für Niederspannung und für Hochspannung. Hochspannungsanlagen erfordern in Anbetracht der mit ihrem Betrieb verbundenen induktiven und kapazitiven Erscheinungen und Vorgängen und in Anbetracht der Gefährlichkeit hochgespannter Ströme fast immer eine besonders eingehende technische Bearbeitung.

(677) Gefahren und deren Verhütung. Eine sachgemäße Installation hat im wesentlichen zu berücksichtigen die Feuersgefahr und die Einwirkung der Elektrizität auf den Organismus, wenn bei fahrlässiger oder zufälliger Berührung unter Spannung stehender Leiter oder Teile von Apparaten der Strom seinen Weg durch den menschlichen Körper nimmt. Feuersgefahr kann eintreten durch übermäßige Erwärmung der Leitungen oder Apparate durch den elektrischen Strom bei Eintritt eines Fehlers, wie Erdschluß oder Kurzschluß. Hiergegen bieten in Niederspannungsanlagen die Schmelzsicherungen und in Hochspannungsanlagen die selbsttätigen Höchststromschalter ein durchaus zuverlässiges Mittel, besonders, wenn die Anlage so angeordnet ist, daß ein etwaiger Isolationsfehler rasch zum Kurzschluß führt, so daß die fehlerhafte Leitung abgeschaltet wird.

Wenngleich die physiologischen Wirkungen niedrig gespannter Ströme im allgemeinen nicht gefährlich sind, so kann unter besonders ungünstigen Verhältnissen, wenn dem Stromdurchgang durch den menschlichen Körper ein geringer Widerstand geboten wird (Arbeiten in feuchten Räumen, Anfassen unter Spannung stehender Teile mit voller, feuchter Handfläche usw.) doch Gefahr bestehen. Der neuzeitliche Apparatebau strebt deshalb dahin, daß alle Teile, soweit sie unter Spannung stehen, der Berührung entzogen werden. In Hochspannungsanlagen müssen außerdem sämtliche an der Stromleitung unbeteiligte Metallteile geerdet sein, so z. B. die Gerüste der Schaltanlagen, die Handräder der Ölschalter, die Stützen der Isolatoren. Der Zweck der Erdung dieser Teile besteht darin, die Entstehung eines Spannungszustandes zwischen ihnen und der Erde unmöglich zu machen, so daß ein auf der Erde stehender Mensch sie ohne Gefahr berühren kann.

Kabelleitungen.

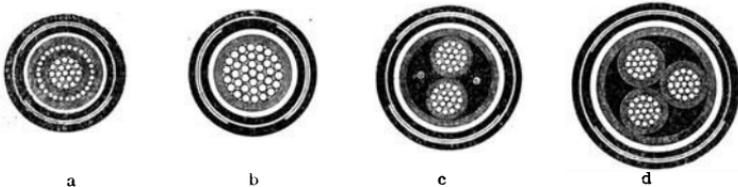
(678) Verlegungsarten. Bei Verlegung von Starkstromleitungen in dem Erdboden sind diese gegen chemische und mechanische Einflüsse zu schützen. Hierfür finden vorwiegend bandarmierte Bleikabel (679) Verwendung, die, sofern nicht besonders ungünstige Verhältnisse vorliegen, oder bei Erdarbeiten rücksichtslos mit der Pickel gearbeitet wird, vollständigen Schutz bieten; von der Verwendung weniger gut geschützter Kabel ohne Bewehrung ist abzuraten, da chemische Einflüsse fast nie ganz ausgeschlossen werden können, und überdies ein gewisser mechanischer Schutz, wofür ein Bleimantel allein nicht ausreicht, immer notwendig ist.

Kabelleitungen werden im allgemeinen mindestens 60 cm tief in das Erdreich verlegt; bei größeren Verteilungsnetzen kommen meistens die Verteilungsleitungen zu oberst zu liegen, da von diesen die Hausanschlüsse abzweigt werden, darunter liegen die Speisekabel, welche nur im Falle einer Störung oder Untersuchung

¹⁾ C. L. Weber, Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften für die Errichtung elektrischer Starkstromanlagen. Berlin: Julius Springer.

aufgenommen zu werden brauchen. Da jede Unterbrechungsstelle den Zustand der Gesamtleitung beeinträchtigt, sind Muffenverbindungen nach Möglichkeit zu vermeiden und möglichst große Kabellängen zu verwenden.

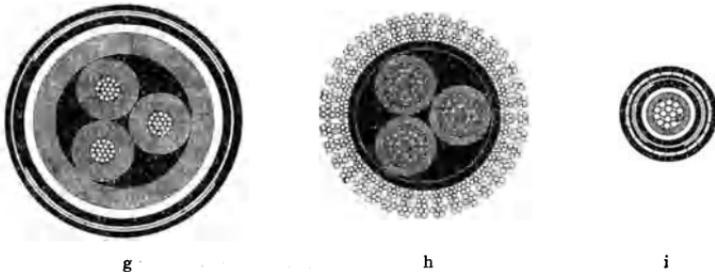
Nach der Verlegung schützt man häufig die Kabel noch durch Decksteine, Zementpanzer oder dgl.



- a Einadriges Bleikabel mit Eisenbandbewehrung.
 b Konzentrisches Zweileiterbleikabel mit Eisenbandbewehrung.
 c Verseilt es zweiseitiges eisenbandbewehrtes Bleikabel mit Prüfdrähten.
 d Verseilt es dreiseitiges bandbewehrtes Bleikabel.



- e Verseilt es dreiseitiges Bleikabel mit Bewehrung von flachen Eisendrähnen.
 f Verseilt es Drehstromkabel mit Leitern von sektorförmigem Querschnitt mit Bleimantel und Bewehrung von runden Stahldrähnen.



- g Verseilt es Drehstrom-Hochspannungskabel mit Bleimantel und Eisenbandbewehrung.
 h Drehstrom-Schachtkabel mit Bewehrung von litzenförmigen Eisendrähnen.
 i Einadriges Flußkabel mit Bleimantel und doppelter Bewehrung aus Eisenband und Flachdrähnen.

Abb. 371. Kabelquerschnitte.

Mit der Verlegung unterirdischer Leitungen in Kanälen (Moniersystem) hat man keine günstigen Erfahrungen gemacht, da die Kanäle schwer vollständig trocken zu halten sind, überdies bei Erdarbeiten der Beschädigung unterliegen und, was das Bedenklichste ist, bisweilen Gase in ihnen sich ansammeln, die bei Funkenbildung Entzündungen und Explosionen herbeiführen können. Man ist deswegen von diesem System abgekommen. Günstiger sind eiserne Röhren,

die eine fortlaufende Röhrenleitung bilden, in welche man bisweilen die Kabel einzieht. Das Röhrenleitungsnetz muß in diesem Falle aus lauter geraden Strecken bestehen; wo eine Biegung erforderlich ist, wird ein Untersuchungs- und Einführungsbrunnen angelegt. Zum Zwecke des Einziehens wird beim Verlegen der Röhren ein verzinkter Eisendraht hineingebracht, an dem man darauf ein Drahtseil und mittels des letzteren das Kabel einzieht.

Die Reichstelegraphenverwaltung verlangt zum Schutze ihrer eigenen Anlagen bei der Herstellung elektrischer Starkstromanlagen (abgesehen von elektrischen Bahnen) die Beobachtung bestimmter Vorschriften.

Hinsichtlich der unterirdischen Starkstromleitungen wird verlangt, daß diese von Telegraphenkabeln tunlichst entfernt gehalten werden, und daß bei Kreuzungen ein nicht zu geringer Abstand eingehalten wird.

(679) Bauart der Kabel (Abb. 371 a bis i). Als Leitermetalle werden verwendet: Kupfer, Aluminium, Zink und Eisen. Die Leiter der Bleikabel bestehen nur bei den kleinsten Querschnitten aus einem einzelnen Drahte, sonst aus einer größeren Zahl verseilter Drähte. Bei Gleichstrom wird jede Leitung in einem besonderen Kabel geführt, bei Wechsel- und Drehstromkabeln sind 2 bzw. 3 Leiter in einem Kabel entweder konzentrisch oder nebeneinander und verseilt angeordnet. Nach den Verbandsvorschriften dürfen konzentrische Kabel nur bei Spannungen unter 3000 V verwendet werden. Mit Rücksicht auf bessere Raumaussnutzung erhalten die Leiter bisweilen nicht kreisförmigen, sondern sektorförmigen Querschnitt (Abb. 371 f), eine Anordnung, die indessen in elektrischer Hinsicht gegenüber dem Kreisquerschnitt der Leiter den Nachteil ungünstiger elektrischer Beanspruchung der Kabelisolierung mit sich bringt. Die Isolierung der Leiter wird aus getränkter Jutfaser, neuerdings in gesteigertem Maße auch aus Papier (bei Hochspannungskabeln ausschließlich) hergestellt. Da, wo auf Zerstörung der Isolierung einwirkende Einflüsse besonders stark auftreten, wird auch vulkanisierte Gummiisolierung angewendet. Mitunter verwendet man auch abwechselnde Schichten verschiedener Isolierstoffe. Zum Schutze gegen Feuchtigkeit wird das isolierte Kabel mit einem nahtlosen Bleimantel umpreßt und dieser noch durch Asphaltanstrich und eine Lage geteerter und asphaltierter Jute geschützt. Zum Schutze gegen mechanische Beschädigungen dient, wenn erforderlich, noch eine Bewehrung aus 2 spiralförmig aufgewickelten Eisenbändern (Abb. 371 a bis d und g), über denen sich nochmals eine Lage asphaltierter und geteerter Jute befindet (bandarmiertes Bleikabel), oder eine Bewehrung aus Eisendraht (Abb. 371 f, h und e) auch beide zugleich (Abb. 371 i).

Gruben- und Schachtkabel (Abb. 371 h). Für diese Kabel ist eine besonders starke tragfähige Bewehrung erforderlich. Diese wird bei kleinen Kabelquerschnitten aus verzinkten Rundeisendrähnen, bei größeren Querschnitten und bei Hochspannungskabeln aus verzinkten Flacheisendrähnen hergestellt. Letztere bilden einen dicht schließenden Mantel für das ganze Kabel; bei Kabeln großen Querschnitts besteht auch die Bewehrung aus Drahtlitze.

Flußkabel (Abb. 371 i) besitzen gleichfalls eine besonders kräftige Bewehrung aus starken verzinkten Eisendrähnen, außer der üblichen doppelten Eisenbandbewehrung.

(680) Zulässige Strombelastung der Bleikabel. Bei unterirdisch verlegten Kabeln sind die Voraussetzungen für die Ableitung der Stromwärme verhältnismäßig günstiger als bei sonstigen isolierten Leitungen. Sie können aus diesem Grunde bei gleichem Querschnitt höhere Ströme führen als diese. Indessen ist zu beachten, daß sich bei hohen Spannungen die durch die ständige Umelektrisierung der isolierenden Schichten entstehende zusätzliche Erwärmung bemerkbar macht, so daß die Belastungsfähigkeit der Kabel um so geringer ist, mit je höherer Spannung sie betrieben werden. Nachstehend sind die zulässigen Belastungswerte bei verschiedenen Spannungen und für die gebräuchlichen Leitermetalle zusammengestellt.

Querschnitt eines Leiters	Höchste dauernd zulässige Stromstärke in Ampere												
	Einleiterbleikabel bis 750 V				Verseilte Dreileiter- bleikabel bis 3 kV				Verseilte Dreileiter- bleikabel bis 10 kV				
	in mm ²	Cu	Al	Zn	Fe	Cu	Al	Zn	Fe	Cu	Al	Zn	Fe
1	24	—	12	8	17	—	—	—	—	—	—	—	—
1,5	31	—	16	11	22	16	—	—	—	—	—	—	—
2,5	41	—	22	14	29	22	15	10	—	—	—	—	—
4	55	42	29	19	37	28	19	13	—	—	—	—	—
6	70	55	37	24	47	36	25	16	—	—	—	—	—
10	95	75	50	33	65	50	35	23	60	46	32	21	—
16	130	100	70	45	85	65	45	30	80	60	42	28	—
25	170	130	90	60	110	85	59	38	105	80	56	36	—
35	210	160	110	75	135	105	70	47	125	95	65	43	—
50	260	200	135	90	165	125	90	60	155	120	85	55	—
70	320	245	170	110	200	145	105	70	190	155	100	65	—
95	385	295	205	135	240	185	125	85	225	170	120	80	—
120	450	345	240	155	280	215	145	100	260	200	135	90	—
150	510	390	270	175	315	240	165	115	300	230	160	105	—
185	575	440	305	200	360	275	190	125	340	260	180	120	—
240	670	515	355	230	420	320	225	145	—	—	—	—	—
310	785	600	420	270	490	375	260	—	—	—	—	—	—
400	910	695	485	315	570	435	305	—	—	—	—	—	—
500	1035	795	555	360	—	—	—	—	—	—	—	—	—
625	1190	910	635	415	—	—	—	—	—	—	—	—	—
800	1380	1055	740	480	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	1585	1210	850	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Verseilte Zweileiterbleikabel können mit einer um 12% höheren, dagegen dürfen verseilte Vierleiterbleikabel nur mit einer um 8% geringeren als in der Zusammenstellung für verseilte Dreileiterbleikabel angegebenen Stromstärke belastet werden. Die angegebenen Stromstärken gelten nur bei Verlegung im Erdboden. Bei Verlegung der Kabel in Kanälen, in der Luft oder an Wänden empfiehlt es sich, die Belastung auf $\frac{3}{4}$ der angegebenen Werte zu ermäßigen.

(681) Kabelgarnituren. An allen Stellen, wo ein Kabel endet, in eine Haus- oder Freileitung übergeht oder mit einem anderen Kabel verbunden wird, muß besondere Sorgfalt auf sichere Verbindung und gute Isolierung der blanken Leiter- teile verwendet werden; auch ist die freigelegte Kabelisolierung gut abzuschließen. Hierzu dienen die sogenannten Garniturteile:

Endverschlüsse (Abb. 372 a bis d). Die Enden der Kabelleitungen sind mit den Anschlußleitungen durch starke Verbindungsklemmen mittels Schrauben verbunden. Die Verbindung ist in einem gußeisernen Schutzbehälter untergebracht, der mit Isoliermasse vollständig ausgegossen wird.

Verbindungsmuffen (Abb. 373 a bis c). Die Kabelenden werden durch Schraubklemmen verbunden. Die Muffe besteht aus einem gußeisernen Kasten, der nach Herstellung der Verbindung mit Isoliermasse ausgegossen wird.

Abzweigmuffen (Abb. 373 d). An Stelle der Verschraubung der Leiter- teile an Verbindungs- und Abzweigstellen mittels Verbindungsklemmen wird bisweilen auch die Verlötlung angewandt, um unzulässige Erwärmung durch



Abb. 372a. Einfacher Gummiendverschluß für Einleiterkabel.

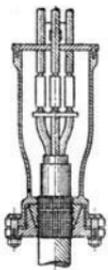


Abb. 372b. Endverschluß für Drehstromkabel bis 7000 V (AEG).

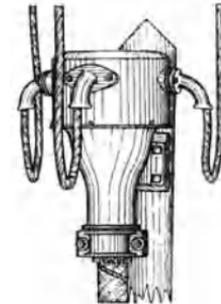
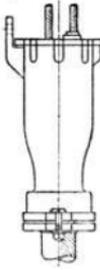


Abb. 372c. Überführungsendverschluß vom Hochspannungskabel zur Freileitung (AEG).

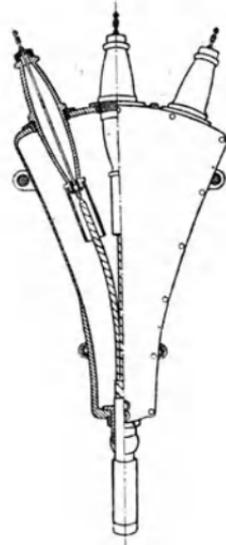


Abb. 372d. Endverschluß zu Drehstrom-Hochspannungskabel für 30000 V (AEG).

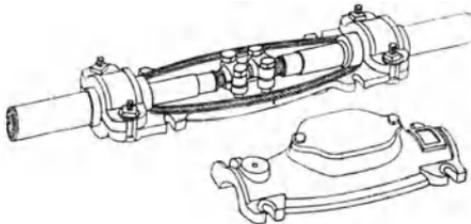


Abb. 373a. Verbindungsmuffe für Einleiterkabel (SSW).

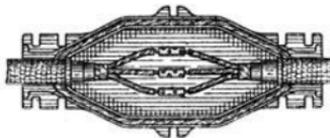


Abb. 373b. Verbindungsmuffe für dreifach verseilte Kabel (Land- und See-Kabelwerke).

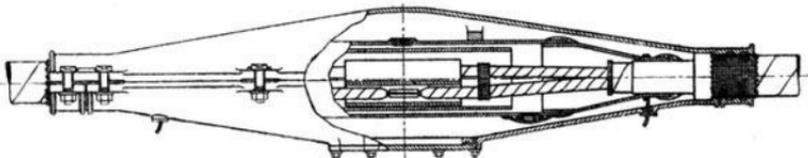


Abb. 373c. Verbindungsmuffe für Drehstrom-Hochspannungskabel 30 000 V (AEG).

schlecht ausgeführte Schraubenverbindungen auszuschließen. Die einzelnen Leiter-
teile müssen dann gespleißt und sorgfältig miteinander verlötet werden und auch
die beiden Bleimäntel sind durch Verlötung zu verbinden; die Lötstelle wird hierauf
durch eine Schutzkappe bedeckt. Das Lötverfahren erfordert ein sehr zuver-
lässiges und gutgeschultes Arbeitspersonal.

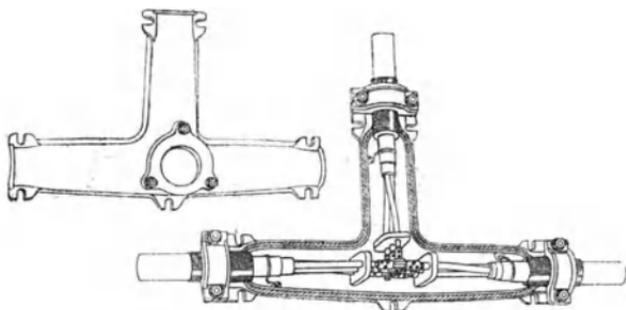


Abb. 373 d. Abzweigmuffe für dreifach verseilte Bleikabel bei 3 kV (AEG).

Die Verwendung sehr hoher Spannung erfordert besonders sorgfältige
Durchbildung der Garniturteile und Vorsicht bei deren Montage (Abb. 372 d
und 373 o). Die Durchführungen der Kabelseelen am Endverschlusse sind der

hohen Spannung entsprechend als Porzellanisolatoren ausgebildet. Um bei der
Montage die in die Kabelenden einge-
irungene Luft zu entfernen, wird das mit
den Bleimänteln verlötete bleierne Muffen-
gehäuse auf ca. $\frac{1}{10}$ mm Quecksilbersäule
ausgepumpt. Auch die Füllung der Muffen
erfolgt unter Vakuum.

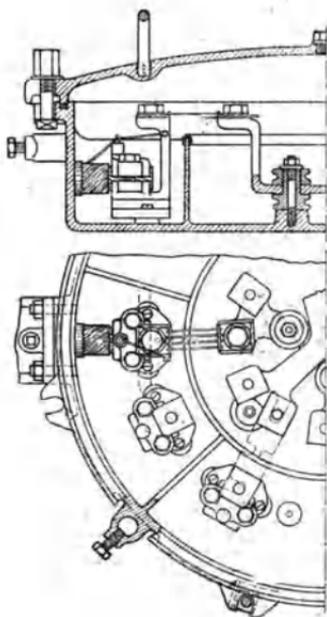


Abb. 374 a. Kabelkasten der SSW.

(682) Kabelkästen. An Vereinigungs-
punkten mehrerer Kabel verwendet man
Kabelkästen, die auch Sicherungen für
die einzelnen Leitungen enthalten können.
Diese Kästen werden nicht ausgegossen,
müssen aber äußerst sorgfältig gegen das
Eindringen von Feuchtigkeit geschützt
werden.

Bei dem Kabelkasten Abb. 374 a er-
folgt die Abdichtung durch Gummizwischen-
lagen zwischen Deckplatte und Kasten-
rand.

Abb. 374 b zeigt einen Kabelkasten
zur Einführung von 4.3 Einfachkabeln,
die durch Silberdrahtschmelzeinsätze ge-
sichert sind. Der Kasten wird durch
eine Abdeckglocke nach Art einer Taucher-
glocke verschlossen, wodurch das Ein-
dringen von Wasser in den Kasten aus-
geschlossen ist.

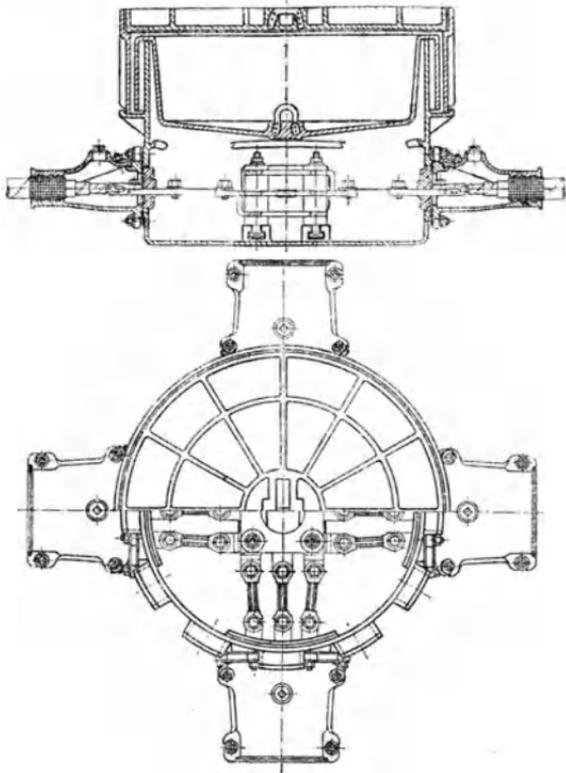


Abb. 374 b. Kabelkasten der AEG mit Abdeckglocke.

Freileitungen.

(683) Begriff und Verwendung. Nach den Begriffsfeststellungen in den Errichtungsvorschriften des VDE gelten als Freileitungen: alle oberirdischen Leitungen außerhalb von Gebäuden, die weder metallische Schutzhülle noch eine Schutzverkleidung besitzen. Als Freileitungen sind nicht anzusehen Installationen im Freien an Gebäuden, in Höfen, Gärten u. dgl., bei denen die Entfernung der Stützpunkte weniger als 20 m beträgt.

Die Freileitungen, die selbst in kleineren Städten den Erdkabeln weichen mußten, haben durch die Ausbreitung der Überlandwerke wiederum eine erhöhte Bedeutung gewonnen, aber auch hier dürften sie nur die Vorstufe einer höheren Entwicklung bilden. Sie finden außer in den Hochspannungsnetzen der Überlandwerke auch in den Ortsnetzen der Dörfer und kleinen Städte sowie auf den Gütern ausgedehnte Anwendung und bilden in den weitaus meisten Fällen das wirtschaftlichste Mittel zur Fortleitung der elektrischen Energie. Da die Freileitungen allen atmosphärischen und mechanischen Einwirkungen ausgesetzt sind, ist ihre Betriebssicherheit eine bedingte, an deren Verbesserung unablässig gearbeitet wird.

(684) Maste und Leitungsträger. Als Träger der Verteilungsleitungen finden vorwiegend Holzmasten Verwendung. Sie werden aus gut gewachsenen Fichten, Lärchen oder Tannen in Länge von 7—14 m und Zopfstärken von 13—18 cm geschnitten und unter Vakuum mit Kupfervitriol, Zinkchlorid, Sublimat oder

Teeröl getränkt. Es werden einfache (*E*) und doppelte oder Kuppelmaste (*D*) verwendet. Die Einbautiefen betragen bei

7	8	9	10	11	12	13 m Mastenlänge
1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,9 m.

Die Zopfstärken in cm errechnen sich nach *K i n b e r g* für imprägnierte *E*-Masten zu $Z = \sqrt[3]{580 \cdot D \cdot H \cdot a + 100 H_1^2 - H_1^3} - \frac{H_1}{2}$ und für imprägnierte *D*-Masten zu $Z = \frac{\sqrt[3]{580 \cdot D \cdot H \cdot a + 100 H_1^2 - H_1^3}}{5} - \frac{H_1}{2}$, wo $D = \Sigma$ der Drahtdurchmesser

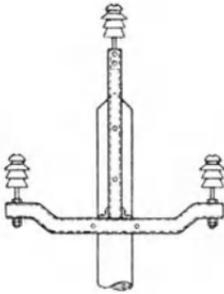


Abb. 375. Mast für Hochspannung.

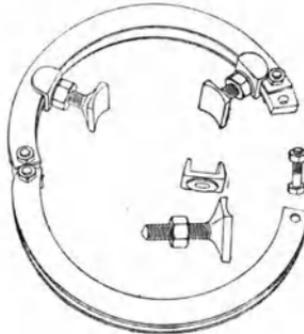


Abb. 376. Gußeiserner Ring für Verteilungspunkte.

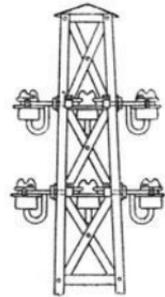


Abb. 377. Gittermast für Freileitungen.

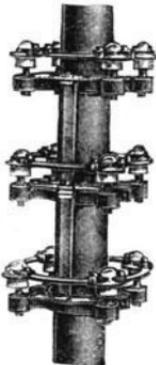


Abb. 378. Holzmast für Freileitungen.

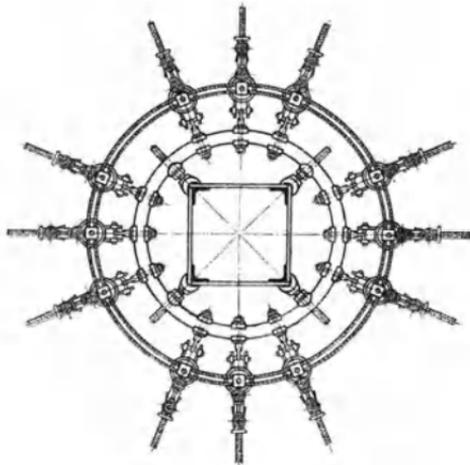


Abb. 379. Verteilungspunkt für Freileitungen am Gittermast.

in m, H = mittl. Leitungshöhe über Erde, H_1 = Gesamthöhe, a = Spannweite zwischen den Masten in m bedeuten. Die Stärke S des Mastfußes ist nach der Faustformel des VDE $S = 1,2 \sqrt{H \cdot D}$. Die Stelle des Mastes, an der die verschiedenen Medien — Erde und Luft — sich berühren, ist am ehesten der Zerstörung ausgesetzt und daher sorgfältig zu überwachen. Nach etwa 5 Jahren ist der Mastfuß durch Aufgraben auf 50 cm freizulegen und nach dem Trocknen mit heißem Teeröl nach-

zustreichen. Es hat sich ferner gezeigt, daß auch die dachförmig zugespitzten Zopfenden der Maste zweckmäßig mit Teer zu streichen sind. Bei humussäurehaltigem (Moor)-Boden, oder um angefaulte Maste zu retten, werden Holzmaste auf besondere Schäfte aus imprägniertem Hartholz, Beton und Eisen gesetzt. Für wichtige (Speise-) Leitungen wählt man U- und L-Eisenmaste, Gittermaste oder Leitungstürme. Diese werden für einen bestimmten Spitzenzug berechnet. Die Eisenmaste besitzen eine bedeutend größere Lebensdauer als Holzmaste, bedürfen jedoch einer sorgfältigen Überwachung und öfteren Erneuerung des Anstriches. Vor

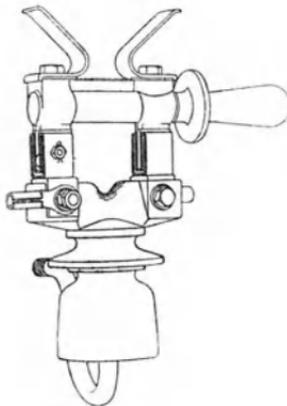


Abb. 380 a. Isolator mit ausschaltbarer Sicherung.

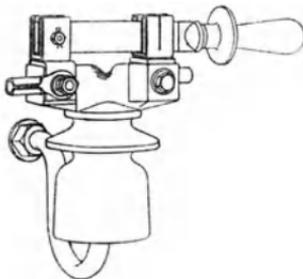


Abb. 380 b. Isolator mit Streckenunterbrecher.

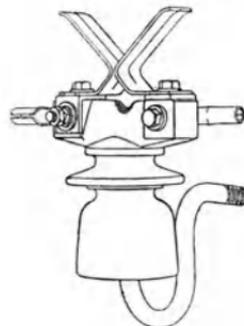


Abb. 380 c. Isolator mit Hörnerfunkenableiter.

Spezial-Glockenisolatoren für Apparate an Freileitungen.

dem Streichen sind die Eisenmaste sorgfältig vom Rost zu befreien. Die im Boden befindlichen Eisenteile sind bis etwa 50 cm über dem Erdboden mit heißem Teer zu streichen oder sorgfältig mit Beton zu ummanteln; auch ist darauf zu sehen, daß sich nirgends Wasser ansammeln kann. In den letzten Jahren finden auch Maste aus Eisenbeton von rechteckigem Querschnitt mit oder ohne Aussparungen und runde, innen hohle, sog. Schleudermaste, vielfach Verwendung. Bei sachgemäßer Ausführung sind sie sehr haltbar und verursachen geringe Unterhaltungskosten. Die Eisenbetonmaste erhalten wie die Eisenmaste besondere Erdungsplatten oder Bänderung aus verzinktem Flacheisen. In kleineren Ortschaften werden auch Rohrmaste, Konsolen, Fahnenausleger, eiserne Dachständer oder

Querseile zum Tragen der Niederspannungsleitungen benutzt. Die Vermittlung zwischen Mast und Isolator bilden die Leitungsträger. Bei Hochspannungsleitungen werden die eisernen Stützen entweder direkt am Mast befestigt oder auf Querarme aus U-Eisen aufgeschraubt. Die Querarme sind in der Nähe der Isolatoren zweckmäßig zu kröpfen, um den Abstand von den Leitungen zum Eisen wegen der Vogelgefahr zu erhöhen (Abb. 375). Leitungstürme für mehrere Leitungen erhalten besonders ausgebildete Tragkonstruktionen, insbesondere bei Anwendung von Hängeisolatoren.

Der Aufbau der Leitungsträger für Niederspannungsnetze ist verwickelter, da hier oft eine größere Anzahl Leitungen an einem Gestänge laufen oder von diesem abzweigt werden. Auch darf hierbei die Wahrscheinlichkeit von Erweiterungen nicht außer acht gelassen werden. Besonders sorgfältige Ausbildung haben deshalb die Verteilungspunkte für Niedersp.-Freileitungen gefunden. Die Isolatoren hierfür werden an einem geteilten, gußeisernen Ring befestigt, der aufklappbar und mit einstellbaren Distanzstücken versehen ist, um ihn für runde und kantige Maste verschiedener Abmessungen verwenden zu können (Abb. 376). Die Isolatoren werden durch Verteilungsschienen oder Drahtseile untereinander

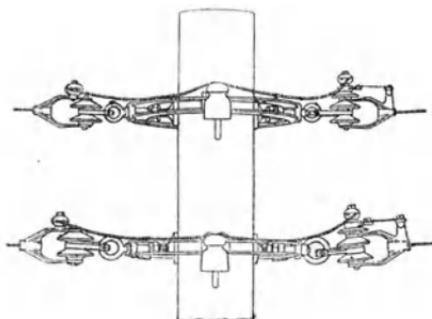


Abb. 381a. Verteilungspunkt mit Abspannisolatoren.

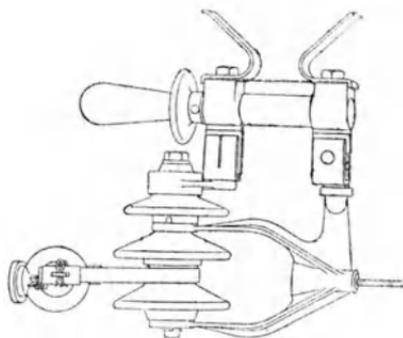


Abb. 381b. Abspannisolator mit ausschaltbarer Sicherung.

verbunden (Abb. 377 bis 379). Zur Befestigung der Freileitungen an den Isolatoren dienen Kabelschuhe, bestehend aus einem Gußkörper, in dem die Anschlußverbindung durch einen Keil festgehalten wird. Eine den Zug aufnehmende Seilschleife wird in seitlichen konischen Aussparungen des Kabelschuhes befestigt. Besondere Formgebung erhalten die Abspannisolatoren, wenn sie gleichzeitig zur Unterbringung von Sicherungen, Ausschaltern oder Hörnerfunkenableitern dienen sollen (Abb. 380 a b c). Bei dem von Astafieff ausgebildeten Verteilungssystem werden die Abspannisolatoren in einer Ringöse abgefangen, so daß sie sich in Richtung des Zuges frei einstellen können. Die Ringösen können an Holzmasten sowie an Verteilungsringen Verwendung finden. Der Abspannisolator kann gleichzeitig auch für feste oder abschaltbare Abzweigsicherungen eingerichtet werden (Abb. 381 a und 381 b). Die Anordnung hat den Vorzug, daß ein Bruch des Isolators durch falschen Zug oder das störende Verdrehen und Verbiegen der Isolatorenstützen nicht möglich ist.

Zum Festhalten von Seil- oder Drahtschleifen, sowie zu Abzweigungen und Verbindungen dienen besondere Universalklemmen und bei Hochspannungsfreileitungen Kerb-, Niet- oder Schraubverbinder (Abb. 382 und 383).

Zur Einführung von Freileitungen in Gebäude verwendet man da, wo diese nicht an den Außenwänden erfolgt, Dachständer mit besonderen Einführungsköpfen, bestehend aus einer Doppeltülle unter einer Regenhaube, die nach der

Montage aufgesetzt wird. Die Zweiteiligkeit der Anordnung gestattet bequemes und unbeschädigtes Einziehen der Drähte sowie eine leichte Kontrolle der Montage (Abb. 384). Der Aufbau der Verteilungspunkte muß in besonders sorgfältiger Weise geschehen, wobei auf genügende Abstände, gute Befestigung und übersichtliche Anordnung zu achten ist. Auch hier sind sog. Provisorien durchaus unstatthaft, da sie sehr bald die Ursache von Störungen werden.

(685) Isolatoren und Stützen. Die Beschaffenheit der Isolatoren ist für die Betriebssicherheit der Freileitungsnetze von ausschlaggebender Bedeutung. Ihre

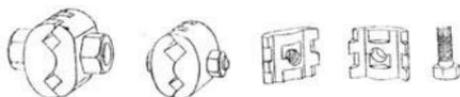


Abb. 382. Universalklemmen für Freileitungen.

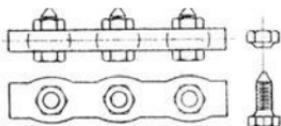


Abb. 383a. Schraubverbinder.



Abb. 383b. Nietverbinder.

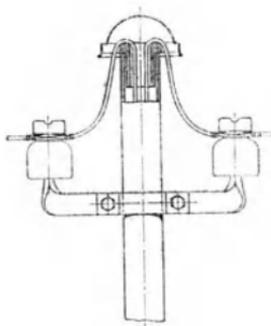


Abb. 384. Einführungskopf mit Regendach.

Gestalt ist abhängig von der Höhe der Spannung, für die sie Verwendung finden sollen. Der Isolator soll nicht nur den mechanischen Druckbeanspruchungen auf die Dauer standhalten, sondern auch den thermischen und elektrischen Einflüssen gewachsen sein. Um diesen Ansprüchen zu genügen, ist große Sorgfalt auf das zu

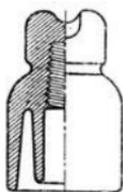


Abb. 385a. Schwachstrom-isolator.

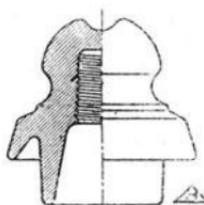


Abb. 385b. Niederspannungs-isolator.

verwendende Material, die Herstellung und Formgebung zu legen. Die an mehrteiligen Hochsp.-Isolatoren auftretenden Risse haben nach neueren Untersuchungen hauptsächlich Spannungen, hervorgerufen durch die verschiedene Wärmeausdehnung von Porzellan und Kitt, ihre Entstehung zu verdanken. Für Schwachstrom und Niederspannung verwendet man aus einem Stück hergestellte Porzellan- oder Glasisolatoren von glockenförmiger oder mehr tellerförmiger Gestalt (Abb. 385a u. b). Die Herstellung geeigneter Hochspannungsisolatoren bot nicht unerhebliche Schwierigkeiten. Von den anfangs gebräuchlichen Ölisolatoren ist man vollständig abgekommen, verwendet vielmehr jetzt für Spannungen bis 50 kV sog. Delta- oder Weitschirm-Isolatoren mit einem bis drei Zwischenmänn-

teln je nach der Höhe der Spannung, und für noch höhere Spannungen Hängeisolatoren. Die Einfügung der Zwischenmäntel bezweckt eine Verhinderung der Oberflächenleitung durch Feuchtigkeit, Ruß, Staub u. dgl., eine Verlängerung des Kriechweges und die Vermeidung des Durchschlages bei Beschädigung eines Teiles des Isolators. Die Isolatoren mit Zwischenmänteln werden meist mehrteilig ausgeführt, um den Schwierigkeiten bei der Fabrikation und den auftretenden inneren Spannungen zu begegnen. Außerdem gewinnt der Isolator dadurch an Festigkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen und eine größere Durchschlagsfestigkeit (Abb. 386). Die Porzellanfabrik Hermsdorf verwendet zur Verbindung der Isolatorteile mit Erfolg Hanf anstatt des chemisch und physikalisch noch nicht völlig beherrschten Zementkittes. Neuere Isolatorformen sind der Bay-Vaupelsche und der Motorisolator, die deutlich die noch nicht abgeschlossene Formgebung des Hochspannungsisolators dartun.

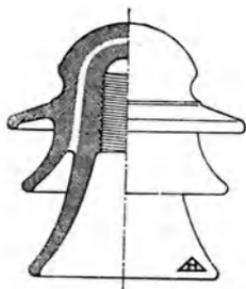


Abb. 386. Hochspannungs-
isolator für Stützen.

Neuerdings werden wieder bis 20 kV einteilige Isolatoren bevorzugt, um den Ribbildungen aus dem Wege zu gehen; von 20 bis 40 kV zweiteilige nicht gekittete, sondern mit Hanf verschraubte Isolatoren oder Hängeisolatoren.

Die Isolatoren sind 1920 durch den VDE genormt worden und zwar:

Type *N* 2 für Querschnitte bis 35 qmm, *N* 3 für Querschnitte bis 150 qmm, für Spannungen bis einschl. 500 V und

Type *H* 6 für 500 bis 6000 V Betriebsspannung, entspr. Hermsdorf Type *J* 1382, Sicherheitsgrad bei Regen 7,6,

Type *H* 10 für 6000 bis 10000 V Betriebsspannung, entspr. Hermsdorf Type *J* 1383, Sicherheitsgrad bei Regen 5,2,

Type *H* 15 für 10000 bis 15000 V Betriebsspannung, entspr. Hermsdorf Type *J* 1384, Sicherheitsgrad bei Regen 4,0,

Type *H* 25 für 15000 bis 25000 V Betriebsspannung, entspr. Hermsdorf Type *J* 1387, Sicherheitsgrad bei Regen 3,0,

Type *H* 35 für 25000 bis 35000 V Betriebsspannung, entspr. Hermsdorf Type *J* 1391, Sicherheitsgrad bei Regen 2,8.

Die genormten Delta-Isolatoren besitzen folgende Werte:

Betriebsspannung in kV	0,5—6	6—10	10—15	15—25	25—35
Trocken-Überschlagsspannung in kV.	66	74	82	101	125
Vorentladespannung bei Regen 3 mm kV	25	32	32	43	52
Regen-Überschlagsspannung bei Regen 3 mm kV	46	53	60	77	99
Mindestbruchlast in kg					
einteilig und gekittet	1300	1500	1700	2100	2300
zusammenglasiert	1000	1500	1700	1800	1900
Gewicht in kg	0,9	1,3	1,8	3,4	6,7

Die Hängeisolatoren bestehen aus mehreren, untereinander verbundenen Einzelgliedern, deren oberstes die Aufhängevorrichtung trägt, während am untersten Glied die Leitung befestigt ist. Bei der Konstruktion der Hängeisolatoren wird angestrebt, daß bei Beschädigung eines Isolators durch Blitzschlag, Steinwurf u. dgl. die Leitung nicht herabfallen kann. Bei dem Hewlett-Isolator wird dies dadurch angestrebt, daß die einzelnen Teile durch Seilschlingen mitein-

ander verkettet sind (Abb. 387). Die Porzellanfabrik Hermsdorf sucht dasselbe durch besondere Formgebung der den eigentlichen Isolator tragenden Konstruktionsteile zu erreichen, deren Zusammenhang auch gewahrt bleibt, wenn der Isolator beschädigt wird (Abb. 388). Andere Formen sind der Kugel- und Kegelkopf-Hängeisolator. Auch bei diesen Isolatoren macht sich das Bestreben geltend, gekittete Flächen zu vermeiden. Die einzelnen Glieder werden für eine durchschnittliche Betriebsspannung von 20 kV hergestellt. Die Überschlagnspannung steigt jedoch nicht in demselben Verhältnis wie die Zahl der Einzelglieder, sondern ist um 10—30% geringer, und zwar infolge der ungleichen Verteilung des Ladestromes.

Um die Isolatoren nicht von der Umgebung zu scharf abstechen zu lassen, werden sie vielfach nicht mit weißer, sondern mit grüner, grauer oder brauner Glasur versehen.

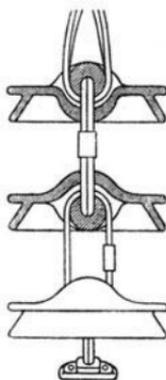


Abb. 387. Hängeisolator.

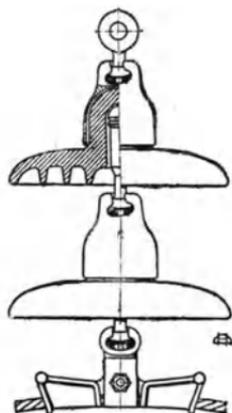


Abb. 388. Kappenhängeisolator.

Die Isolatoren werden auf eisernen Stützen befestigt, deren Form sich nach der Art der Leitungsträger (Holz-, Eisenmaste, Mauerwerk usw.) richtet

(Abb. 389) und die ebenfalls 1920 durch den VDE eine Normung erfahren hat. Auf genügende Höhe und Ausladung der Isolatorenstützen ist schon mit Rücksicht auf die Vogelgefahr ganz besonderes Augenmerk zu richten. Um dem mechanischen Zug der Freileitungen Widerstand zu leisten, erhalten die Stützen, wo erforderlich, entsprechende Verstärkungen. Das Aufbringen der Isolatoren auf die Stützen geschieht mittels Hanf, der mit Leinöl oder Mennige getränkt wird, oder vermittels Papierhülsen. Die nachgiebige Schicht zwischen Isolator und Stütze soll ein Springen des Isolators verhüten und einen Ausgleich für die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten von Porzellan und Eisen schaffen. Das Aufkitten mit Schwefel ist unstatthaft, das mit Zement besonders in Amerika gebräuchlich.

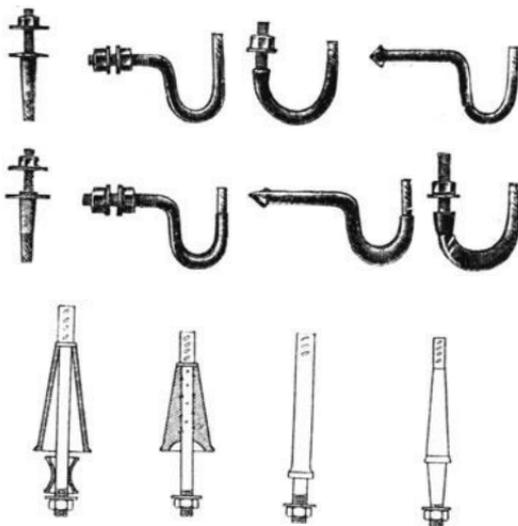


Abb. 389. Isolatorenstützen.

(686) Leitungsdraht. Alle außerhalb der Gebäude verlegten und der Berührung entzogenen Drähte bedürfen keiner besonderen Isolierung, sondern werden blank verlegt. Als Material kommen Kupfer, Aluminium, Bronze, Eisen oder Bimetall in Betracht. Das verwendete Kupfer muß elektrolytisch rein sein und den Kupfernormalien des VDE entsprechen. Für Leitungen bis zu 16 mm² wählt man Einzeldrähte, von da ab Seile (s. Normalien für Freileitungen des VDE). Die Verbindung der Cu-Leitungen erfolgt durch Verlöten, die von Zug entlastet sein muß, meistens jedoch durch Niet-, Kerb- oder Schraubverbinder.

Die Leitungen aus Aluminium, das mindestens 99% Reingehalt haben soll, haben in den letzten Jahren erhöhte Bedeutung gewonnen. Für Freileitungen werden, um genügende Festigkeit zu erreichen, nur Al-Seile verlegt. Der Al-Querschnitt beträgt für gleiche Leitfähigkeit das 1,65fache des Cu-Querschnittes und das Gewicht die Hälfte desjenigen der gleichwertigen Cu-Leitung, d. h. der Al-Preis darf gleich dem halben Cu-Preis sein. Die Verbindungen der Al-Leitungen müssen besonders sorgfältig ausgeführt werden; es sind hierfür neuerdings eine ganze Anzahl besonderer Vorrichtungen konstruiert worden. Die Al-Leitungen besitzen gegenüber den Cu-Leitungen folgende Vorteile: größere Oberfläche, bessere Kühlung, größere Belastbarkeit, größere Dehnungszahl, geringeres Gewicht und leichtere Gestänge, dagegen folgende Nachteile: geringere Festigkeit, größeren Durchhang, größere Leitungsabstände, Weichheit des Materials und schwierigere Herstellung von Verbindungen. Bei größeren Querschnitten sind die Al- den Cu-Leitungen dagegen überlegen. Die Befestigung der Al-Leitungen an den Isolatoren erfolgt am einfachsten und besten durch Klemmbügel. In letzter Zeit ist die Durchbildung von Stahl-Aluminiumleitungen, die eine tragende Stahlseele mit Al-Überzug als Leiter besitzen, so weit gefördert, daß mit einer vorläufigen Normung der Querschnitte begonnen werden konnte.

Bronzeleitungen finden infolge des hohen spez. Widerstandes geringe Verwendung; sie kommen hauptsächlich für kurze Strecken in Betracht, von denen eine erhöhte Festigkeit verlangt wird (Bahn- und Wegekreuzungen). Dagegen haben Eisenleitungen infolge der Kupfernot der letzten Jahre eine ausgedehnte Anwendung im Freileitungsbau gefunden, und zwar als Eisen- oder Stahldrahtseile. Es soll nur gezogener, gut verzinkter Draht verwendet werden, um Rostbildung zu vermeiden. Wenn der Spannungsabfall bei der Wahl des Querschnittes nicht maßgebend ist, kann man das 2,5- bis 3,5fache des erforderlichen Cu-Querschnittes wählen. Bei Ausführung von Verbindungen an Eisenleitungen sind dieselben Vorsichtsmaßnahmen wie bei den Al-Leitungen zu beobachten. Neuerdings ist für schwächere Querschnitte und bestimmte Zwecke auch der sog. Bimetalldraht vom VDE zugelassen worden, der aus einer Eisenseele mit Kupferummantelung besteht.

Zum Vergleich der verschiedenen Leitungsmaterialien diene folgende Tabelle:

	Cu halbhart	Bronze	Alum.	Stahl
Spez. Gewicht	8,95	8,9	2,7	7,95
Zerreißfestigkeit kg/mm ²	30—38	50—68	17—20	60
Elastizitsgrenze kg/mm ²	12	12,5—25	8—10	30
Spez. Widerstand 10 ⁻³	17,2	18,7—28,7	28,74	138
Leitfähigkeit	58,1	35—53,5	34,8	7,25
Wärme-Ausdehnungskoeffizient 10 ⁻⁶	16,8	18	23,8	11,4

(687) Spannweite und Durchhang. Bei Niederspannungsanlagen wählt man gewhlich eine Spannweite von 40—60 m, schon um für Hausanschluleitungen eine hinreichende Anzahl von Abzweigpunkten zu erhalten. Bei Hochspannungsleitungen geht man weit über diese Entfernung hinaus. Hierfür betragen die mittleren Mast-

abstände für Holzmasten 60—80 m und bei Eisenmasten 100—200 m und darüber. Für Spannungen von 100 kV liegt die günstigste Spannweite zwischen 200 und 240 m. Für Abzweigleitungen wählt man 40—60 m Mastenabstand. Alle 500 m soll bei Holzmasten ein verankerter (A) Mast und bei eisernen Masten alle 3 km ein Abspannmast gesetzt werden. Die gegenseitigen Abstände der Leitungen sollen nach den Vorschriften des VDE wenigstens $0,75 \sqrt{f} + \frac{E^2}{20\,000}$, bei Al-Leitungen

mindestens $\sqrt{f} + \frac{E^2}{20\,000}$, bei Hochspannung von 3000 V aufwärts nicht unter 0,8 m für Aluminium 1,0 m betragen. Hierin ist f der Durchhang der Leitungen bei $+40^\circ\text{C}$ in m und E die Spannung in kV. Bei Niederspannungsleitungen, die dem Winde weniger ausgesetzt sind, können die Werte obiger Formel um $\frac{1}{3}$ ermäßigt werden.

Nach der Spannweite ist der Durchhang der Leitungen zu bemessen. Die Freileitungsnormalien des VDE lassen für massive Kupferleiter einen Zug von 12 kg/mm^2 , für Kupferseile von 19 kg/mm^2 und für Aluminiumseile von 9 kg/mm^2 zu. Diese Beanspruchungen sollen weder bei -20°C ohne zusätzliche Belastung, noch bei -5°C mit einer zusätzlichen Eis- bzw. Windbelastung überschritten werden. Diese Zusatzlast ist gleich $180 \sqrt{d}$ in g für 1 m Leitungslänge einzusetzen, wo d den Leitungsdurchmesser (bei isolierten Leitungen den Außendurchmesser) in mm bedeutet. Die allgemeine Formel für die Berechnung des Durchhanges bei gleicher Höhe der Befestigungspunkte lautet: $f = a^2 \cdot g/8 s \cdot q$, wo a = Spannweite in m, g = Gewicht des Drahtes in kg/m, s = Zugbeanspruchung des Drahtes in kg^*/mm^2 und q = Querschnitt des Drahtes in mm^2 bedeuten. Bei Berücksichtigung von Wind- oder Eislast tritt zu g die betreffende Zusatzbelastung hinzu. Die Ermittlung der größten Durchhänge ist sowohl für -5°C und zusätzliche Belastung, wie auch für $+40^\circ\text{C}$ ohne Zusatzlast durchzuführen. Da für jeden Querschnitt eine besondere Zusatzbelastung durch Wind- bzw. Eis zu berücksichtigen ist, muß für jeden Querschnitt eine besondere Tabelle berechnet werden. Derartige Montagetabellen sind im Verlag M. Jaeger, Berlin, Ramlerstraße 38 zu erhalten. Die Einstellung des richtigen Durchhanges bei der Montage erzielt man dadurch, daß man die Durchhänge an den Masten von der Rille des Isolators aus abmißt, und die Leitung nach der durch diese Punkte festgelegten Visierlinie spannt, oder dadurch, daß man den bestimmten Zug mit einem Federdynamometer einstellt, natürlich unter Berücksichtigung der gerade herrschenden Temperatur. Eine neue Art der Durchhangsbestimmung ist von Vaupel angegeben (ETZ 1923, S. 145).

(688) Schutzvorrichtungen. Besondere Schutzvorkehrungen gegen Drahtbrüche sind notwendig, wenn Leitungen mit anderen parallel laufen, sich kreuzen, oder wenn Hochspannungsleitungen Ortschaften, Wege, Postleitungen oder den Bahnkörper überqueren. Für Niederspannungsleitungen werden hierfür besondere, wetterfeste isolierte Leitungen (Hackethal- und Pluviusdraht) verwendet.

Für Hochspannungsleitungen sind eine Anzahl Vorkehrungen gebräuchlich, die das Erden oder Stromloswerden der gerissenen Leitung bezwecken. Die früher allgemein gebräuchlichen *Schutznetze* werden ihrer Nachteile und Unkosten wegen nur noch selten ausgeführt. Zur Abtrennung dienen auch die *Goldschen* und *Hesseschen Kupplungen*, bei denen die Leitungen nur durch den Zug der Drähte in besonders geformten Aufhängevorrichtungen an den Isolatoren gehalten werden. Äußerst sorgfältige Montage ist erforderlich, da sonst die Leitungen sich bei Sturm-, Schnee- und Eislast auslösen und herabfallen. Vielfach werden auch *Erdungsbügel*, die den gerissenen Draht auffangen und erden, angewendet. Bei deren Bemessung ist zu berücksichtigen, daß sie nicht zu weit von der Leitung abstehen, wodurch sie ihre Wirkung verfehlen, andererseits aber, daß sie sich nicht zu nahe am Leitungsdraht befinden, damit Störungen durch Wind oder Vögel vermieden werden. Sind die zu kreuzenden Wege nicht zu breit,

kann man die Maste so hoch wählen, daß die gerissene Leitung im ungünstigsten Falle 3 m über Straßenoberkante bleibt; gleichzeitig kann durch ein einfaches, unter der Leitung angebrachtes trapezförmiges Eisengestell für Erdung gesorgt werden. Die beiden zuletzt genannten Schutzvorrichtungen werden ebenfalls kaum noch verwendet. Meistens wird jetzt die bruchsichere Aufhängung bevorzugt und von den meisten Bahnverwaltungen vorgeschrieben. Diese erfolgt in der Weise, daß jeder Draht an den beiden Masten des Kreuzungspunktes durch

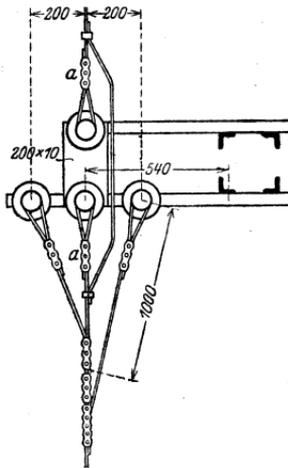


Abb. 390. Bruchsichere Aufhängung.

je zwei oder drei Isolatoren abgespannt wird. Beim Schadhafwerden eines Isolators wird der Draht durch die Abspannseile des oder der anderen Isolatoren gehalten (Abb. 390). Die Leitung darf bei Kupferseilen nur mit einer Zugspannung von 12 kg/mm², bei Kupferdrähten nur mit 8 kg/mm², bei Aluminiumleitungen nur mit 5 kg/mm² verlegt werden. Die preußischen Bahnverwaltungen schreiben Kupferseil von 35 mm² vor. Unterhalb der Leitungen ist ein geerdeter Prelldraht zu spannen. Bemerkenswert ist auch die bruchsichere Aufhängung von Ulbricht, bei der jede Leitung aus zwei an gesonderten Isolatoren befestigten Leitungsseilen mit Querverbindungen besteht. Jede Leitung bildet ein schmales Netz, das, wagerecht angeordnet, von der Bahn aus schmal erscheint. Bei Bruch eines Seiles erhält das Netz eine schon aus der Ferne erkennbare Schrägstellung. Die Verbindungen an diesen Netzen werden nicht durch Lötung, sondern durch Nietverbinder hergestellt. Bedingung bei allen diesen Vorrichtungen ist eine unbedingt gute Erdung der betreffenden Masten und Schutzvorkehrungen. Zum Schutze gegen Erdschlüsse durch Vögel verwendet man Porzellanklemmen, die über die Leitungen in der Nähe des Isolators geschoben werden, oder besonders ausgebildete Traversen, die keine Sitzgelegenheit für Vögel abgeben. Die Vogelgefahr läßt sich bereits durch richtige Abmessung der Abstände der Leitungen von den Eisenteilen stark herabmindern. Vielfach genügt bei Wegekreuzungen die Ausführung der Leitungen mit erhöhter Sicherheit durch Wahl höherer Isolatortypen oder Einfügung eines weiteren Hängeisolatorengliedes (s. Vorschriften des VDE).

Literatur: W. v. Moellendorf, Verwendung versch. Metalle f. Freileitungen. ETZ 1910, S. 44. — G. Kl ingenberg, Verteilung elektr. Energie über große Gebiete. ETZ 1913, S. 698. — W. Petersen, Der Schutzwert von Blitzseilen. ETZ 1914, S. 1. — Fr. W. Esch, Verwendung von Eisenleitungen als Ersatz von Cu- bzw. Al-Leitungen. ETZ 1915, S. 185. — J. Sumec, Graph. Bestimmung d. Zugbeanspruchungen v. Freileitungen. ETZ 1915, S. 327. — S. Wächter, Rasche Bestimmung d. Durchhangsänderungen v. Freileitungen. ETZ 1916, S. 429. — Sparstoffe. ETZ 1916, S. 561. — H. Hamy, Freileitungen aus Al. ETZ 1917, S. 241. — G. Horstmann, Üb. d. wirtschaftl. Ausnutzung v. Hochsp.-Leitungen. ETZ 1918, S. 193. — W. Wittek, Üb. d. Eisbelastung d. Freileitungen. ETZ 1918, S. 475. — E. O. Meyer, Zerstörungserscheinungen an Hochsp.-Isolatoren. ETZ 1919, S. 173. — „Eisenbeton“-Schleudermaste für Hochsp.-Leitungen. ETZ 1919, S. 191. — E. G. Fischinger, Al-Eisen u. Al-Stahlseile f. Starkstromleitungen. ETZ 1919, S. 393. — O. Szillas, Üb. d. Durchhang v. Freileitung. ETZ 1919, S. 466. — Die Aussichten der Kraftübertragung mit Drehstrom. ETZ 1920, S. 32. — W. Grothe, Durchhänge v. Freileitung. ETZ 1920, S. 311. — P. Neumann, Berechnung v. hölzernen Einfach- u. Doppelmasten m. Stützisolatoren. ETZ 1920, S. 405. — O. Brauns, Über d. Nebeneinanderverlauf v. Drehstrom- u. Fernsprechleitungen. ETZ 1920, S. 604. — Feuer, Berechnung gegliederter eiserner Gestänge f. Freileitung. ETZ 1920, S. 725. — Thomälen, Beitrag zur Schwaigerschen Netzberechnung. ETZ 1920, S. 729. — M. Donath, Die Berechnung von Isolatorenstützen. ETZ 1920, S. 809. — A. Schwaiger, Zur Theorie

der Hochsp.-Isolatoren. ETZ 1920, S. 845. — R. Tröger, Großkraftübertragungen. ETZ 1920, S. 905. — L. Seidemann, Durchbiegung v. Gittermasten. ETZ 1920, S. 1029. — G. Huldshiner, Zur Berechnung v. Spannungsabfällen in Drehstromleitung. ETZ 1921, S. 73. — W. Koch u. W. Maurer, Entwurf v. Kurvenblättern f. schnelle u. genaue Berechnung von Hochsp.-Fernleitungen. ETZ 1921, S. 365. — M. Donath, Berechnung v. Isolatorenstützen. ETZ 1921, S. 421. — H. Schenkel, Die größtmögliche Spannweite bei Freileitung. ETZ 1921, S. 720. — A. Heine Meyer, Formeln f. d. Durchbiegung v. Gittermasten. ETZ 1921, S. 825. — H. Schenkel, Neues über Freileitungen. Einfluß der Hängeisolatoren. ETZ 1921, S. 851. — F. Moll, Festigkeit hölzerner Leitungsmasten. ETZ 1921, S. 1424. — G. Hiller, Stahlaluminium- u. Rein-aluminiumseile für Freileitung. ETZ 1921, S. 1447. — W. Weicker, Neuere Gesichtspunkte z. Beurteilung v. Hängeisolatoren. ETZ 1921, S. 1473. — K. Guernndt, Ermittlung d. Durchhanges v. Freiltg. an schweren Abspannisolatorenketten. ETZ 1922, S. 137. — L. Rosenbaum, Die Bemessung d. Zusatzlast v. Freileitungen. ETZ 1922, S. 1434. — H. Schenkel, Stahlaluminium f. Freileitungen. ETZ 1922, S. 1453. — H. Schwaiger, Über Hochsp.-Freileitungsisolatoren. ETZ Festschrift 1923, S. 30. — A. Vaupel, Ein neuer Isolator. ETZ 1923, S. 59. — Ders., Eine neue Art d. Zug-u. Durchhangsbest. bei Freileitungen. ETZ 1923, S. 145. — Usbeck, Erfahrungen m. Hochspannungsleitungen im Gebirgsland. ETZ 1923, S. 585. — G. Schütz, Neue Gesichtspunkte f. d. Berechnung u. Ausführ. v. Mastfundamenten. ETZ 1923, S. 708. — W. Buck-sath, Elektr. Stoßprüfung v. Porzellanisolatoren. ETZ 1923, S. 943. Bücher, Dr. H. Fröhlich, Beitrag zur Berechnung v. Mastfundamenten. Verlag Ernst u. Sohn. Berlin 1921. — Normalienbuch, herausgegeben. VDE. 1923. — F. Kapper, Freileitungsbau, Orts-netzbau. Verlag Oldenbourg, München-Berlin 1920. — C. Lommel, Strom-u. Leistungs-bild als Grundlage für d. Bau u. Betrieb großer Fernkraftanlagen, Dissertation Darm-stadt 1922. — C. Breitfeld, Berechnung v. Wechselstromfernleitungen. Vieweg & Sohn. Braunschweig 1922.

Leitungen in Innenräumen.

(689) **Blanke Leitungen**, die in erster Linie dem Bau von Freileitungen dienen (683, 686), gelangen auch noch zur Verwendung bei Installationen im Freien (§ 23 der Errichtungsvorschriften), ferner für Leitungen, welche betriebsmäßig geerdet sind, wie die geerdeten Mittelleiter von Gleichstrom-Dreileiteranlagen oder die geerdeten Nulleiter von Drehstromleitungsnetzen (664 bis 666).

Zu den blanken Leitungen im Sinne der Verbandsvorschriften sind zu rechnen die nur gegen chemische Einflüsse geschützten Leitungen (§ 19, 1 und § 24a der Errichtungsvorschriften). Diese Leitungen wurden vor langer Zeit schon von Hackethal (Hackethaldrähte genannt) hergestellt mit einer Umklöppelung aus Baumwolle oder Jute und einer Tränkungsmasse aus Leinöl und Mennige und damals in erster Linie zum Schutz von Schwachstromleitungen bei Kreuzungen von diesen verwendet. Solche werden heute von den Drahtfabriken unter der Bezeichnung säurebeständige Leitungen oder wetterfeste Freileitungen in den Handel gebracht. Sie dienen außer dem bereits erwähnten Zweck (Schutz von Schwachstromleitungen bei Kreuzungen) auch für Installationen im Freien, ferner in Ställen, Waschküchen, chemischen Fabriken usw., überhaupt für Räume, in denen ätzende Dünste auftreten.

Außer diesen, früher im weitesten Sinne als isoliert geltenden Leitungen finden in der Starkstromtechnik noch isolierte Leitungsdrähte für Maschinen und Apparate Verwendung. Bei diesen Drähten wird die Isolierung, um den Wicklungsraum möglichst gut ausnützen zu können, nur so stark gewählt, als es die vorkommenden Spannungen erfordern, alle stärkeren Drähte erhalten daher nur ein- oder mehrfache Baumwollumspinnung (bei Hochspannung auch Umklöppelung). Die ganz dünnen Drähte sind mit Seide umspunnen. Da der Raumbedarf der Baumwoll- oder Seidenumspinnung bei dünnen Drähten im Verhältnis zum wirksamen Kupferquerschnitt beträchtlich ist, werden in den letzten Jahren diese Umspinnungen auch durch einen gut isolierenden elastischen Lacküberzug ersetzt wie bei den sogenannten Emailliedrähthen, gewöhnlichen Kupferdrähten, die nach einem Tauchverfahren mit einem Emailleüberzug versehen werden. Sie werden für Drahtdurchmesser von 0,07—2 mm hergestellt und bieten neben besonders günstiger Raumausnutzung große Widerstandsfähigkeit gegen Hitze.

(690) **Isolierte Leitungen** sollen mit einer Hülle versehen sein, deren Haltbarkeit und Isolierfähigkeit den vorliegenden Betriebsverhältnissen entspricht.

Als Leitungsmaterial für diese kommt in erster Linie Kupfer, ferner Aluminium, als Isoliermaterial vorwiegend eine nahtlose Gummischicht mit einer Umhüllung aus faserigem, mit isolierenden Stoffen durchtränktem Material in Betracht. Für beide Fälle sind jedoch auch schon Ersatzstoffe mit geringerer Leitfähigkeit bzw. geringerer Isolierfähigkeit in Zeiten der Not verwendet worden (692). Wenn auch selbstverständlich der sichere Betrieb einer elektrischen Starkstromanlage nicht von genormten Leitungsquerschnitten und einer genau in ihrer Stärke und Beschaffenheit vorgeschriebenen Isolierhülle abhängig ist, so werden doch zweifellos die Belange aller Beteiligten am besten gewahrt, wenn solche Normen und Vorschriften vorhanden sind. In Deutschland sind diese schon seit langen Jahren durch den VDE geschaffen, und wer Wert legt auf Anlagen, die den Errichtungsvorschriften entsprechen müssen, darf nur genormtes Leitungsmaterial verwenden, welches auch von dem Verband der Feuerversicherungsgesellschaften vorgeschrieben ist.

(691) Leitungsnormen. Für die nach den Errichtungsvorschriften des VDE auszuführenden Anlagen sind alle zu verwendenden Leitungsarten genormt. Die zurzeit gültigen Normen sind die vom 17. Okt. 1922. Als Leitungsmaterial kommt hierfür mit Ausnahme der im Erdboden verlegten Einleiterkabel, für welche auch Aluminium Verwendung finden kann, nur Kupfer in Betracht. Als eigentliches Isoliermaterial ist Gummi von ganz bestimmter Mischung und Beschaffenheit zu verwenden. Alle genormten Leitungen, die im vollen Umfang den aufgestellten Prüfvorschriften entsprechen müssen, erhalten auf Grund der zwischen den Herstellern, der Vereinigung der EW und der Prüfstelle des VDE getroffenen Vereinbarungen als Kennzeichen in der über der Gummischicht befindlichen Faserumhüllung einen weißen Faden, ferner als Ursprungszeichen für den Erzeuger einen oder mehrere farbige Fäden, die für jede Lieferfirma zu einer anderen Zusammenstellung miteinander verdrillt werden. Die Prüfstelle erteilt die Genehmigung zur Herstellung genormter Leitungen nur auf Grund vorhandener zweckentsprechender und zuverlässig arbeitender Einrichtungen und ist auch zur laufenden Überwachung der Erzeugnisse in der Fabrik berechtigt. Zurzeit dürfen in- und ausländische Fabriken genormte Leitungen herstellen. Das Kennfädenverzeichnis aller Hersteller kann durch die Prüfstelle des VDE (Berlin W. 57, Potsdamerstr. 68) bezogen werden.

Genormt sind für feste Verlegung: Gummiaderleitungen (NGA), Spezialgummiaderleitungen (NSGA), Rohrdrähte (NRA) und Panzeradern (NPA). Die früher viel benutzten Gummi b a n d leitungen (Gba) dürfen nach den neuesten Errichtungsvorschriften des VDE nicht mehr verwendet werden. Genormte Leitungen für Beleuchtungskörper sind Fassungsadern (NFA) und Pendelschnüre (NPL), ferner zum Anschluß ortsveränderlicher Stromverbraucher Gummiaderschnüre (NSA), leichte Anschlußleitungen, und zwar mit Baumwollbeflechtung (NHH) und mit Kordelbeflechtung (NHK), Werkstattschnüre (NWK), Gummischlauchleitungen in leichter (LHZ), verstärkter (VHZ) und starker (SHZ) Ausführung, Spezialschnüre (NSGK), Hochspannungsschnüre (NHRGK) und Leitungstrossen (NLT), schließlich für Erdkabel noch Gummibleikabel und Papierbleikabel. Der Verwendungszweck aller vorgenannten Leitungen ist aus den Normen ersichtlich.

(692) Ersatzstoffe. Der Krieg mit seinem für Deutschland eintretenden Mangel an Rohstoffen, insbesondere an Kupfer und Gummi, zwang zur sparsamsten Benutzung dieser Stoffe und der Verwertung von Ersatzstoffen.

An Metallen für die Leitungsadern kamen hier in Betracht: Aluminium, vorwiegend aber Zink und teilweise auch Eisen. An Stelle von Gummi trat regenerierter Kautschuk und in hervorragendem Maße imprägniertes Papier. Die hohe Isolierfähigkeit von Papier war schon von der Kabelherstellung und ferner auch von der Herstellung säurebeständiger Leitungen bekannt, die nach Art der Hackethaldrähte (689) ihren isolierenden Schutz erhielten. Die äußere Umspinnung

mußte ferner aus Mangel an Baumwolle und Jute durch Papiergarn ersetzt werden. Für alle aus diesen Metallen und Isoliermaterialien hergestellten Leitungen wurden baldigst Normalien aufgestellt, so für gummiisierte Aluminium-, Zink- und Eisenleitungen, für Leitungen mit imprägnierter Papierisolierung, für Panzeradern mit Aluminium- und Zinkleitern usw. Diese Ersatzleitungen haben den an sie gestellten Forderungen entsprochen, nachdem die Eigenheiten der verwendeten Stoffe sowohl bei der Herstellung als auch bei der Verlegung der Leitungen gebührend berücksichtigt wurden. Sie wurden auch für die Übergangszeit noch beibehalten, dürfen jedoch nunmehr keine weitere Verwendung finden für Anlagen, die nach den Vorschriften des VDE herzustellen sind, und werden daher wohl auch kaum noch angefertigt, nachdem sowohl das gut leitende Kupfer, als auch der geeignetste Isolierstoff, Gummi, wieder in genügender Menge erhältlich sind und deren Verwendung trotz der etwas höheren Preise die größte Wirtschaftlichkeit ergibt.

(693) Leitungsverlegung. Der größte Feind einer guten Isolation und damit auch aller elektrischen Leitungen ist die Feuchtigkeit, deren Wirkung um so stärker wird, je mehr chemisch wirksame Substanzen saurer oder alkalischer Natur sie enthält, wie beispielsweise die Ausschwitzung frischen Mauerwerks und in noch höherem Maße die in Brauereien, chemischen Fabriken u. dgl. auftretenden feuchten und ätzenden Dünste. Diese greifen die Isolierhülle der Drähte an, ermöglichen dadurch Fehlerströme, die wiederum elektrolytisch zerstörend auf die Isolierung einwirken und letzten Endes nicht selten erhebliche Schadenbrände zur Folge haben, besonders in landwirtschaftlichen Anlagen. (Siehe ETZ, 1923, S. 353 u. 394. Schneidermann, Der Einfluß mangelhafter elektrischer Anlagen auf die Feuersicherheit besonders in der Landwirtschaft; ferner auch Elektro-Journal 1923, Heft 6. Höchtl, Errichtung elektrischer Anlagen in der Landwirtschaft.)

Zweck einer sachgemäßen Verlegung ist demnach die dauernde Aufrechterhaltung guter Isolation und der Schutz der Leitungen vor schädlichen Einflüssen, besonders solchen chemischer Natur.

Obigen Anforderungen entsprechen nicht das früher sehr beliebte Anheften der Starkstromleitungen mit Metallkrampen sowie die Einbettung der Leitungsdrähte in Holzleisten; diese Verlegungsarten sind daher für nicht betriebsmäßig geerdete Leitungen verboten und unter allen Umständen zu vermeiden. Holzleisten finden nur noch gelegentlich für Passagierschiffe sowie Eisen- und Straßenbahnwagen Verwendung.

Die Leitungsdrähte werden jetzt entweder an besonderen, meist aus Porzellan (bisweilen auch Glas) bestehenden Isolatoren, wie Rollen, Klemmen, Glocken usw., befestigt und frei in bestimmtem Abstände von der Wand gehalten, oder sie werden in Rohre aus Isoliermaterial oder in Metallrohre mit oder ohne isolierende Auskleidung eingezogen, schließlich auch in Form sogenannter Manteldrähte mit Krampen oder Schellen unmittelbar auf der Wand befestigt.

(694) Offene Verlegung. Die freie Verlegung an Rollen, Glocken oder dgl. bietet zwar bei sachgemäßer Ausführung eine sehr gute Isolation und einen hohen



Abb. 391. Isolierrollen auf Eisendübel.



Abb. 392. Verstellbare Rollen auf Eisenschelle.

Grad von Betriebssicherheit, eignet sich aber namentlich des im Lauf der Zeit eintretenden ungefälligen Aussehens halber wenig für bessere Innenräume und findet daher hauptsächlich Verwendung in Werkstätten, Betriebsräumen und Nebenräumen von Wohnungen.

Die Rollen selbst werden, da Holzdübel sich mit der Zeit lockern, jetzt meistens auf eisernen Trägern festgeschraubt (Abb. 391). Eine Konstruktion mit verstellbarer Eisenschelle zum Befestigen an eisernen Trägern zeigt Abb. 392. In gut ausgestatteten Räumen, Wohnzimmern usw. wurden früher die kleineren und besser aussehenden Klemmrollen vorgezogen, an die die Leitung nicht festgebunden, sondern zwischen beiden Teilen des Isolators selbst festgeklemmt wird.

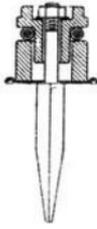


Abb. 393. Klemmrolle mit Stahldübel.



Abb. 394. Kreuzrolle.



Abb. 395. Eckrolle.

Abb. 393 a und b zeigt eine von P eschel (H a r t m a n n & B r a u n) angegebene Klemmrolle auf einem gleichfalls von P eschel angegebenen vierkantigen Stahldübel. Diese Rollen werden besonders bei fester Verlegung von verdrehten Gummiadern angewendet, indem sie zwischen den beiden Leitungsadern hindurchgesteckt werden. Die Vorschriften des VDE gestatten diese Verlegungsweise nicht mehr, da eine Rohrdrahtverlegung (696) bei gefälligerem Aussehen bezüglich des Betriebes einen viel sichereren Ersatz bietet.

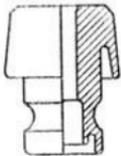


Abb. 396 a.



Abb. 396 b. Mantelrollen.

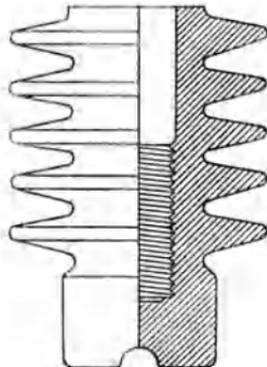


Abb. 397. Rillenisolator.

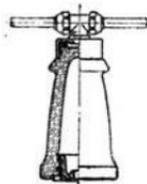


Abb. 398. Glatter Stützisolator.

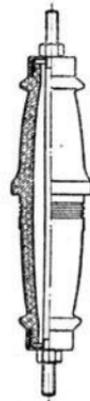


Abb. 399. Glatter Durchführungsisolator.

Für zwei sich kreuzende Leitungen verwendet man sogenannte Kreuzrollen (Abb. 394) und bei Umgehung von Mauerecken, Balken, Trägern u. dgl. Eckrollen (Abb. 395).

In feuchten Räumen genügen gewöhnliche Rollen vielfach nicht, da herabtropfende Feuchtigkeit an jeder Befestigungsstelle Isolationsfehler herbeiführen kann. Hier finden die für solche Räume besonders ausgebildeten Mantelrollen oder Kellerisolatoren Verwendung, an deren äußerem Mantel die Feuchtigkeit abtropfen kann, ohne über die Bindestelle zu fließen, und bei denen die Stromwege für Oberflächenleitung möglichst vergrößert sind (Abb. 396 a und b).

Für Hochspannung sind die sog. Rillenisolatoren (Abb. 397) gebräuchlich, die sowohl zur Verlegung der Leitungen selbst, wie auch beim Apparatebau für Hochspannung in den mannigfachsten Formen angewendet werden. Auch glatte Isolatoren finden hierfür Verwendung (ETZ 1910, S. 51), sei es als einfache Stützisolatoren (Abb. 398), oder als Durchführungsisolatoren (Abb. 399) im Schalttafel- und Apparatebau.

(695) Rohrverlegung. Die weitaus verbreitetste und für verdeckte Leitungsanordnung (unter Putz) allein in Betracht kommende Leitungsführung ist die Verlegung in Rohren. Grundbedingungen für die Brauchbarkeit eines Rohrsystems sind die jederzeitige Zugänglichkeit und Auswechselbarkeit der Leitungsdrähte, Forderungen, die in vollem Umfange zum ersten Male in einem von *B e r g m a n n* ausgearbeiteten System erfüllt worden sind. Alle Rohre gehen hierbei von Abzweigungen oder Dosen aus, in denen die nötigen Verbindungen, Verlötlungen usw. hergestellt werden; in größere Rohrwege sind außerdem noch Zwischen Dosen eingefügt, so daß bei Benutzung genügend weiter Rohre das ganze Rohrsystem für sich allein verlegt werden kann und erst nach Fertigstellung der Bauarbeiten und Austrocknen des Baues die Leitungen nachträglich mit Hilfe eines Stahlbandes eingezogen zu werden brauchen und jederzeit auswechselbar sind. Passende Muffen, Winkel- und Krümmerstücke erleichtern die Montage.

Dieses System läßt sich im Prinzip auf Rohre aus jedem Material anwenden; ursprünglich wurden hauptsächlich solche aus Hartgummi oder Metall benutzt. Hartgummirohre haben den Vorteil, daß sie selbst noch eine isolierende Einbettung für die Leitungsdrähte bieten, sie sind leicht zu hantieren und zu verlegen. Gegen mechanische Beschädigungen bieten sie dagegen keinen Schutz; wo solcher erforderlich, sind Metallrohre vorzuziehen; da diese indessen selbst leitend sind, müssen die Leitungsdrähte besonders gute Isolierung besitzen; es sind daher hierfür nur Gummiaderleitungen zulässig.

B e r g m a n n hat zuerst Isolierrohre in den Handel gebracht, die aus Papier hergestellt und mit Isoliermasse getränkt sind. Jetzt werden solche Papierrohre auch von einer großen Anzahl Firmen, die sich fast alle in dem Verkaufsverband der Isolierrohrfabrikanten zusammengeschlossen haben, hergestellt.

Einfache Papierrohre haben sich bei Verlegung unter Putz nicht bewährt, da sie nach einiger Zeit Feuchtigkeit aufnehmen; sie dürfen daher in dieser Weise nicht verwendet werden und sind auch in feuchten Räumen unzulässig. Sie erhalten meistens eine Metallhülle als Schutz, die entweder aus umfalztem dünnem Messing- oder Stahlblech, neuerdings häufig aus verbleitem Stahlblech oder aus stärkerwandigen Stahlrohren besteht (*Panzerrohr*). Da der dünne Mantel der umfalzten Rohre von der Mauerfeuchtigkeit verhältnismäßig leicht angegriffen wird, versieht man ihn vor der Verlegung unter Putz mit einem Schutzanstrich von Mennige, Asphalt oder Emaillelack. Widerstandsfähiger, vor allem auch gegen mechanische Beschädigung, ist unter allen Umständen das Panzerrohr.

Da in größeren Rohrnetzen sich leicht Feuchtigkeit niederschlägt, ist mit Sorgfalt darauf zu achten, daß die Rohre mit Gefälle verlegt werden und solche Stellen, an denen Schwitzwasser sich ansammeln kann (Wassersäcke), nicht vorkommen. Das bereits erwähnte nachträgliche Einziehen der Leitungen in das vollkommen fertig verlegte Rohrsystem ist stets vorzuziehen, in Neubauten aber dringend notwendig. Werden in letzterem Falle die Drähte mit den Rohren zugleich verlegt, so verursacht das auftretende Schwitzwasser, auch wenn keine Wassersäcke vorhanden sind, ein Stocken mit nachfolgender völliger Zerstörung der Isolation der Leitungen. Es empfiehlt sich dringend, nach erfolgter Rohrverlegung und Fertigstellung des Wandverputzes von allen Abzweigdosen und Schaltdosen die Deckel zu entfernen und für vollkommene Öffnung aller Rohrenden Sorge zu tragen, damit bis zum Einziehen der Leitungen, welches nicht früher als unbedingt nötig erfolgen sollte, eine ausreichende Durchlüftung und Austrocknung des Rohrsystems im Innern eintritt.

Die Rohre werden in Baulängen von etwa 3 m hergestellt; die einzelnen Längen werden unter sich durch übergeschobene und verkittete Muffen aus Messing oder Eisenblech verbunden. Die Rohre mit umfalztem Metallmantel können mittels besonderer Biegezeugen (Abb. 400) in beliebigen Kurven gebogen werden; für die am häufigsten vorkommenden Kurven und Winkel werden auch besondere Formstücke (Ellbogen, Kröpfungs- und Übergangsbogen) angefertigt (Abb. 401). An Winkel- und Abzweigstellen können auch aufklappbare Winkel- und T-Stücke Verwendung finden, die den Zugang zu den Leitungen ermöglichen (Abb. 402). Für die verschiedenen Arten von Leitungsverzweigungen werden Ab-



Abb. 400. Biege-
zange für Isolierrohr.

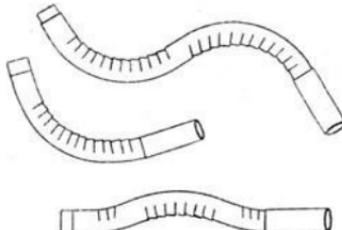


Abb. 401. Isolierrohr-Formstücke.

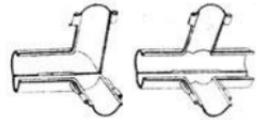


Abb. 402. Aufklappbare
Winkelstücke.

zweig- und Schaltdosen benutzt, die aus Porzellan, Hartgummi, Papiermasse oder künstlichen Isoliermaterialien mit oder ohne Metallüberzug, schließlich auch aus Gußeisen hergestellt werden (Abb. 403). Innerhalb dieser Dosen werden vielfach Unterlegstücke aus Porzellan montiert, welche die Abzweigmuffen tragen und voneinander isolieren (Abb. 404). Die Verlegung der Stahlpanzerrohre ist ähnlich

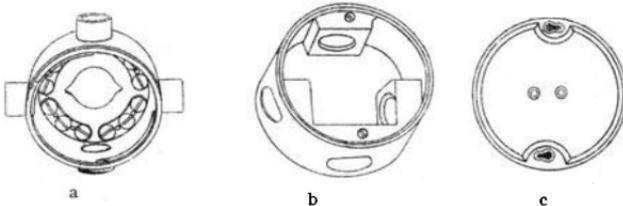


Abb. 403. Abzweigdose für Isolierrohr.

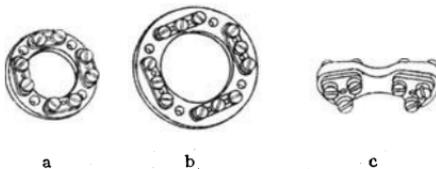


Abb. 404. Porzellan-Unterlagstücke zur Verwendung in Abzweigdosen.

wie bei Gasrohren; die Rohre werden durch Verschraubung verbunden, die Verbindungs- und Abzweigdosen sind gleichartig, jedoch kräftiger gehalten, vielfach aus Gußeisen (Abb. 405). Die Rohre werden auf der Wand mit Rohrschellen befestigt (Abb. 406).

Bei Unterputzverlegung läßt sich dadurch viel an Rohrmaterial sparen, daß die Leitungen nicht lot- und winkelrecht, sondern durch Wahl des kürzesten Weges schräg verlegt werden.

In der Absicht, etwa sich bildender Feuchtigkeit die Möglichkeit des Abflusses oder der Aufsaugung durch das Mauerwerk zu bieten, finden auch dünnwandige, längsgeschlitzte und dadurch federnde Metallrohre Verwendung. Auf diesem Material hat Peschel ein Installationssystem aufgebaut (ETZ 1902), das besonders dadurch eine Vereinfachung erstrebt, daß nur die eine Stromleitung aus gut isoliertem Drahte besteht, während das Metallrohr selbst, eventuell unter Zuhilfenahme eines miteingezogenen blanken Drahtes, als geerdete Rückleitung dient. Für Verteilungssysteme ohne geerdeten Leiter bieten die Schlitzrohre ein gutes und bequem zu montierendes Schutzmittel gegen mechanische Beschädigung.

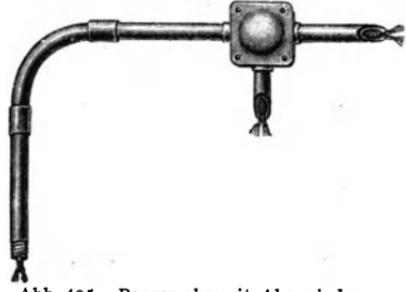


Abb. 405. Panzerrohr mit Abzweigdose.

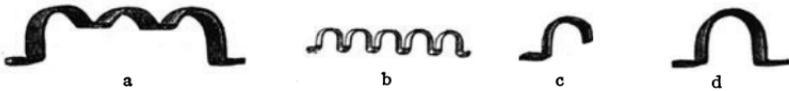


Abb. 406. Rohrschellen.

Bei dem Peschel'schen Rohrsystem werden die geschlitzten Stahlrohre durch übergeschobene Muffen (Abb. 407) federnd verbunden. Die Abzweigdosen, Winkel- und T-Stücke für dieses System sind in den Abb. 409 u. 410 dargestellt. In manchen Fällen wird bei diesem System die Rohrleitung als Rückleitung benutzt; es kann hierdurch eine Drahtleitung erspart werden (siehe Abb. 411). Das Abschneiden von Rohren auf besondere Länge bei der Montage bedingt ein sorgfältiges Beseitigen des durch das Abschneiden entstehenden inneren Grates, der sonst beim Einziehen der Leitungen die Isolation verletzt.

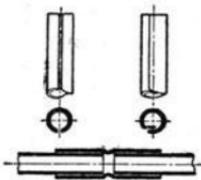


Abb. 407. Peschel-Rohr mit Verbindungsmuffe.

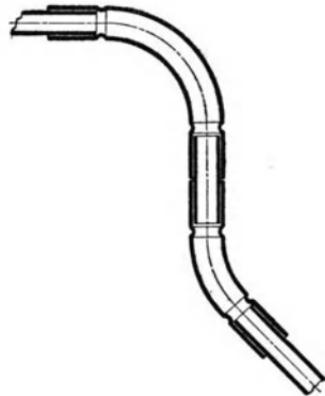


Abb. 408. Krümmer für Peschel-Rohr.

Eine ganz neue Leitungsverlegung in Rohren wurde durch das Gojunco-Installationssystem von der Gojunco-Compagnie A.-G., München, Salvatorplatz 1, geschaffen. Durch dieses wird die Herstellung von Rohrinstal-

lationen nicht unerheblich vereinfacht und verbilligt. Durch ein äußerst sinnreich konstruiertes Ziehwerkzeug (Abb. 412) werden aus beiderseitig gut verbleiten, verschieden breiten Eisenbändern erst am Montageort die Rohre verschiedenen Durchmessers von 7—13 mm auf die erforderliche Länge bis zu 20 m hergestellt. Da die Eisenbänder stärker sind als die Metallmäntel der gewöhnlichen Isolierrohre, wird hierdurch ein größerer mechanischer Schutz erzielt. Weitere Vorteile sind geringer Verschnitt infolge Herstellung großer Längen, äußerst verminderte

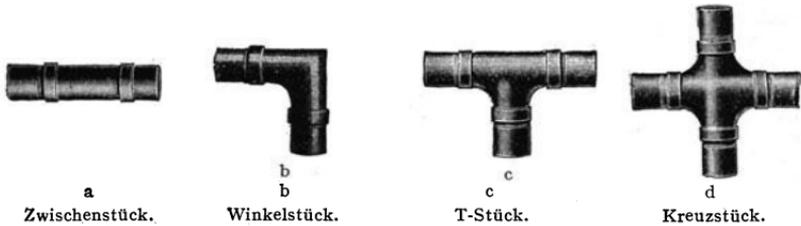


Abb. 409. Leichte Rohrverbindungsstücke aus Blech für Verlegung von Peschelrohr auf der Wand.

Lagerhaltung bei geringem Raumbedarf und niedrigsten Transportkosten und schließlich ein sehr gefälliges Aussehen. (Siehe Mitteilungen der Vereinigung der Eltwerke 1923, S. 234.) Wenn auch das mit diesem Werkzeug, zu welchem noch eine besondere Biegezange und eine Abschneidezange gehören, hergestellte



Abb. 410. Zwischen- und T-Stück aus Gußeisen für Verlegung von Peschelrohr auf und in der Wand.

Material, weil neu, vorläufig noch nicht als verbandsmäßig erklärt werden konnte, so hat sich andererseits der VDE doch dahin geäußert, daß auf Grund des § 26 der Errichtungsvorschriften gegen die Verwendung dieses neuen, mit allen notwendigen Verbindungs-

und Abzweigstücken ausgebildeten Systems kein Einwand besteht. Das Ziehwerkzeug ist so ausgebildet, daß gewünschten Falles die Leitungsdrähte in die Rohre gleich mit eingelegt und in diesem Fall auch Manteldrähte nach (696)

hergestellt werden können. Bei Herstellung der Rohre allein ist das nachträgliche Einziehen sowie die Auswechslung der Drähte wie bei jedem anderen Rohrsystem möglich. Auch bei diesem System kann die Rohrleitung als Rückleitung Verwendung finden. Die erste umfangreiche Anlage nach diesem neuen System ist im Deutschen Museum in München zur Ausführung gelangt.

Abb. 411. Leitungsabzweigung zum einpoligen Ausschalter in einem T-Stück bei Verwendung der Rohrleitung als Rückleitung.

Für alle Rohrverlegungen ist von größter Wichtigkeit, daß die Querschnitte der Rohre reichlich groß bemessen und alle scharfen Biegungen

vermieden werden; die beste Kontrolle hierüber besteht in dem nachträglichen Einziehen der Leitungen nach Verlegung des gesamten Rohrnetzes. Hierbei ist auch darauf zu achten, daß die Leitungen sowohl vor dem Einziehen wie auch bei diesem namentlich am Ein- und Ausgang der Rohre vor Beschädigungen

geschützt werden, weshalb an den letztgenannten Stellen Rohrendhülsen Verwendung finden müssen.

(696) Manteldrähte (Rohr- und Falzdrähte). Diese zuerst von K u h l o hergestellten und zu einem besonderen Verlegungssystem ausgebildeten Leitungen haben über dem Leiter (Kupfer, Aluminium, Zink, Eisen) eine Gummi- oder eine imprägnierte Papierhülle, die noch von einer weiteren Isolierschutzhülle (bei Mehrleitern gemeinsam, s. Abb. 413b) umgeben ist. Der den Draht fest einschließende Mantel mit Falz (ursprünglich nahtlose Rohrhüllen) wird aus den verschiedensten Metallen (außer Blei) hergestellt. Solche Drähte dürfen mit Schellen direkt auf

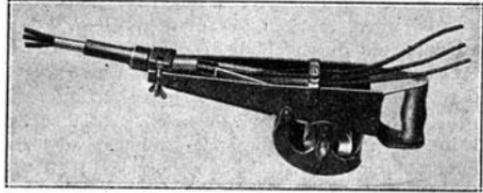


Abb. 412. Gojunco-Werkzeug zur Herstellung von Rohren und Rohrdrähten.

Wänden in trockenen Räumen verlegt werden; sie erfordern eine gewisse Geschicklichkeit bei der Montage, können aber dafür ziemlich unauffällig verlegt werden. Sie finden mit Vorliebe Verwendung in Anlagen mit geerdetem Mittelleiter, wobei ihre Metallhülle als Rückleitung dient. Die Garniturteile sind in ihren Abmessungen kleiner, jedoch ähnlich gehalten wie diejenigen für Rohrinstallation (Abb. 414).

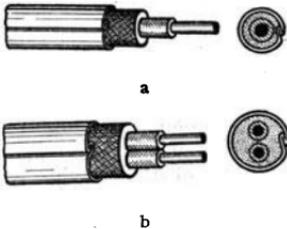


Abb. 413. Falzdrähte.

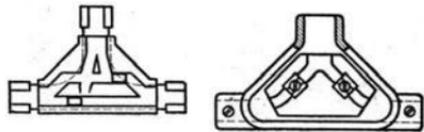


Abb. 414. Abzweigklemmen für Falzdrähte.

Die Herstellung solcher Manteldrähte am Montageort gestattet das Gojunco-Installationssystem [(695), S. 513].

Apparate in elektrischen Anlagen.

(697) Normen des VDE. Die wesentlichsten, in elektrischen Anlagen verwendeten Apparate, wie Aus- und Umschalter, Steckvorrichtungen, Sicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz, Fassungen, Verteilungstafeln und Handlampen waren in den letzten Jahren Gegenstand besonders sorgfältiger Bearbeitung seitens der Installationskommission des VDE, welche nicht nur die Erzeugerkreise, sondern auch alle beteiligten Verbraucherkreise umfaßt. Der Niederschlag aller auf diesem Gebiete gesammelten Erfahrungen ist in den mit Gültigkeit vom 1. Juli 1922 erlassenen Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial und in einer Reihe besonderer Normalien für einzelne Gattungen von Apparaten zusammengefaßt.

Die von dem VDE festgelegten Grundsätze sichern nicht allein die konstruktive Zuverlässigkeit des einzelnen Apparates, sie arbeiten auch auf eine allmähliche Vereinheitlichung aller zurzeit in Form und Durchbildung noch verschiedenen Systeme hin, um mit technischer Vervollkommnung auch die Gleichartigkeit der Formen aller wichtigen Apparate als letztes Ziel zu erstreben. In dieser Richtung ist durch K l e m e n t und P a u l u s dadurch ein bedeutender Schritt nach vorwärts getan, daß diese sich der außerordentlichen Arbeit unter-

zogen, alle bestehenden Konstruktionen der verschiedenen Apparate durch Wort und Bild in ihrem Buch „Zur Vereinheitlichung der elektrotechnischen Starkstrominstallation“ 1. Kapitel: Haus- und Wohnungsanschlüsse (Berlin, Julius Springer), den Erzeugern und Abnehmern vor Augen zu führen unter gleichzeitiger Anregung, aus dieser Vielseitigkeit der Formen und Konstruktionen die konstruktiv besten und wirtschaftlich geeignetsten zur Schaffung von Normen auszuwählen.

Diese Anregungen veranlaßten die AEG zur Herstellung eines bis in alle Einzelheiten durchgebildeten Einheitsmaterials von Drehschaltern, Steckdosen, Steckern und Abzweigdosen, das in Nr. 313 der Mitt. der Vereinigung der Eltwerke, Jahrg. 1922, ausführlich beschrieben ist.

Auch die Stotz G. m. b. H., Abt. der Brown, Boveri u. Co. A.-G. Mannheim, hat auf Grund dieser Bestrebungen den neuesten Richtlinien entsprechende Drehschalter und Steckdosen hergestellt (BBC-Mitteilungen 1923, Heft 8).

In den Verbandsnormalien sind für Dosenschalter (Aus- und Umschalter), Steckvorrichtungen, Fassungen mit Hahn, Sicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz, die Konstruktion, Nennstromstärken, die Nennspannungen und die Prüfspannungen, Prüfstrom festgesetzt. Wichtig hierbei ist, daß die unterste Grenze der Gebrauchsspannung für diese Apparate 250 V beträgt und diese für Sicherungen mit geschlossenem Schmelzeinsatz sogar auf 500 V festgesetzt wurde. Für Steckvorrichtungen sind wegen der Bauart und der Abmessungen genaue Bestimmungen getroffen. In ähnlicher Weise sind Hebelschalter, Ölschalter und offene Schmelzsicherungen soweit als möglich genormt. Die Betriebssicherheit der Anlagen ist hierdurch bedeutend gehoben.

(698) **Aus- und Umschalter** dienen zur Ein- und Ausschaltung von Stromkreisen und Verbrauchsapparaten bzw. zu deren Umschaltung, d. h. zur Änderung ihrer Verteilung und Gruppierung. Man unterscheidet zwei Hauptgruppen:



Abb. 415. Sockel zum neuen Drehschalter ohne Federn der Stotz G. m. b. H., Mannheim.



Abb. 416. Sockel mit eingesetztem drehbarem Teil des Drehschalters der Stotz G. m. b. H.

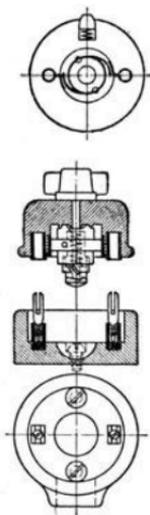


Abb. 417 a, b. Zeta-Drehschalter (SSW).

1. **Dosenschalter**, überwiegend für geringere Energiemengen bemessen, die hauptsächlich in Licht- und Kraftanlagen privater Stromabnehmer Verwendung finden.

2. **Hebelschalter** für größere Verbrauchsapparate in technischen Betrieben sowie zur Umschaltung stark belasteter Stromerzeuger und Leitungsgruppen.

Die Dosenschalter, vorwiegend als Drehschalter ausgebildet, sind Massenartikel; sie werden meist von wenig sachverständigem Personal gehandhabt und müssen daher einfach und dauerhaft sein. Auf den Schutz der unter Spannung stehenden Teile vor zufälliger Berührung ist besondere Sorgfalt zu verwenden. Abb. 415 und 416 zeigt die neueste Konstruktion der Stotz

G. m. b. H., Abb. 417 a und b einen sogenannten Zeta-Schalter der SSW. Letzterer besteht aus zwei Teilen, der untere b wird mit den Leitungen zugleich fest verlegt, der obere a nachträglich aufgesetzt und ist nach Eindringen einer Feder wieder abnehmbar.

Die Hebelschalter müssen in erster Linie ihrem besonderen Zwecke entsprechend sorgfältig durchgebildet sein, zumal wenn sie für große Stromleistungen bestimmt sind. Hebelschalter haben normalerweise den Bedürfnissen des täglichen Betriebes zu entsprechen, bieten aber häufig auch die letzte Möglichkeit, schwere Betriebsstörungen abzuwenden (Kurzschluß, Überlastung usw.). Besonders der letzte Gesichtspunkt ist von Einfluß auf ihre Konstruktion und auf ihre örtliche Anordnung. Für Betriebe mit besonders großen Stromstärken und höheren Spannungen (500—750 V) verwendet man am besten Ölschalter (708), die auch als Selbstausschalter und Fernschalter gebaut werden.

Für Konstruktion und Ausführung von Hebelschaltern ist folgendes wichtig:

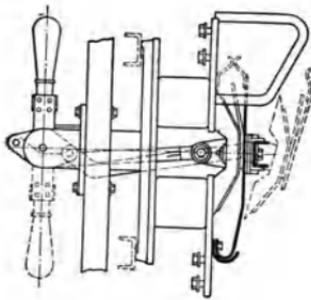


Abb. 418. Hebelschalter mit Funkenlöschung (Voigt & Häffner).

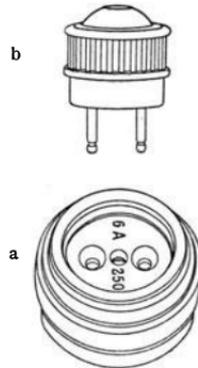
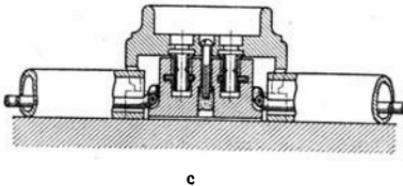


Abb. 419a. b.



c



d

Abb. 419 a—d. Normale Steckvorrichtung mit Rohranschluß (AEG).

Die Kontaktflächen sollen groß und eben sein, im Kontakte müssen die Flächen mit großer Kraft festgehalten werden.

Man kann im allgemeinen auf 1 cm² einseitige Kontaktfläche 5 A Normalstromstärke rechnen, bei spezieller konstruktiver Durchbildung, beispielsweise bei gut unterteilten federnden Kontakten, erheblich mehr, unter Umständen bis 30 A.

Um den zerstörenden Einfluß der Funkenbildung bei der Ausschaltung unschädlich zu machen, werden bisweilen zwei Unterbrechungsstellen nebeneinander verwendet; die eine, aus Metallflächen gebildet, dient zur Herstellung des eigentlichen innigen Kontaktes; diese wird bei der Ausschaltung zuerst unterbrochen. Ihr parallel geschaltet besteht ein zweiter Kontakt aus zwei gegeneinander gepreßten Kohlenstäben oder Blöcken, bei deren Unterbrechung erst sich der Ausschaltungsfunkte bildet (Abb. 418); noch besser wird die schädliche Einwirkung der Funkenbildung an den Unterbrechungskontakten bei den Ölschaltern vermieden,

da hier die Ausschaltung unter Luftabschluß erfolgt und die auftretenden Funken durch das Öl ganz erheblich verringert werden (708).

Eine besondere Art von Selbstschaltern sind die in den letzten Jahren als sogenannte Überstromschalter gebauten Kleinschalter von Voigt & Häffner, AEG und SSW, welche in erster Linie durch sofortige Unterbrechung des Stromkreises bei einer Überlastung das im allgemeinen sonst eintretende Abschmelzen der Sicherungseinsätze verhindern sollen. Sie finden hauptsächlich Verwendung in technischen Anlagen, bei welchen öfters vorübergehende Überlastungen eintreten und ersparen den Betrieben Zeit und Kosten. Näheres hierüber: Ely, Überstromschalter statt Stöpselsicherung, Mitt. d. Ver. d. EW 1922, S. 291, und Graf: Installationsautomaten, ebenda 1923, S. 383.

(699) Steckvorrichtungen. Für diese dem Anschluß ortsveränderlicher Stromverbraucher (Lampen, Motoren, Koch- und Heizgeräte) dienenden Einrichtungen gibt es eine Reihe von Konstruktionen. Für die gewöhnlichen 2- und 3-poligen Wandsteckvorrichtungen für Stromstärken von 6, 25 und 60 A und Spannungen von 250, 500 und 750 V sind Prüfvorschriften und Normen gültig vom 1. Juli 1922 aufgestellt, aus denen die Unverwechselbarkeit, die Unmöglichkeit der unbeabsichtigten Berührung spannungsführender Teile und die Zugentlastung der beweglichen Leitungen aufnehmenden Anschlußstellen besonders hervorzuheben sind. Die neuesten Richtlinien der Kommission für Installationsmaterial, welche vom VDE jedoch noch nicht angenommen sind, sehen Stecker mit 5 mm starken statt wie bisher mit 4 mm starken Stiften vor und bestimmen, daß diese nicht wie bisher durch Schlitzung federnd ausgeführt werden, sondern ungeteilt, und daß umgekehrt die in den Wandsteckvorrichtungen befindlichen Kontakt-hülsen zur Aufnahme der Stifte zweiteilig federnd ausgeführt sein müssen. Eine weitere Forderung bestimmt, daß solche Wandsteckvorrichtungen auch mit Sicherungen, deren Schmelzpatronen ohne Abnahme der Steckvorrichtungskappe einzusetzen sind, ausgeführt werden können. Allen diesen Forderungen entsprechen bereits die neuen Konstruktionen der AEG und der Stotz G. m. b. H. Eine Wandsteckvorrichtung neuester Konstruktion der AEG mit von vorn einsetzbarer einpoliger Sicherung zeigt Abb. 419 a bis d. Für die in feuchten Räumen zu verwendenden Steckvorrichtungen bestehen besondere Konstruktionen in wasserdichter Kapselung. Eine kräftige Ausführung und Sonderkonstruktion bedingen auch die Steckvorrichtungen zum Anschluß ortsveränderlicher größerer Motoren in schweren Betrieben und in der Landwirtschaft (Dreschmotoren). Derartige Sonderausführungen auf Grund der neuesten Forderungen stellt die Richter, Dr. Weil & Co. A.-G., Frankfurt a. M., her. (Abb. 420).

In besonderen Fällen, z. B. für Räume, in denen explosible Gase entstehen können und daher eine Funkenbildung vermieden werden muß, sind Steckvorrichtungen zu verwenden, die nur im stromlosen Zustand bedient werden können. Dieser Forderung wird genügt durch Zusammenbau mit einem Ausschalter, der in zwangläufiger Verbindung mit der Steckvorrichtung besteht.

(700) Fassungen. Alle Fassungskonstruktionen müssen den §§ 34—45 der Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial entsprechen. Von den verschiedensten Systemen von Lampenfassungen hat dasjenige die größte Verwendung gefunden, welches mit dem Edisongewinde versehen ist (Abb. 421). Bei dem Bau der Fassungen ist anzustreben, daß jeder Grat vermieden wird, da er die Isolierung der Drähte zerschneidet und zu Körperschluß Anlaß gibt. Ferner ist darauf zu achten, daß die Anschlußdrähte derart befestigt werden, daß sie auch bei nicht ganz sorgfältiger Montage den Fassungs-mantel nicht berühren können. Dies gilt besonders für das Einziehen von Schnüren. Wegen der Schwierigkeit, sämtliche Litzenenden unter die Klemmschrauben zu bringen, empfiehlt sich die Verlötlung der einzuklemmenden Litzenenden. Die Verlötlung kann erspart werden durch Verwendung der neuerdings konstruierten „Sigma-Kontaktösen“ der Stotz G. m. b. H. Mannheim. Man strebt deshalb

danach, den inneren Teil der Fassung mit isolierender Auskleidung zu versehen. Da die Berührung von Fassungen, welche mit Körperschluß behaftet sind, unter Umständen gefährliche Folgen haben kann, sind für Handlampen, wie überhaupt in feuchten und durchtränkten Räumen, Fassungen zu verwenden, deren äußere Teile aus Isoliermaterial (Porzellan, Steingut u. dgl.) bestehen. Forderungen für Handlampen siehe § 48 der Konstruktions- und Prüfungsvorschriften.



Abb. 420. Gußeiserne wasserdichte Steckdose mit Deckel von Richter, Dr. Weil & Co. A.-G., Frankfurt.

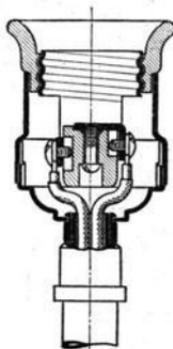


Abb. 421. Normalfassung.



Abb. 422. Savafassung (im Innern des Fassungsmantels federnd verschiebbarer Fassungsring).

Um die Berührung unter Spannung stehender Teile an der Glühlampe selbst zu verhindern, erhalten die Fassungen einen Fassungsring aus Isoliermaterial, welcher die Metallteile des Lampensockels umfaßt. Da besonders bei den neueren Metallfadlampen, diese Metallteile eine ziemliche Ausdehnung besitzen, ist auf Verwendung richtig bemessener Fassungsringe besonderer Wert zu legen.



Steckdose, geschlossen.

Sicherungseinsatz.

Sockel zur Steckdose.

Abb. 423. Neueste Wandsteckvorrichtung der AEG.

Einen vollkommenen Schutz gegen Berührung spannungsführender Teile des Lampenfußes, namentlich beim Ein- und Ausschrauben der Lampen, bieten auch diese Fassungsringe nicht. Durch Normung der Lampenfüße einerseits und durch Schaffung einer einwandfreien Schutzfassung andererseits sollen die immer wieder durch ungenügenden Berührungsschutz eintretenden Unglücks- und Todesfälle vermieden werden. Die von der AEG seit einigen Jahren hergestellte Sava-

fassung (schließt automatisch Verletzungen aus) ist eine solche, die den neuesten Forderungen dadurch entspricht, daß der den Sockel der Lampe völlig umschließende Fassungsring im Fassungs-mantel federnd verschiebbar angeordnet wurde. Abb. 422. Anregungen für weitere Konstruktionen einer durchaus einwandfreien Normalschutzfassung gibt Ely, ETZ 1923, S. 431.

Zum Teil werden die Fassungen mit einem kleinen Ausschalter versehen (Hahnfassungen); die Unterbringung dieser Vorrichtung in dem an sich beschränkten Raume der Fassungen bietet jedoch gewisse Schwierigkeiten, und man wird aus diesem Grunde mit der Zeit Hahnfassungen zu vermeiden suchen.

Schmelzsicherungen für Installationen.

(701) **Schraub-sicherungen.** Das erste vollständig durchgebildete System, Sicherungsstöpsel mit Schraubgewinde, rührt von Edison her. Die im folgenden dargestellten Formen entsprechen den Konstruktionen der A E G, die dieses System

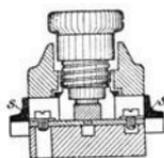
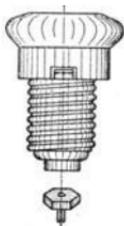
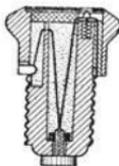


Abb. 424 u. 425. Normalelement für Edison-Sicherungen (AEG).

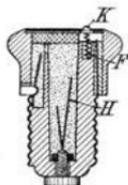
Abb. 426. Normalelement für Edison-Sicherungen im Schnitt.



a



b



c

Abb. 427 a bis c. Edison-Sicherungsstöpsel, normales Modell.

übernommen und nicht verlassen hat. Dasselbe ist daher auch für alle vier vorhandenen Größen normalisiert. Man unterscheidet Mignon-, Normal-Edison-, Großes Edison- und Goliath-Edisongewinde. Die beiden letzteren Gewinde wurden für die in den letzten Jahren hergestellten größeren Metalldrahtlampen erforderlich.

Bei den Schraubstöpseln wird die Unverwechselbarkeit durch die verschiedene Länge der Stöpsel gewährleistet, sowie durch Kontaktschrauben gleichfalls verschiedener Höhe, die in die Sammelschienen der einzelnen Sicherungselemente eingeschraubt werden. Die Länge der Stöpsel von ihrer Auflagefläche bis zum Widerlager am Stöpselkopfe, ebenso wie die Höhe der Kontaktschrauben, sind derart bemessen, daß Stöpsel für eine höhere Betriebsstromstärke, als der eingesetzten Kontaktschraube entspricht, mit letzterer keinen Kontakt machen.

Abb. 424 zeigt ein Sicherungselement für Edisonstöpsel, Abb. 425 dasselbe mit abgehobenem Deckel, Abb. 426 ein solches im Schnitt mit eingesetztem Stöpsel. In dem letzten Falle ist auf die Sammelschienen beiderseitig ein isolierendes Schutzplättchen *s* aufgeschraubt, welches verhindern soll, daß die unter Spannung stehende

Sammelschiene seitlich berührt werden kann. Abb. 427 a zeigt einen Edisonstöpsel bis 500 V der AEG nebst einer Kontaktschraube, Abb. 427 b einen solchen Stöpsel im Schnitt, und zwar umgekehrt, Abb. 427 c denselben in abgeschmolzenem Zustande. In letzterem Falle hat der gleichfalls abgeschmolzene Hilfsdraht *H* die Kennmarke *K* freigegeben, und letztere tritt, getrieben durch die Feder *F*, aus dem Deckel des Stöpsels hervor, so daß durch Betasten auch im Dunkeln sich erkennen läßt, ob die Sicherung unversehrt ist oder abgeschmolzen. Die Sicherungen bis 250 V unterscheiden sich von den vorgenannten äußerlich dadurch, daß die Kennvorrichtung lediglich aus einem Draht hinter einem Glimmerfenster besteht, das Erkennen des Durchschmelzens daher nicht so leicht ist. Abb. 428 zeigt den großen Edisonstöpsel, welcher bis 60 A hergestellt wird.

Außer den Edisonsicherungen fertigt die AEG noch zwei Arten von Schmelzpatronen an, die aus einem Porzellankörper bestehen, in den luftdicht mit entsprechender Füllung silberne Schmelzdrähte eingebettet sind. Der Porzellankörper trägt wieder ein Fenster mit Kenndraht, die Patronen erhalten entweder Kabelschuhe zum Einschrauben in Sicherungsböcke (Abb. 429 a und b) oder einfache Kupferlamellen zum Einschieben in federnde Kontakte.

(702) Patronensicherungen. Die Siemens-Schuckertwerke fertigen Sicherungen in Patronenform. Abb. 430 zeigt eine Patrone Type SP mit

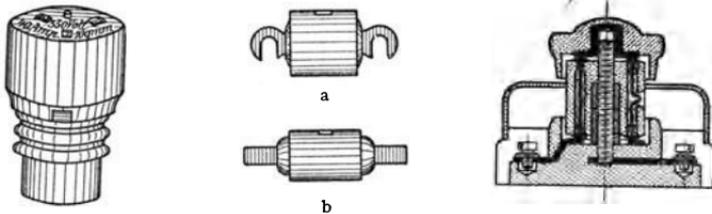


Abb. 428. Edison-Sicherungsstöpsel, großes Modell. Abb. 429a. Schmelzpatronen zum Einschrauben, b für Federkontakt. Abb. 430. Patronensicherung System Pa (SSW).

dem zugehörigen Patronenfuß im Schnitt (Ringbolzensicherung). Die Unverwechselbarkeit der Patrone wird durch verschieden große Aussparungen in ihrer Mitte erreicht, denen entsprechende Ansätze auf dem Patronenbolzen gegenüberstehen. Letztere werden durch 5 mm hohe Stellmuttern gebildet; jeder Normalstromstärke entspricht eine bestimmte, auf der zugehörigen Patrone angegebene Zahl solcher Muttern. Die Patronen enthalten silberne Schmelzdrähte, die in ihrer ganzen Länge im Innern der nach außen völlig abgeschlossenen Porzellanpatronen liegen. Parallel zum Schmelzdraht ist ein außen sichtbarer Kenndraht angeordnet, der erkennen läßt, ob die Sicherung noch unverletzt oder durchgeschmolzen ist.

Abb. 431 stellt eine Freileitungssicherung auf Isolator dar, bei der der Patronendeckel schutzglockenartig ausgebildet ist.

Die Patronen HP (Abb. 432) erhalten außer den normalen noch eine größere unterste Stellmutter, die das Einsetzen der für niedrigere Spannungen bemessenen Patronen unmöglich macht.

Die Patronen P III werden nicht durch Schraubvorrichtungen befestigt, sondern mit ihren Stirnflächen zwischen zwei schwach geneigte Flächen der Anschlußkontakte (Keilkontakte) gepreßt. Die Unverwechselbarkeit wird dadurch erzielt, daß der eine Kontakt der Patrone für verschiedene Stromstärken verschiedene Formen besitzt, während der Sicherungskörper ein mit entsprechender Durchgangsöffnung versehenes Einsatzstück aus Metall erhält.

Abb. 433 zeigt eine Patrone für sich, Abb. 434 eine solche eingesetzt in das zugehörige Sicherungselement mit seinen Kontaktstücken.

(703) Normalsicherungen. Außer den beschriebenen beiden Sicherungssystemen sind von verschiedenen Firmen noch eine ganze Anzahl anderer hergestellt worden, die indessen keine erhebliche Verbreitung gefunden haben. Immerhin ist eine solche Vielfältigkeit unerwünscht, und es richteten sich daher die Bestrebungen der Vereinigung der Elektrizitätswerke auf Vereinheitlichung der Sicherungen als des wichtigsten Installationsmaterials.

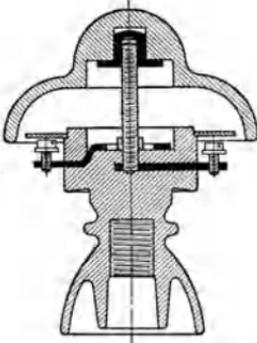


Abb. 431. Freileitungssicherung (SSW) ohne Patrone.

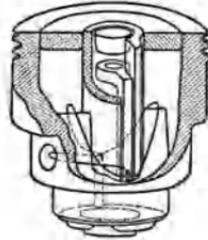


Abb. 432. Schmelzpatronen System HP (SSW).

Eine Neukonstruktion der SSW, die in einer zweiteiligen Sicherung die Vorteile des Edison'schen Schraubstößels und der Walzenpatrone zu vereinigen sucht, gab Anlaß zu sorgfältigen Versuchen, auf Grund deren ein System zustande kam, das von den Firmen AEG, SSW und Voigt & Häffner

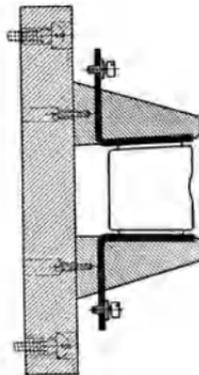
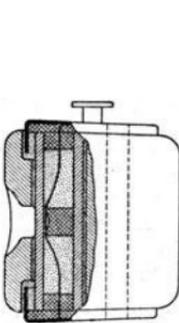


Abb. 433 u. 434. Sicherungspatronen System P III (SSW).

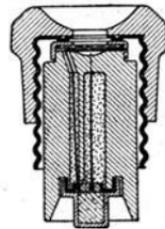


Abb. 435. Normale zweiteilige Sicherung System DL (AEG).

hergestellt wird und von der Vereinigung der Elektrizitätswerke und vom VDE als Normalsicherung anerkannt worden ist.

Die wichtigsten Grundzüge dieses Systems von Einheitssicherungen sind folgende:

1. Die Sicherung besteht aus einem Stößelkopf mit Edison-Schraubgewinde und einer auswechselbaren Walzenpatrone.

2. Die Schmelzpatronen werden durchweg für die Spannung 500 V hergestellt.
3. Die Unverwechselbarkeit wird erreicht durch verschiedene Durchmesser des Fußkontaktes der Patrone.
4. Alle Patronen sind mit Kennvorrichtung versehen, die das Abschmelzen einer Sicherung äußerlich sichtbar machen.

Abb. 435 zeigt eine solche von der AEG hergestellte Einheitssicherung mit Edison-Normalgewinde. Die Unverwechselbarkeit ist außer durch den Durchmesser des Fußkontaktes noch durch verschiedene Höhe der Patronen gewahrt.

Die neuen Patronen sind daher ohne weiteres auch in dem alten Sicherungselement und mit den bisherigen Kontaktschrauben verwendbar.

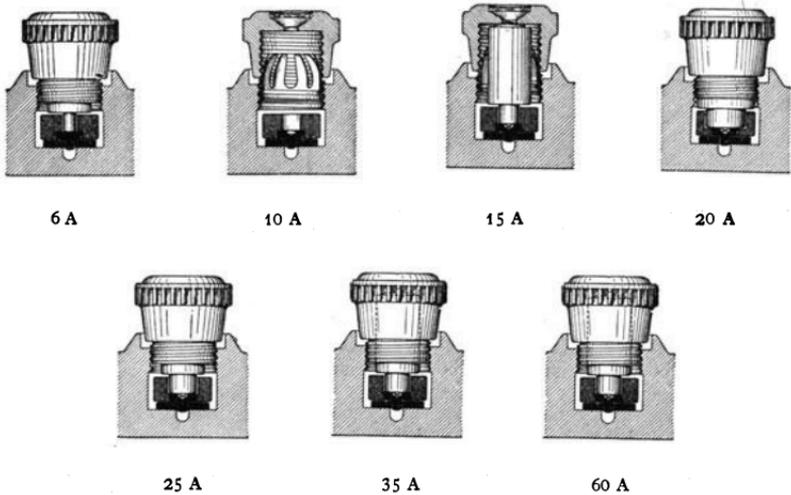


Abb. 436. Normale zweiteilige Diazedsicherungen (SSW).

In Abb. 436 ist eine Reihe Einheitssicherungen der SSW dargestellt von 6—60 A. Die Höhe der Patronen ist für alle Stromstärken gleich, im Hinblick auf die höheren Stromstärken von 35 und 60 A ist das große Edison-Gewinde verwendet.

Der weitere Ausbau dieser Einheitssicherungen ist zwischen den in Betracht kommenden Firmen vereinbart. Die Sicherungen für höhere Stromstärken erhalten gruppenweise wachsenden Durchmesser, zurzeit werden solche für Stromstärken bis 200 A bereits hergestellt.

(704) Mehrfachversicherungen. Die nicht unerheblichen Kosten eines Schmelzeinsatzes und namentlich der Mangel an Porzellan während des Weltkrieges führten zur Neukonstruktion eines Schmelzeinsatzes, der mehr als einmal verwendet werden konnte, ohne neue Schmelzdrähte einziehen zu müssen. Der den Schmelzdraht einschließende walzenförmige Teil des Einsatzes erhielt zu diesem Zweck mehrere Schmelzräume, welche je einen Schmelzdraht für die betreffende Stromstärke in sich aufnehmen. Es entstanden Konstruktionen sowohl für das zweiteilige (Normal-) als auch namentlich für das einteilige System. Die Umschaltung von einer Schmelzkammer zur anderen erfolgt bei diesen Einsätzen entweder durch eine Art Drehschalter, welcher im Stöpselkopf eingebaut ist, oder durch Anordnung einer Art von Steckvorrichtungen. Zu den ersteren gehören die Hexa- und Oce-Sicherungen mit 6fachem und die SempLux-Sicherungen mit 9fachem

Schmelzraum, zu den letzteren gehören die P a r n o x - (9fach) und A k o - Sicherungen (18fach). Solche Einsätze werden meist nur für Stromstärken von 6, höchstens noch von 10 A gefertigt. Wenn sich auch derartige Schmelzeinsätze selbstverständlich billiger stellen als eine gleiche Anzahl Einfachsicherungseinsätze, so ist es immerhin fraglich, ob sie im Betrieb wirtschaftlicher als die letzteren sind, da die Gefahr besteht, daß im Fall von Störungen bei der leichten Umschaltbarkeit der Mehrfachsicherungen von einer versehrten Schmelzkammer auf eine unversehrte leicht mehr Schmelzkammern zum Durchschmelzen gebracht werden als Einfachsicherungseinsätze, ehe man nach der Ursache der Störung sucht und diese beseitigt. Schließlich ist auch zu berücksichtigen, daß naturgemäß die Anzahl der Schmelzkammern in Rücksicht auf den im walzenförmigen Teil des Einsatzes zur Verfügung stehenden Raum eine begrenzte ist, namentlich wenn die Betriebssicherheit hierbei nicht Not leiden soll. Es entsprechen auch nicht alle Konstruktionen den Prüfvorschriften des VDE, und man muß sich daher beim Einkauf von solchen Einsätzen überzeugen, ob diese mit dem Prüfzeichen (706) versehen sind.

(705) Sicherungsselbstschalter. Der Gedanke an Sicherungseinsätzen zu sparen, hatte die Schaffung von kleinen Automaten zur Folge, die in ungefährer Größe und in der Form einer Stöpselsicherung genau wie diese als Ersatz von Schmelzeinsätzen in die Sicherungselemente eingeschraubt werden. Man unterscheidet hierbei 2 verschiedene Konstruktionen, und zwar solche, bei welchen die Stromunterbrechung auf dem Prinzip der Ausdehnung eines Metallstäbchens beim Durchfluß größerer Stromstärken erfolgt oder solche, deren Abschaltung auf dem elektromagnetischen Vorgang beruht. Erstgenannte Konstruktion fertigt für 6 und 10 A 250 V als sogenannte Rottcoschalter die B a y e r i s c h e E l e k t r i z i t ä t s - I n d u s t r i e R o t t & C o., München, letztere gelangen für gleiche Stromstärke und Spannung als sogenannte Elfa-Selbstschalter von der E l e k t r o t e c h n i s c h e n F a b r i k F r a n k f u r t a. M. und von der A E G in den Handel. Auch die Pezet-Dauersicherung beruht auf diesem Prinzip. Die unter (698) beschriebenen Überstromschalter verfolgen in der Hauptsache den gleichen Zweck wie diese Stöpselautomaten. Solche Selbstschalter lassen sich nicht für alle Zwecke an Stelle von Sicherungseinsätzen verwenden; meist können sie für höhere Spannungen (über 250 V) nicht eingeschaltet werden. An Verbesserungen wird noch dauernd gearbeitet. Die Konstruktion mit elektromagnetischer Auslösung scheint der anderen gegenüber den Vorzug zu verdienen.

(706) Prüfzeichen. Bei der Fülle von neuen Fabriken elektrotechnischer Erzeugnisse, die nach Kriegsende bei der Umstellung von Kriegsmaterial auf Erzeugnisse der Friedensindustrie entstanden und die Güte solchen Installationsmaterials nicht unerheblich beeinflussten, war es notwendig, eine Kontrolle in der Weise zu schaffen, daß die den Verbandsvorschriften entsprechenden Materialien gegenüber den minderwertigen äußerlich ein in die Augen fallendes Kennzeichen tragen. Dieser von allen Beteiligten als notwendig erkannten Forderung wurde entsprochen durch Schaffung einer Prüfstelle, bei dem VDE, die die Aufgabe hat, alle bereits erzeugten und noch zu erzeugenden elektrotechnischen Materialien und Apparate daraufhin zu prüfen, ob sie den Normen und Prüfungsvorschriften des VDE entsprechen. Im übrigen unterliegt auch die Fabrikation selbst und die zur Herstellung der Erzeugnisse dienenden Einrichtungen der Kontrolle durch die Prüfstelle. Die Genehmigung zur Verwertung des Prüfzeichens für irgendwelche Materialien und Apparate wird nur solchen Firmen erteilt, die restlos den Bedingungen und Auflagen der Prüfstelle entsprechen. Zurzeit wird das Prüfzeichen



erteilt auf Drehschalter, Steckdosen, Fassungen, Handlampen, Koch- und Heizgeräte; eine weitere Ausdehnung auf andere Erzeugnisse ist in Vorbereitung. Die Firmen, welche für ihre Erzeugnisse das Prüfzeichen zu führen berechtigt sind,

werden in regelmäßigen Zwischenräumen in den wichtigsten elektrotechnischen Zeitschriften veröffentlicht.

Literatur: Paulus, Über die Zuverlässigkeit der Sicherungsstöpfe. Mitt. V.El. Werke 1921, Nr. 295. — Zimmermann, Die Prüfstelle des VDE. Ebenda Nr. 297. — Ely Die Tätigkeit der Kommission für Installationsmaterial. Ebenda Nr. 294. — Eena Kommission für Isolierstoffe und Untersuchungsstelle für Isolierteile. Eben'a Nr. 291. — Normen für Nulleiterdrähte. ETZ 1923, Heft 7. — Klement, Merkblatt für Konstruktion und Beschaffenheit von Installationsmaterial. Ebe da Heft 23. — Ely, Über den jetzigen Stand der Zuverlässigkeit der D-Stöpfe. Mitt. V.El.-Werke 1922, Heft 305. — Verbot des Reparierens von Sicherungen. VEI, Heft 27. — Offene Fragen bei der Herstellung von Hausinstallationen. — Die Elektrizität 1921, Heft 101. — Neue Normen für isolierte Leitungen Dr. Apt. Mitt. V El.-Werke 1923, Nr. 340. — Klement und Paulus. Zur Vereinheitlichung von Installationsmaterial für elektrische Anlagen. Berlin: Julius Springer 1919. — AEG, Hilfsbuch für elektrische Licht- und Kraftanlagen. Selbstverlag. 1921. — Stern, Siemens Handbuch: Elektrische Installation, für Licht und Kraft. Selbstverlag 1922.

Apparate für Hochspannung.

(707) **Allgemeine Gesichtspunkte.** Die Hochspannungsapparate dienen zu Schalt-, Meß- oder Schutzzwecken. Bei ihrer Durchbildung sind folgende Forderungen zu berücksichtigen: 1. zweckmäßigste Formgebung; 2. genügende Sicher-

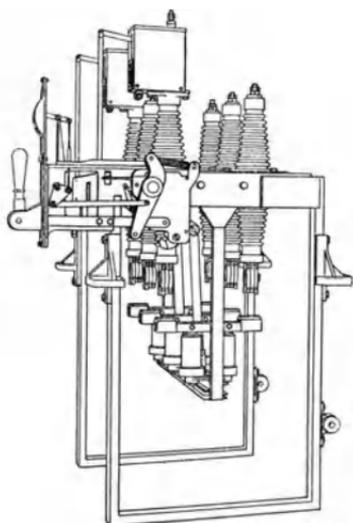


Abb. 437. Hochspannungs-Ölschalter bis 40 kV.

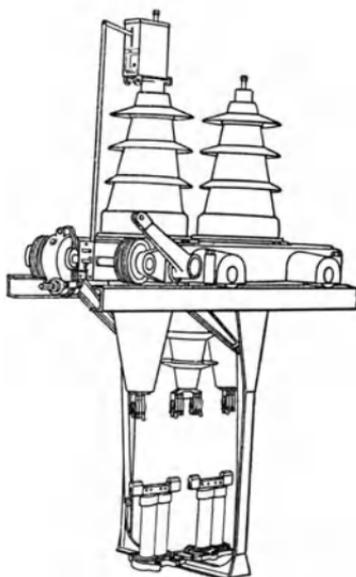


Abb. 438. Hochspannungs-Ölschalter über 40 kV.

heit gegen Durch- und Überslag; 3. Kurzschlußsicherheit; 4. Vermeidung einer zu hohen Erwärmung; 5. leichte Auswechselbarkeit der Kontaktteile; 6. vorzügliche, dauernde Isolierung; 7. Ungefährlichkeit der Bedienung; 8. leichte Kontrolle der beweglichen inneren Teile der gekapselten Apparate; 9. Unterdrückung entstehender Lichtbogen. Die Bedienung muß leicht und gefahrlos erfolgen können, auch dürfen durch Explosion eines Apparates weder das Personal noch daneben befindliche Apparate in Mitleidenschaft gezogen werden. Nach den Vor-

schriften des VDE erfolgt die Herstellung der Apparate den Betriebsspannungen entsprechend in Serien. Bei wichtigen Schaltanlagen wähle man die Serien nicht zu knapp.

(708) Schalter. Die Unterbrechung nur spannungsführender Leitungswege erfolgt durch offene Trennschalter, diejenige auch stromführender Leitungswege durch gekapselte Schalter. Bei Unterbrechung von Stromkreisen mit hohem Energieverbrauch tritt starke Lichtbogenbildung auf. Zu deren Unterdrückung benutzt man bei Anlassern und Schaltern bis zu 1 kV die elektromagnetische Blaswirkung, zuweilen auch Kondensatoren. Bei Schaltern für höhere Spannungen legt man die Unterbrechungsstellen unter Öl. Die meist in den gußeisernen Deckel eingefügten Durchführungsisolatoren erhalten auf der Innenseite die mehrfach geschlitzten Kontaktfinger. Die Schaltmesser werden parallel zum Deckel in Gleitbahnen mit Federung geführt und durch den Auslösemechanismus von Hand oder automatisch bestätigt. Schalter für Spannungen über 35 kV und größere Leistungen erhalten meist mehr als zwei Unterbrechungsstellen je Phase zur Verminderung



Abb. 439. Druckfester Hochspannungs-Ölschalter.

der Abstände und damit Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit. Die Ölkästen sind zur leichteren Kontrolle der Schalter mit Vorrichtungen zum Senken durch Hebel oder Rollenzug versehen. Die Schalter besitzen außerdem Ölstandsanzeiger, Ölablaßhahn, den Auslösemechanismus, Kontakte für die Signaleinrichtung und Signalscheibe, die die Stellung des Schalters anzeigt. Bis 35 kV werden alle Phasen in einem Ölkessel vereinigt, bei höheren Spannungen erhält jede Phase einen besonderen Ölkessel. Die Schaltungsbewegung erfolgt dann zwangsläufig durch Hebelantrieb für alle Phasen gleichzeitig. (Abb. 437 u. 438). Die Schalter werden entweder mittels angegossener Patzen auf U-Eisen befestigt oder erhalten fahrbare Gestelle. Die bei großen abzuschaltenden Leistungen auftretende Kurzschlußenergie erfordert eine besondere explosions sichere Ausbildung der Ölschalter. Erreicht wird diese durch druckfeste Schalter (SSW, Abb. 439) oder durch die Anordnung von Löschkammern (AEG). Um die Entstehung von Wanderwellen bei Schaltvorgängen zu verhindern, erhalten die Ölschalter, besonders die für

Transformatoren und lange Fernleitungen, Vorkontakte, die zunächst einen Ohmschen Widerstand vorschalten. Dieser wird entweder im Schalter oder außerhalb desselben in getrennten Ölkästen untergebracht und kann mit Temperatursicherungen, die bei 80° C durchschmelzen, versehen werden. Neuerdings ist der Versuch gemacht worden, für kleine Leistungen oder minder wichtige Schaltstationen sog. Kleinölschalter einzuführen. Die Ausbildung dieser Schalter ist zur Zeit noch im Fluß. Der Antrieb der Ölschalter erfolgt durch Hebel oder Handrad ohne oder mit Gestänge- bzw. Kettenübertragung, in größeren Anlagen meist durch besondere Schaltmotoren oder Hubmagnete, die von einer unabhängigen Stromquelle zu speisen sind. Das verwendete Schalteröl muß besonderen Anforderungen hinsichtlich Reinheit und Kältebeständigkeit entsprechen. Die Auswahl erfolgt nach den von der Verein. d. Elektr. Werke herausgegebenen „Bedingungen für die Lieferung von Transformatoren- und Schalteröl“. Die Untersuchung des Öles kann nach den jetzt einheitlich festgesetzten Unter-

suchungsmethoden von den Elektr. Werken ohne besondere Mühe vorgenommen werden. Vorsicht erfordert nur die Bestimmung der Verteerungszahl.

(709) Überstromauslöser. Diese haben bei den heutigen großen, vielfach untereinander verkoppelten Kraftwerken, Unterstationen und den verwickelten Hochspannungsnetzen eine ganz besondere Bedeutung gewonnen. Die Überstromauslöser sollen bei auftretenden Kurz- oder Erdschlüssen in irgendeinem Teile der Anlage den kranken Teil abschalten, ohne die gesunden Teile in Mitleidenschaft zu ziehen. Es ist dies eine Aufgabe, an deren Lösung heute noch energisch gearbeitet wird. Von der richtigen Auswahl und Bemessung der Überstromauslöser ist die Betriebssicherheit einer Überlandzentrale in hohem Maße abhängig. Maßgebend hierfür können Spannung, Stromrichtung, Impedanz der Leitung, Stromstärke und Zeit sein. Die Festlegung der Nennstromstärke, für die die Relaispulen bemessen sein müssen, kann nach dem Gesichtspunkte der Überlastung oder des Kurzschlusses erfolgen.

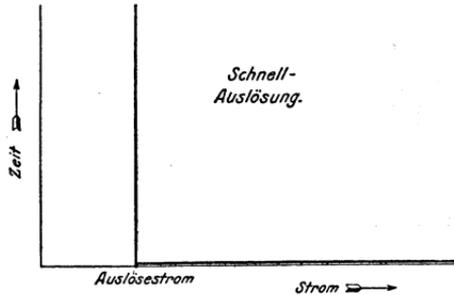


Abb. 440. Auslösercharakteristik.

Letzteres dürfte das Richtigere sein, wobei zu berücksichtigen ist, daß die Auslösestromstärke das 1,4 bis 2,0fache der Nennstromstärke betragen soll. Einheitliche Gesichtspunkte für die geeignetste Bestimmung der Stromstärke fehlen aber noch. Die Zeit wird, um ein gleichzeitiges Auslösen der Schalter zu verhindern, je nach der Wichtigkeit der Schaltstelle von 0 bis 10 Sekunden oder noch mehr abgestuft. Nach den Wechselbeziehungen zwischen Strom und Zeit unterscheidet man:

1. **Schnellauslösung.** Die Kontaktgabe des Relais erfolgt sofort, sobald die Auslösestromstärke erreicht ist. Die Charakteristik dieser Auslösungsart zeigt Abb. 440.
2. **Abhängige Zeitauslösung.** Die Auslösezeit ist abhängig von der Größe des Überstromes. Je größer dieser ist, um so kleiner wird die Zeit. Bei Erreichung des Grenzstromes lösen mehrere selbst mit verschiedenen Zeiten eingestellte Schalter nur noch in zufälliger Reihenfolge aus. Bei Überschreitung des Grenzstromes erfolgt Schnellauslösung (Abb. 441).
3. **Begrenzt abhängige Zeitauslösung.** Die Auslösezeit ist abhängig von der Größe des Überstromes nur bis zur Erreichung des Grenzwertes, von dort ab nimmt sie einen festen Wert an (Abb. 442).
4. **Unabhängige Zeitauslösung.** Die Auslösezeit ist vollkommen unabhängig vom Strom, die eingestellte Zeit bildet einen festen Wert (Abb. 443).

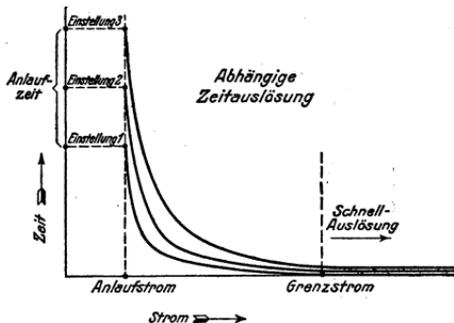


Abb. 441. Auslösercharakteristik.

Bei Überschreitung des Grenzstromes erfolgt Schnellauslösung (Abb. 441). 3. **Begrenzt abhängige Zeitauslösung.** Die Auslösezeit ist abhängig von der Größe des Überstromes nur bis zur Erreichung des Grenzwertes, von dort ab nimmt sie einen festen Wert an (Abb. 442). 4. **Unabhängige Zeitauslösung.** Die Auslösezeit ist vollkommen unabhängig vom Strom, die eingestellte Zeit bildet einen festen Wert (Abb. 443). Die hier abgebildeten Charakteristiken der verschiedenen Auslösearten sind für die Festlegung des Überstromschutzes einer Anlage sehr wichtig. Es muß streng darauf geachtet werden, daß keine Charakteristik der gewählten Auslöser eine andere überschneidet, wenn alle auf einem Koordina-

tensystem der Reihenfolge der auszulösenden Schalter entsprechend aufgetragen werden. Eine Überschneidung bedeutet das vorzeitige Fallen eines Schalters. Die Betätigung der Überstromauslöser kann erfolgen: 1. durch den primären Betriebsstrom. In diesem Falle sind die Auslöser auf die Ölschalterdurchführungsisolatoren aufgebaut und betätigen durch isolierte Stangen direkt den Auslösemechanismus ohne oder mit Zwischenschaltung eines Uhrwerkszeitrelais. Letzteres kann rein mechanisch ausgelöst oder elektrisch durch

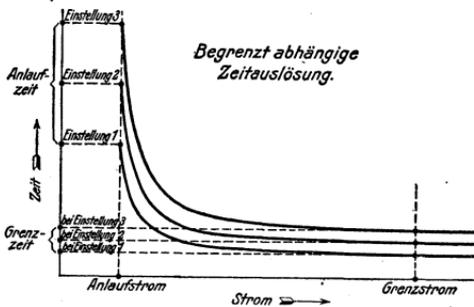


Abb. 442. Auslösercharakteristik.

besondere Stromquelle betätigt werden. In letzterem Falle besorgt diese auch gleichzeitig das Auslösen des Schalters. 2. durch sekundären Betriebsstrom. Die Auslöser befinden sich in besonderen Gehäusen nebst dem Ölschalter. Die Stromzuführung erfolgt von der Sekundärseite durch Stromwandler, die in der zugehörigen Hochspannungsleitung liegen. Diese Auslöserart beginnt sich nunmehr einzubürgern, nachdem es gelungen ist, kurzschlußsichere sogenannte Durchführungstromwandler herzustellen. Ein Vorteil dieser Auslöser besteht darin, daß sie ohne jede Gefahr leicht nachgestellt und gewartet werden können. Die Auslösung der Schalter selbst kann durch den sekundären Betriebsstrom erfolgen, meistens geschieht dieses jedoch durch eine Hilfsstromquelle — Erregerdynamo, Akkumulatorenbatterie oder Elemente. —

Bei den unter 1. genannten Auslösern wirkt der Strom auf eine Magnetspule, deren Kern die Hubbewegung ausführt, oder auf einen kleinen Induktionsmotor,

dessen drehende Bewegung auf ein Gestänge übertragen wird. Die auf der Ausdehnung eines stromdurchflossenen Drahtes beruhenden thermischen Auslöser sind wegen ihrer Unzuverlässigkeit wieder aus dem Gebrauch gekommen. Für die unter 2. genannten Auslöser werden Apparate nach dem Ferrarisprinzip oder solche mit Induktionsmotor mit Kurzschlußanker (Aluminiumscheibenform) verwendet (Abb. 444).

Besondere Schwierigkeiten ergeben sich, wenn es sich darum handelt, Doppelspeisungen oder vermaschte Netze so zu schützen, daß bei einem Kurzschluß auf der einen Strecke nur diese abgeschaltet wird, da in diesen Fällen Strom von zwei oder mehr Stellen des Netzes nach der Kurzschlußstelle zu fließt. Erst in neuerer Zeit ist es gelungen, hierfür geeignete Auslöser herzustellen. Die sogenannten Richtungsrelais der SSW sind nach dem Prinzip des Elektrodynamometers gebaut. Das Ferrarisprinzip erwies sich als nicht geeignet, da die hiernach konstruierten Apparate stark von der Spannung abhängig sind und bei großen Stromstärken

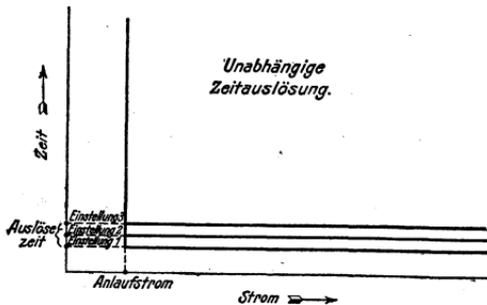


Abb. 443. Auslösercharakteristik.

infolge der Wirbelstrombildung stark gedämpft werden und unsicher arbeiten. Das Richtungsrelais besteht aus den vom Hauptstrom durchflossenen Feldspulen und der an der Spannung liegenden Drehspule. Eisengeschlossene Kraftlinien steigern die elektrische Empfindlichkeit; demselben Zwecke dient eine verstellbare Spiralfeder zur Erzeugung der jeweils erforderlichen Richtkraft. Die Induktion zwischen Feld- und Drehspule wird durch besondere Kompensationswicklung aufgehoben. Bei Drehstrom sind zwei Richtungsrelais erforderlich, deren Spannungskreise an die beiden gegenüberliegenden Phasen angeschlossen werden. Hierdurch wird erreicht, daß bei einem Kurzschluß zwischen beliebigen zwei Phasen stets mindestens in einem Relais die erforderliche Spannung vorhanden ist (Abb. 445).

Die AEG baut für den gleichen Zweck das Differentialselektivschutz-Relais, und ein besonders einfaches Richtungsrelais, über das zur Zeit leider aus patentrechtlichen Gründen Einzelheiten noch nicht gebracht werden können.

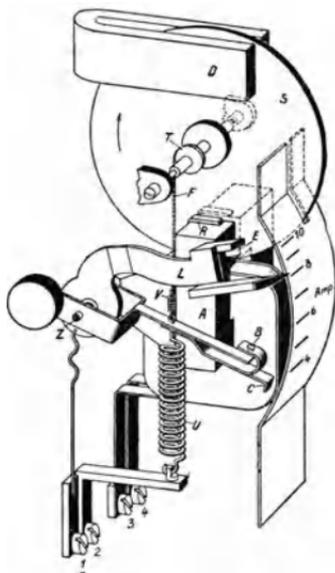


Abb. 444. Überstromrelais für unabhängige Zeitauslösung.

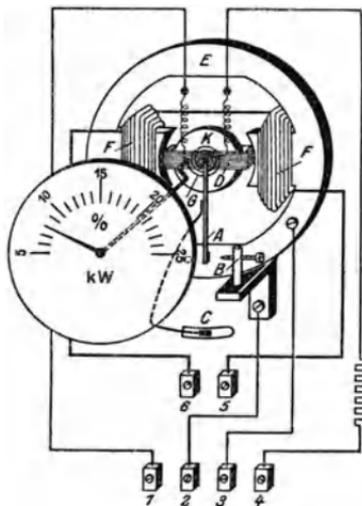


Abb. 445. Richtungsrelais.

In Kraftwerken können ferner die Schalter entweder derart verriegelt werden, daß bei einem Kurzschluß im Netz nur die betreffenden Fernleitungsschalter und bei einem Kurzschluß im Kraft Hause nur die hierfür in Frage kommenden Schalter auslösen. Oder Maschinen und Transformatoren erhalten besondere Auslöser, die bei Schadhafwerden dieser Anlageteile den Schalter auslösen.

Die Trennschalter finden hauptsächlich aus Sicherheitsgründen Verwendung, um Teile der Schaltanlage einwandfrei spannungsfrei zu machen (Abb. 447). Sie bestehen entweder aus einpoligen Schaltmessern, die mit der Schaltstange einzeln bedient, oder aus dreipoligen Messern, die durch Hebel bewegt werden. Letztere Anordnung verdient den Vorzug, um Wanderwellen mit Kippungsgefahren zu vermeiden. Trenn- und Umschalttrennmesser werden auch benutzt, um Teile der Anlage auf verschiedene Sammelschiensysteme legen zu können.

Die **Mastschalter** werden in Freileitungsstrecken eingebaut; sie sind besonders ausgebildete Trennmesser, die allpolig betätigt und mit Hörnern zur Ableitung des entstehenden Lichtbogens versehen sind. Hauptgewicht ist wegen der elektrischen und atmosphärischen Beanspruchungen auf sorgfältige Ausführung der Kontaktteile zu legen. Neuerdings ist versucht worden, für ganz kleine Stationen an Stelle von Ölschaltern Mastschalter mit aufgebauten Überstromauslösern zu bauen. Die Versuche sind aber noch nicht abgeschlossen. Mastschalter sollten nur zur Auftrennung gestörter, nicht zum Schalten unter Spannung stehender Strecken verwendet werden.

(710) Sicherungen. Diese werden in der Hauptsache nur noch da verwendet, wo bei dem Schmelzen der Sicherungen kleine Leistungen abgeschaltet werden und Ölschalter zu teuer würden, ein Abtrennen des das Netzgleichgewicht störenden Anlageteils jedoch nötig ist. Sie werden also hauptsächlich für Meßwandler und kleinere Transformatoren eingebaut. Für größere Leistungen zieht man automatische Ölschalter vor. Die Sicherungen bestehen aus Isolatoren mit aufgebauten Kontaktbacken und der den Schmelzeinsatz enthaltenden Patrone (Abb. 448). Der Einsatz besteht aus feinem Silberdraht, der in die hohlen



Abb. 446.
Stromwandler.

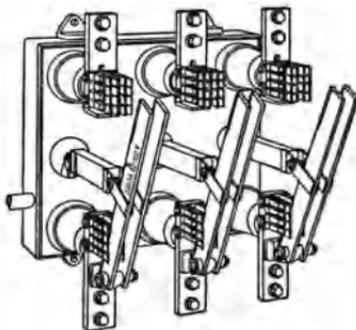


Abb. 447. Hochspannungsschalter
(Trennschalter).

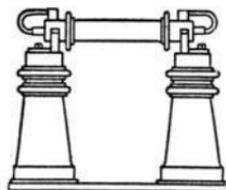


Abb. 448. Schmelzsicherung
für Hochspannung.

Patronen eingezogen oder nach einer Anordnung der AEG in Patronen zickzackförmig fest eingeschlossen wird. Die Patronen dürfen nur mit der Isolierzange eingesetzt werden. Beim Einbau der Sicherungen in ländliche Transformatorstationen ist mit Rücksicht auf Witterungseinflüsse und Überspannungen auf genügend hohe Stützisolatoren zu sehen.

Die früher gebräuchlichen Durchschlagssicherungen an Transformatoren werden wegen der durch sie verursachten häufigen Störungen und Unkosten kaum mehr benutzt.

(711) Meßwandler (345). Da die Meßinstrumente in den meisten Fällen auf der von der Anlage räumlich getrennten Schaltwand eingebaut werden und Hochspannung dann nicht führen dürfen, sind Apparate notwendig, die eine elektrische Trennung von der Hochspannung ermöglichen. Die Spannungswandler sind kleine, in Öl oder Kompound eingebettete Transformatoren, welche die Hochspannung auf meistens 110 V herabsetzen (Abb. 449, s. a. Abb. 334). Sie werden gewöhnlich einphasig ausgeführt. Für Drehstromanlagen genügen 2 Spannungswandler in der von den SSW angegebenen V-Schaltung. Hoch- und niederspannungsseitig werden Sicherungen oder besser entsprechend hohe Ohmsche Widerstände vorgeschaltet. Die Stromwandler (Abb. 446) haben den doppelten Zweck, die Stromstärke auf eine für Meßapparate gebräuchliche Höhe herabzusetzen und den Meßstromkreis von der Hochspannung zu trennen. Sie werden nur einphasig ausgeführt und

erhalten Luft- oder Compound- oder Ölisolation. Da die Stromwandler im Zuge der Leitung liegen, also von allen Störungen in Mitleidenschaft gezogen werden, war es eine dringende Forderung, sie so kurzschlußsicher zu gestalten, daß die angeschlossenen Meßinstrumente und Überstromauslöser auch bei Kurzschlüssen nicht versagen. Derartige Wandler sind durch die Ein- bzw. Mehrleiter-Durchführungsstromwandler geschaffen worden. (Vgl. Abb. 336, S. 417.) Beim Ausbau der an die Stromwandler angeschlossenen Instrumente ist bei allen Stromwandlersystemen die Niederspannungsseite kurz zu schließen, da in der offenen Leitung infolge der vorhandenen, wenn auch wenigen, Windungen in diesen gefährliche Spannungen induziert werden können.

(712) Überspannungsschutzapparate. (146; 978 u. f.). Die Frage des Überspannungsschutzes ist in den letzten Jahren sehr gefördert worden. Man unterscheidet Überspannungen infolge statischer Ladungen, innerer Vorgänge in der Anlage und atmosphärischer Einwirkungen. Zur Ableitung statischer Ladungen verwendet man Wasserstrahler, bei denen ein Wasserstrahl von bestimmtem Querschnitt die Verbindung mit Erde herstellt (990). Sie besitzen einen ziemlich hohen, von der Beschaffenheit des Wassers abhängigen Eigenverbrauch und bedürfen sorgfältiger Einstellung und Wartung. Die Wasserzuführung erfolgt durch natürlichen Druck oder durch besondere Pumpen. Zweckmäßiger sind die neuerdings bevorzugten Erdungsdrosselpulen (714, 983). Diese bestehen aus einer Widerstandsspule von hoher Induktivität und geringem Ohmschen Widerstand. Oft ist noch eine sekundäre Wicklung für die Messung der Spannung angebracht. Der Eigenverbrauch dieser Drosselpulen ist gering, eine besondere Wartung nicht nötig. Sie werden entweder an den Transformatornullpunkt oder an jede Phase der Sammelschienen angeschlossen. Die letztere Anordnung erscheint als die bessere. Für niedere Spannungen kommen auch Hörnerableiter (986) zur Anwendung. Die Hörner erhalten an dem auf dem Isolator befestigten Schenkel größere Metallflächen, außerdem ist das eine Horn beweglich. Der Apparat wirkt wie ein Elektroskop; das bewegliche Horn wird bei genügender Aufladung von dem anderen Horn angezogen, verringert die Überschlagslänge und leitet den die Ladung nach Erde abführenden Lichtbogen ein.

Zur Ableitung bzw. Abflachung der anders gearteten Überspannungen dienen hauptsächlich die folgenden Einrichtungen: 1. Hörnerableiter mit vorgeschalteten Emaile- oder Ölwideständen, die zur Begrenzung der Stromstärke dienen [Abb. 450; s. a. (986) u. f.]. Für Freileitungen werden die Hörner in Stern, für Sammelschienen in Stern dreieck geschaltet. Bei einer neueren Bauart der SSW-Hörnerableiter werden die Hörner direkt auf den Ölkessel des Widerstandes aufgebaut, und zwar in kreisförmiger Anordnung. Dadurch wird an Platz erheblich gespart. Die in Öl eingebauten Widerstände erhalten Temperatursicherungen, die bei einer Erhitzung auf 80° C abschmelzen und den Widerstand vor Überlastung schützen. Die Hörner sind in genügender Entfernung von Gebäude- und Konstruktionsteilen aufzustellen. Um die Herabsetzung der Überspannung günstiger zu gestalten, dabei aber den dem Überschlag nachfolgenden Betriebsstrom nicht zu hoch werden zu lassen, wird das Horn beim Ansprechen durch einen besonderen Schaltmagnet unter Öl kurzgeschlossen, der Lichtbogen dadurch zum Erlöschen gebracht und die Unterbrechung des Erdstromes bewirkt oder ein Teil des Widerstandes im Ruhestand des Hörnerableiters durch einen Schaltmagnet kurzgeschlossen. Nach erfolgtem Überschlag wird die Verbindung durch den Betriebsstrom selbst aufgehoben und dieser durch den nunmehr voll eingeschalteten Widerstand begrenzt (EMAG, AEG, SSW). 2. Kondensatoren, die die Wanderwellen ins Netz zurückwerfen, sie für die dahinter liegenden Anlageteile

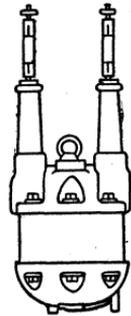


Abb. 449. Spannungswandler.

also abflachen. Die Kondensatoren werden entweder aus Jenaer Glas mit verdicktem Hals, um Überschlüge zu verhüten, hergestellt, wobei der innere und äußere Belag aus einer chemisch niedergeschlagenen Silberschicht, die darauf verkupfert wird, hergestellt ist. Oder es wird Pertinax als Dielektrikum verwendet. Dieses wird mit dem Metallbelag aufgewickelt und zu flachen Zylindern gepreßt. Die Durchbildung der Kondensatoren ist noch nicht abgeschlossen. Infolge dessen ist besonders auch ihre gute Eignung als Phasenkompensatoren leider noch nicht in der Praxis zur Auswirkung gekommen. 3. Drosselspulen ohne und mit Eisen in Spiralen- oder Tellerform, ohne oder mit parallel geschalteten Ohmschen Widerständen, sowie Kondensatordrosselspulen (Abb. 451). Eine genügende In-

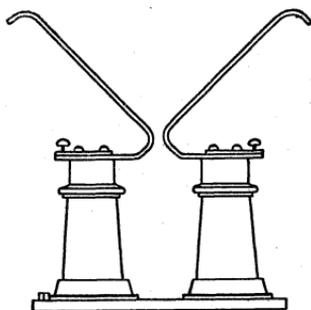


Abb. 450. Hörnerableiter.

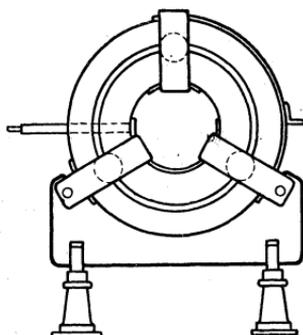


Abb. 451. Drosselspule.

duktivität läßt sich nur durch Drosselspulen mit hoher Windungszahl erreichen. Sie müssen eng gewickelt sein und gute Lagenisolation erhalten. Sie können zwischen Generatoren und Sammelschienen, zwischen Teilen des Sammelschienensystems und vor die Transformatoren eingebaut werden. In großen Kraftwerken verwendet man auch Drosselspulen zur Begrenzung der Kurzschlußstromstärke. Zu diesem Zwecke werden sie so in die Sammelschienensysteme eingebaut, daß die Generatoren zwischen ihnen einzelne Gruppen bilden. 4. Überbrückungswiderstände von hohem Ohmschen Widerstand und Funkenstrecken für Stromwandler wie Stromauslöser. 5. Induktionsfreie Vorschaltwiderstände, die vor die Meßwandler geschaltet werden. Die unter 3 bis 5 genannten Apparate dienen ebenfalls zur Abflachung der Wellenstirn von Überspannungen.

(713) Meßinstrumente. Direkt in die Hochspannung werden nur Strommesser und statische Voltmeter eingebaut. Die Amperemeter dienen vornehmlich zur Kontrolle der Fernleitungen und zur schnelleren Feststellung der betreffenden Strecke bei Erdschlüssen. Die statischen Voltmeter werden für die Prüfung der Isolation der Hochspannungsanlage benutzt. Die übrigen Instrumente in einer Hochspannungsanlage, wie Volt-, Ampere-, Wattmeter, Phasen- und Frequenzmesser, sowie Synchroskop, werden über Meßwandler angeschlossen.

(714) Sonstige Apparate. Als Erdschlußprüfer werden statische Voltmeter oder Voltmeter mit Spannungswandlern benutzt, in letzterem Falle kann der Eintritt eines Erdschlusses durch Signalglocke oder Sirene bemerkbar gemacht werden. Um die Lichtbogenbildung bei Erdschlüssen zu unterdrücken, benutzt man Erdschlüsselschalter, die automatisch die kranke Phase an Erde legen bzw. die Leitung bei dauerndem Erdschluß abschalten. Einen erheblichen Fortschritt in der Bekämpfung der Folgen des Erdschlusses bedeutet die von Petersen zuerst angegebene Erdschlußspule. Diese wird zwischen

dem Nullpunkt der Transformatoren und der Erde angeschlossen, ihre Größe richtet sich nach dem Erdschlußstrom des zu schützenden Netzteilcs. Da dieser kapazitativ gerichtet ist, wird er bei auftretendem Erdschluß durch den induktiven Strom der Erdschlußspule bis auf einen von der Abstimmung der Spule abhängenden Reststrom kompensiert. Es wird dadurch erreicht, daß der Spannungsanstieg bei auftretendem Erdschluß gedämpft, die Spannungen selbst erniedrigt, die Ausbildung von intermittierenden Lichtbogen verhindert und die Entstehung einer gefährlichen Potentialdifferenz an der Erdschlußstelle vermieden wird. Höhere Harmonische infolge einer Verzerrung der Spannungskurve durch den kapazitativen Ladestrom können allerdings durch die Erdschlußspule nicht beseitigt werden.

Literatur: W. Fellenberg, Richtl. f. d. Konstr. v. Stütz- u. Durchf.-Isolatoren. ETZ 1912, S. 582. — F. Marguerre, Einige Versuche mit Ölschaltern. ETZ 1912, S. 709. — W. Petersen, Überspannungen u. Überspannungsschutz. ETZ 1913, S. 167. — K. Kuhlmann, Das Überspannungsproblem. ETZ 1916, S. 661. — G. Schendell, Die Untersuchung d. Schalter- u. Transformatorenöle. ETZ 1918, S. 242. — W. Petersen, Die Begrenzung des Erdschlußstromes durch die Erdschlußspule. ETZ 1919, S. 5. — G. Gormann, Üb. d. Berechnung des Kurzschlußstromes in Leitungsnetzen. ETZ 1918, S. 444. — G. Gormann, Über d. Einfluß d. Charakteristik v. Überstromauslösern auf d. Überstromschutz ganzer Netze. ETZ 1919, S. 297. — H. Gewecke, Schutzwiderstände f. Hochsp.-Anlagen. ETZ 1919, S. 370. — M. Vogelsang, Über Hochleistungsschalter. ETZ 1919, S. 597. — F. Schrottké, Über Hochleistungsschalter. ETZ 1919, S. 625. — J. Biermanns, Über Hochleistungsschalter. ETZ 1920, S. 325. — W. Höpp, Die erforderliche Trägheit von Überstromrelais. ETZ 1920, S. 370. — F. Schrottké, Richtlinien f. Ölschalter. ETZ 1920, S. 585. — G. Keinath, Der Kettenstromwandler. ETZ 1920, S. 788. — R. Bauch, Die Polerdung mittels Erdungsdrosseln. ETZ 1921, S. 588. — A. Roth, Schutz gegen Erdschlüsse. ETZ 1921, S. 642. — G. Benischke, Resonanzspule, Dissonanzspule, Löschttransformator. ETZ 1921, S. 695. — Ph. Torchio, Hochstromversuche an Hochsp.-Apparaten. ETZ 1921, S. 971. — C. Feldmann u. M. Höchstädter, Ein neues Schutzsystem gegen Überströme. ETZ 1921, S. 1154. — R. Küchler, Berechnung d. Fehlergrößen v. Meßwandlern. ETZ 1921, S. 1418. — F. Noether, Über d. Abstimmung d. Löschrösseln. ETZ 1921, S. 1478; 1922, S. 387. — C. Schrader, Kurzschlußsichere Stromwandler. ETZ 1922, S. 1478. — Th. Panzerbieter, Kurzschlußströme in Drehstromnetzen. Siemens Zeitschr. 1922, S. 436. — F. Schrottké, Zur Überspannungsfrage. Siemens Zeitschr. 1922, S. 633. — W. Hüter, Neue ausländische Höchstspannungsschalter. ETZ 1923, S. 801. — H. Stäger, Über das Verhalten von Transformatorölen in der Wärme. ETZ 1923, S. 73.

Bücher: siehe Schaltanlagen, S. 540.

Schaltanlagen.

(715) Allgemeine Gesichtspunkte. Der Mittelpunkt jeder elektrischen Einrichtung ist die Schaltanlage, von der aus die Energiezufuhr überwacht und die Verteilung in die einzelnen Verbrauchsstromkreise vorgenommen wird. Auf zweckmäßige Anordnung und solide, nicht billigste Ausführung ist besonderer Wert zu legen, da von der richtigen und übersichtlichen Anordnung zu einem großen Teil die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit der ganzen Anlage abhängt. Dem Aufbau der Schaltanlagen ist in den letzten Jahren besondere Aufmerksamkeit gewidmet worden. Man unterscheidet Hauptschaltanlagen für die Kraftzuleitungen und die Hauptverteilungsleitungen und Verteilungsschaltanlagen für die Verteilung der Licht- und Kraftleitungen zu den einzelnen Abnehmern. Die Hauptschaltanlagen bestehen aus der Bedienungsschaltwand oder aus Pulten und den dahinter liegenden Apparateräumen. Als Material für die Schaltwände verwendet man Marmor, Schiefer und andere feuersichere, isolierende Stoffe. Die Schaltwände werden durch Umrahmungen aus Metall abgeschlossen, die der Innenarchitektur des Gebäudes angepaßt sein sollen. In dieser Richtung sind in den letzten Jahren Anlagen geschaffen worden, die auch in ästhetischer Hinsicht Auge und Gefühl befriedigen. Die Schaltwände enthalten Meßinstrumente, Zähler, Signaleinrichtungen und die Betätigungsvorrichtungen der von Hand oder durch Fernauslösung zu betätigenden Schalter. Es ist praktisch, in großen Schaltanlagen oberhalb der Schaltwand ein Schaltbild der Anlage aus Metallstreifen einzulassen, dessen Schalter durch farbige Lampen gekennzeichnet sind, die bei Betätigung der Schalter mit ein- oder ausgeschaltet werden. Die Meßinstrumente

werden in modernen Anlagen in die Tafeln eingelassen und nach vorn durch Front-
ringe abgeschlossen. Die am häufigsten zu beobachtenden Instrumente sollen
möglichst große Durchmesser und deutliche Skalen erhalten. Die Schaltwände
werden am besten etwa 0,5 bis 1 m über dem Maschinenhausfußboden oder auch in
Höhe des ersten Stockwerkes angebracht. In letzterem Falle muß eine bequeme
Treppe dem Schaltwärter Gelegenheit geben, schnell in das Erdgeschoß zu ge-
langen. Wählt man Pultform, so werden die Meßinstrumente als sog. Profil-
instrumente ausgebildet. Vielfach werden auch beide Systeme angewandt in der
Weise, daß für die zu den Maschinen gehörenden Apparate Pultform und für die
der abgehenden Hauptleitungen Schaltwandform gewählt wird. Für gute, stören-
den Schatten ausschließende Beleuchtung der Schaltbühne ist Sorge zu tragen.
Hinter der Schaltwand finden die notwendigen Apparate Aufstellung. Bei großen
Kraftwerken für Hochspannung nehmen diese besondere Gebäude in Anspruch.
Die Räume sind reichlich zu bemessen, damit Platz für späteren Einbau einzel-
ner Apparate und für Erweiterungen vorhanden ist. Zu enge Schaltanlagen
sind unübersichtlich und gefährlich für das Personal. Im allgemeinen sind beim
Entwurf und Bau folgende Gesichtspunkte zu beachten: Einfachheit und Über-
sichtlichkeit der Anordnung. — Möglichste Vermeidung von Kreuzungen der
Leitungen untereinander und mit geerdeten Eisenteilen. — Genügende Abstände
der spannungführenden Teile voneinander und von Gebäude- und Konstruktions-
teilen. — Schutz gegen zufällige Berührung. — Auswechselbarkeit der dem
Verschleiß unterworfenen Teile. — Möglichkeit der sicheren Abschaltung einzelner
Teile zu Ausbesserungs- und Reinigungszwecken. — Vermeidung scharfer Bie-
gungen der Leitungen bei Hochspannung. — Derartige Anordnung der Appa-
rate, daß unnötige Leitungswege vermieden werden. — Bequeme, leicht bedien-
bare Anordnung der Sicherungen. — Apparate, bei denen gelegentlich Lichtbogen
entstehen, so anzuordnen, daß diese keinen Kurzschluß zwischen zwei Leitungen
oder Erdschluß mit Konstruktionsteilen herstellen können. — Sichere Erdung aller
Konstruktionsteile. — Vermeidung spannungführender Teile an der Vorderwand
der Schalttafel. — Vermeidung der sog. Provisorien. — Beschränkung auf nur
durchaus nötige Stützpunkte für Leitungen. — Rücksichtnahme auf möglichst
kurze Bedienungswege für öfter zu betätigende oder nachzusehende Apparate. —
Möglichkeit des luftdichten Abschlusses einzelner Anlageteile bei Bränden. —
Abflußmöglichkeit für ausfließendes Öl. — Schaffung zuverlässiger Beleuchtung
auch bei Betriebsstörungen. — Möglichkeit des schnellen und bequemen Trans-
portes größerer Apparate.

(716) Schaltanlagen für Niederspannung. a) Kraftwerke. Diese sind
durch das Überwiegen der Drehstromzentralen zurückgedrängt worden und häufig
zu großen Umformerwerken geworden. Die Hochspannungstechnik ist aber auch
nicht ohne Einfluß auf den Bau der Niederspannungsschaltapparate und der Schalt-
anlagen geblieben. Während man früher allgemein die Apparate auf der Vorder-
wand der Schalttafel anordnete, ist man in neuen Anlagen hiervon ganz abgekomen.
Auf der Tafel befinden sich nur noch die Handgriffe für Schalter, Meßinstrumente,
Handräder für die Regulatoren und automatische Zellschalter (manchmal auch
diese selbst), Signalvorrichtungen und Zähler. Die Apparate und Sicherungen
sind dicht hinter der Tafel auf besondere Gerüste übersichtlich und gut zugänglich
aufgebaut. Versieht man den unteren Teil der Schalttafel mit einem Rollver-
schluß, so läßt sich die Bedienung der Sicherungen auch von vorn vornehmen.
Da die Verbindungsleitungen oder Schienen hohe Ströme führen, ist auf deren
zweckmäßige Anordnung und Verlegung besonderes Gewicht zu legen. Die Kon-
takte sind sorgfältigst zu behandeln. Bei Schienenverbindungen ist außer der
Verzinnung noch als Zwischenlage Stanniol oder Metallfolie zu verwenden. Bei
einer größeren Anzahl von abgehenden Speiseleitungen ist die Häufung der Leitungen
oder Kabel an einer Stelle zu vermeiden, mindestens aber durch geeignete trennende
Zwischenlagen dafür zu sorgen, daß bei dem Kurzschluß einer Leitung nicht sämt-

liche andere in Mitleidenschaft gezogen werden. Die Manier, die Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen Apparaten und den Sammelschienen auf einen möglichst engen Raum zusammenzudrängen, ist zu verwerfen. Zur Vermeidung langer und teurer Zellenschalterleitungen empfiehlt es sich, den Zellschalter in einem Raum vor dem Batterieraum aufzustellen und mit Hilfe eines Motors oder Magnets von der Schalttafel aus zu betätigen. Der Zellschalterraum muß natürlich vom Batterieraum gut abgeschlossen sein, um den Eintritt der Gase zu verhindern. Das Streichen der Zellschalterleitungen mit Zylinderöl hat sich durchaus bewährt (603). Alle Schraubverbindungen der Schaltanlage sind von Zeit zu Zeit nachzuziehen und die Kontakte der Schalter neu abzuschleifen und mit Vaseline schwach einzufetten. Der Isolationszustand der Anlage ist dauernd zu überwachen, Erdschlußfehler sind bereits in der Ausbildung zu beseitigen. Die Bedienung größerer Niederspannungsanlagen erfordert oft mehr Verständnis, Ruhe und Überlegung als die von Hochspannungsanlagen. Es ist daher bei Anordnung der Schalter und Handgriffe mit Rücksicht auf die bei Fehlschaltungen auftretenden hohen Stromstärken besonders darauf zu achten, daß sie bequem liegen und Verwechslungen ausgeschlossen sind. Gleichrichteranlagen werden meistens so ausgeführt, daß die dazu erforderlichen Apparate vor dem Gleichrichter auf einer besonderen Tafel aufgebaut werden.

b) **Hauptverteilungsanlagen.** Für diese gilt das oben Gesagte sinngemäß. Zur Kontrolle der Arbeitsvorgänge an Motoren hat sich vielfach der Einbau selbstschreibender Strommesser bewährt. Derartige Anlagen werden neuerdings aus einzelnen, vollständig geschlossenen Schaltkästen zusammengebaut, wodurch eine saubere und übersichtliche Anordnung erzielt wird. Auch hier sollte eine Einrichtung zur Prüfung der Isolation der Anlage nicht fehlen.

c) **Hausverteilungsanlagen** für einzelne Gebäude usw. bestehen aus genügend weit von der Wand entfernten Tafeln aus Isolierstoff, die die erforderlichen Schalter, Sicherungen und Zähler enthalten. Die Tafeln können auch in die Wand eingelassen werden, es ist dann aber auf eine bequeme Zugänglichkeit besonders zu achten. Die Schalter sind mit isolierenden Schutzhüllen, die Sicherungen außerdem mit Bezeichnungen der zu dem Stromkreis gehörenden Räume zu versehen. Die Schalttafel erhält eine gut schließende, abnehmbare Schutzverkleidung — blanke, spannungführende Teile auf der Vorderseite der Tafel sind nicht zulässig. Alle Zu- und Ableitungen müssen von vorn lösbar sein, wofür besondere Schalttafelklemmen mit isoliertem Kopf Verwendung finden. Die Möglichkeit des Stromdiebstahls soll durch den Aufbau der Schalttafel ausgeschlossen sein.

(717) Schaltanlagen für Hochspannung. a) **Kraftwerke.** Derartige Schaltanlagen erfordern verhältnismäßig große, solche für Höchstspannungsanlagen sehr große Räume. Bei großen Kraftwerken sind sie oft vom eigentlichen Maschinenhaus völlig getrennt. Die Befehle vom und zum Maschinenhaus werden dann optisch oder akustisch durch besondere Signalapparate vermittelt. Die Schaltapparate sind stets in besonderen Räumen hinter der Schaltwand aufgestellt. Letztere enthält nur die Betätigungsvorrichtungen für die Ölschalter (Hebel oder Druckknopf), Signallampen, Meßinstrumente, Schnellregler, Auslöserelais, Zähler und die Handräder für die Nebenschluß- oder Hauptstromregulatoren. Die Synchronisiervorrichtung, bestehend aus 2 Glühlampen, 3 Voltmetern (oder Doppeltmeter und Nullvoltmeter) und Frequenzmesser, wird oft an freistehenden Säulen oder beweglichen Wandarmen zur besseren Sichtbarkeit montiert, ebenso auch die Sammelschienenvoltmeter, die meist auch einen größeren Durchmesser als die übrigen Instrumente besitzen. An Stelle der Synchronisierinstrumente kann auch ein Synchronoskop oder eine automatische Parallelschaltvorrichtung benutzt werden. — Der Bedarf an Meßinstrumenten ist bei Drehstromanlagen größer als bei Gleichstromanlagen. Zu jedem Generator gehören mindestens ein Wattmeter, ein Strommesser für diesen und die Erregung, empfehlenswert ist ein

Leistungsfaktormesser oder, wie neuerdings vorgeschlagen, ein Blindleistungsmesser. Strommesser für die Transformatoren sind deshalb zweckmäßig, weil sie die Belastung dauernd zu prüfen gestatten und das rechtzeitige Abschalten schwach belasteter Transformatoren ermöglichen, wodurch nicht unbedeutend an Leerlaufverlusten gespart werden kann. Selbstschreibende Sammelschienenwattmeter und Spannungsmesser erleichtern die Kontrolle des Betriebes wesentlich.

Auch die Erdschlußprüfvoltmeter finden zweckmäßig in der Nähe oder auf der Hauptschalttafel ihren Platz.

Besondere Überlegung erfordert die Anordnung der Apparate. Diese werden in Zellen eingebaut, die voneinander durch Gipsdielen oder Duroplatten getrennt werden, um ein ungefährdetes Arbeiten oder Reinigen in der Zelle zu gewährleisten. Nach vorn werden die Zellen durch Gitter oder Stangen abgeschlossen.

Vor und hinter jedem Ölschalter sind Trennmesser vorzusehen, um eine gefahrlose Besichtigung des Schalters zu gewährleisten. Die Schalter sind am besten in allen drei Phasen mit Überstromauslösern zu versehen. Schalter für Transformatoren und Freileitungsstrecken erhalten Vorschaltwiderstände, um die Entstehung von Wanderwellen zu vermeiden. Unter den Öl Ablaufhahn eines jeden Ölschalters empfiehlt es sich, ein kleines Blechgefäß zu hängen, um die durch austropfendes Öl entstehenden häßlichen Ölflecke auf dem Boden zu vermeiden. Jede Schalterzelle ist mit einer Nummer und genauen Bezeichnung zu versehen, um Fehlschaltungen möglichst auszuschließen. Der Überstromschutz bedarf sorgfältigster Überlegung und Behandlung. Die Auslöserapparate, der Auslösemechanismus und die Schalterkontakte sollten mindestens einmal jährlich genau nachgesehen, gereinigt und eingefettet werden. Die Erdung aller metallischen Konstruktionsteile in Parallel-, nicht Serienschaltung ist sehr sorgfältig unter Verwendung genügend großer Querschnitte auszuführen. Es empfiehlt sich, für die Meßwandler eine getrennte, besonders gut ausgeführte Erde zu verwenden. Bei Bemessung der Apparate ist in mechanischer, elektrischer und thermischer Hinsicht auf die voraussichtliche Größe des auftretenden Kurzschlußstromes gebührend Rücksicht zu nehmen. Zur Abdämpfung von Überspannungen durch Atmosphäre, Fehlschaltung oder Netzstörungen verwendet man Hörnerableiter mit Dämpfungswiderständen unter Öl, Drosselspulen und Überbrückungswiderstände. Anlagen für Höchstspannungen bedürfen kaum eines besonderen Überspannungsschutzes. Zur Ableitung statischer Ladungen bedient man sich der Erdungsdrosselspulen. Die Überwachung der Transformatoren durch elektrische Fernthermometer hat sich vorzüglich bewährt. Die Sammelschienen werden meistens als Doppelsammelschienen ausgebildet, wobei die Möglichkeit der Kupplung beider durch einen Kuppel-Ölschalter (nicht Trennschalter) hergestellt wird. Bei einer Anzahl größerer Maschinensätze ist es oft ratsam, die zu Gruppen zusammengefaßten Maschinen durch in die Sammelschienen eingebaute Drosselspulen zu trennen, um die Kurzschlußströme so zu begrenzen, daß eine Gefährdung der gesamten Schaltanlage vermieden wird. Die Anordnung der Doppelsammelschienen erfordert eine sehr eingehende Überlegung. Für jede Schaltanlage gibt es ein Optimum der Anordnung, bei der der erforderliche umbaute Raum ein Minimum wird. In Mittelspannungsanlagen werden die Sammelschienen aus Flachkupfer hergestellt, bei Anlagen von 40 kV an meist aus Kupferrohr. Sammelschienen, die hohe Stromstärken führen, müssen sorgfältig gegen dynamische Wirkungen abgestützt werden und besonders gute Kontaktflächen erhalten. Die Verbindungen zwischen Apparaten, die aus Flachkupfer, Drähten oder Rohren bestehen, sollen in möglichst schlanken Bogen geführt werden. Für Drähte und Rohre hat sich das konzentrische Klemmensystem bewährt, durch das guter Kontakt und leichte Lösbarkeit erzielt werden. Die Abstände der Leitungen gegeneinander und gegen Erde sind reichlich zu wählen. Auf genügend hohe, glatte Stützisolatoren ist Wert zu legen. Die Verlegung der Signal-, Synchronisier- und Auslöseleitungen soll nicht nebensächlich behandelt werden, sie sind möglichst zu vereinen und so

zu verlegen, daß eine leichte Kontrolle möglich ist. Die Abzweigungen von diesen Leitungen zu den Apparaten und Instrumenten auf der Schaltwand soll mittels Klemmleisten erfolgen. An diesen soll auch jede Leitung ein Bezeichnungsschildchen erhalten, damit bei Störungen die einzelnen Stromkreise leicht verfolgt werden können. Die Speisung der Signalleitungen erfolgt am besten durch eine unabhängige Stromquelle. Bei Doppelsammelschienen Sorge man dafür, daß für die Synchronisierstecker ein Blindstöpsel vorhanden ist, um zu vermeiden, daß bei einer abgeschalteten Sammelschiene diese rückwärts durch den Synchronisierwandler Spannung erhält (Abb. 452 u. 453). Dasselbe läßt sich auch durch Hilfskontakte an den entsprechenden Trennmessern erreichen, über die die Synchronisierleitung geführt und mit dem Trennmesser zugleich abgeschaltet wird.

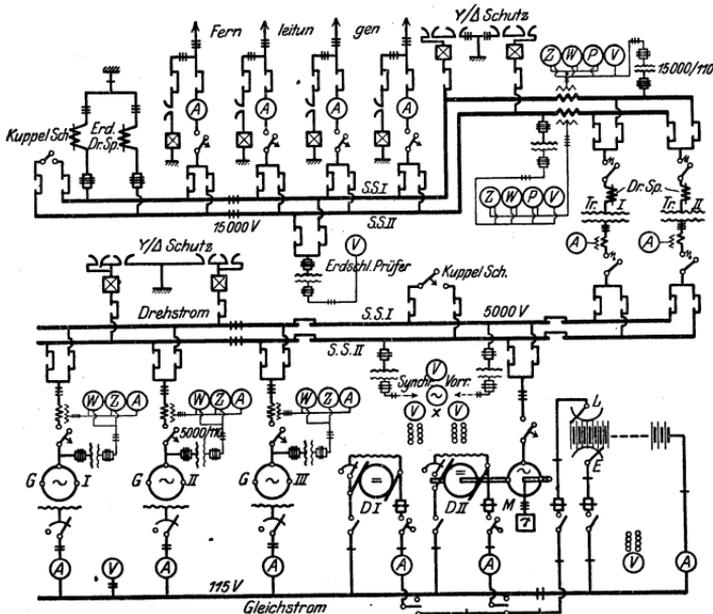


Abb. 452. Schaltanlage für Hochspannung.

Die Transformatoren werden in besonderen, abschließbaren Kammern aufgestellt, die eine gute Entlüftung und einen Ölabbau erhalten. Der Ölschützer findet meist neben dem Transformator Aufstellung, in größeren Anlagen werden auch besondere Kühlanlagen für das umlaufende Öl eingebaut. Die Zu- und Abschaltung der Transformatoren erfolgt durch Ölchalter (nicht Trennmesser), wenn möglich ohne Stromauslöser. Große Transformatoren können auch mit einem Auslöseschutz für den Fall des Schadhafwerdens versehen werden. Um Kosten an Gebäuden zu sparen und eine größere Übersichtlichkeit zu erreichen, sind in Amerika für Höchstspannungen sogenannte Freiluftschaltanlagen erbaut worden, bei denen entweder alle Apparate im Freien an eisernen Gerüsten aufgebaut oder nur die Ölchalter und Meßinstrumente in einfachen Häusern untergebracht wurden. Neuerdings scheint man aber wieder von diesem System abgehen zu wollen.

b) Verteilungs-Schaltstationen: Die räumliche Ausdehnung der Überlandzentralen hat die Durchbildung derartiger Stationen erforderlich

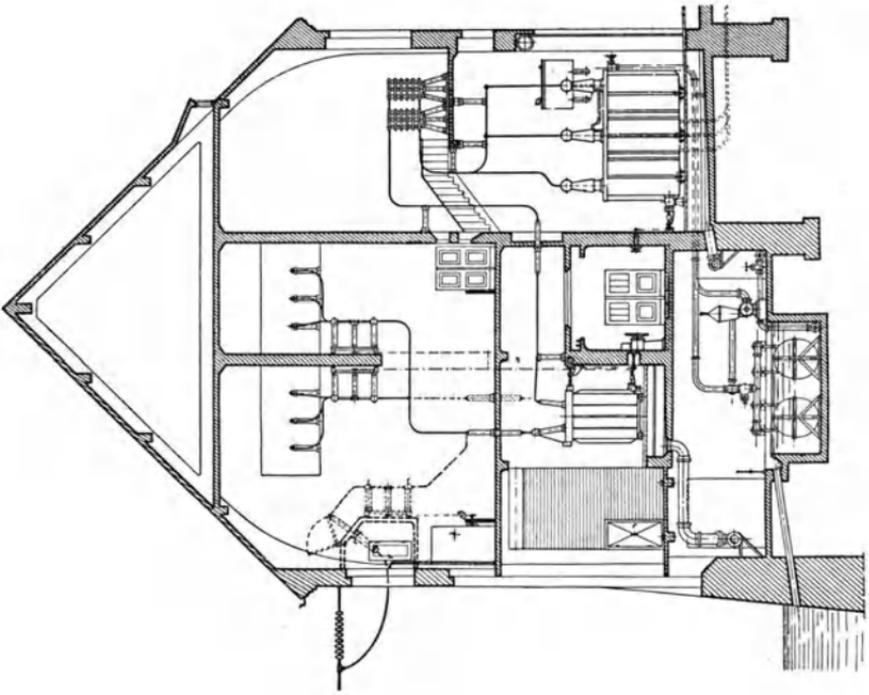


Abb. 454. Schnitt durch ein 100-KV-Schalthehaus.

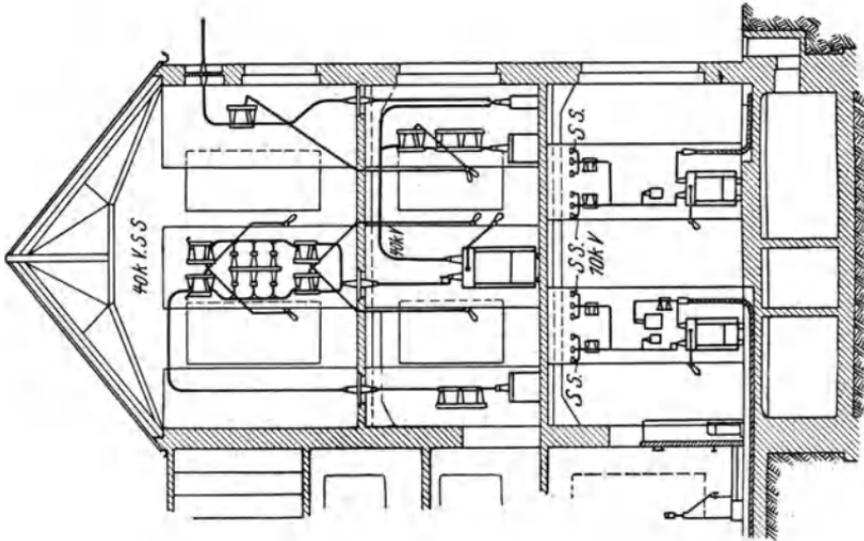


Abb. 453. Schnitt durch eine Hochspannungsschrananlage.

gemacht. In ihnen wird entweder die Speisespannung auf die Verteilungsspannung herabgesetzt, oder es sind Stützpunkte für Mittelspannungsverteilungsleitungen, in denen die einzelnen Strecken zusammenlaufen. Durch den Fortfall der Maschinensätze ist ihr Aufbau naturgemäß einfacher, für ihn gilt das oben Gesagte sinngemäß (Abb. 454). Größere Stationen erhalten ebenfalls Doppelsammelschienen, kleinere einfache Sammelschienen, die zweckmäßig durch Trennmesser teilbar gemacht werden, um getrennte Speisung einzelner Strecken im Bedarfsfalle zu ermöglichen. Die abgehenden Fernleitungen erhalten in allen Phasen direkt eingebaute Amperemeter zur Kontrolle der Belastung und der Erdschlüsse. Auf Übersichtlichkeit der Anordnung und leichte Bedienbarkeit ist besonderer Wert zu legen. Der Überstromschutz ist in Einklang mit anderen Schaltstationen zu bringen, so daß die richtige Reihenfolge der Auslösungen gewahrt bleibt. An jeden Ölschalter sollte nur eine Verteilungsleitungsstrecke von 50 bis 60 km Länge angeschlossen werden, um bei Störungen möglichst kleine Bezirke außer Betrieb zu setzen. Die erforderlichen Meßinstrumente und Erdschlußprüfer sind zur Ausübung der Kontrolle in derartigen Stationen vorzusehen.

c) Netztransformatorstationen. Für die kleinen Stationen, hauptsächlich auf dem Lande, hat sich bereits ein gewisser Typ herausgebildet, so daß demnächst zu einer Normung geschritten werden dürfte. Der Aufbau derartiger Stationen ist sehr einfach. Das Haus enthält Platz für einen oder auch zwei Transformatoren bis zu max. 100 kW Leistung. Der Transformator befindet sich im Erdgeschoß, wo auch, durch eine besondere Luke zugänglich, die Niederspannungsapparate angeordnet sind. Dicht über dem Transformator sind Drosselspulen eingebaut, von diesen führt die Leitung direkt durch eine Öffnung der Decke in das Obergeschoß zu den Sicherungen (bzw. Ölschalter oder Kleinölschalter) und von dort zu den Durchführungen ins Freie. Verzichtet man auf die Zwischendecke, so werden die Sicherungen in erreichbarer Höhe über dem Transformator eingebaut. Die Bedienung der Sicherungen erfolgt dann zweckmäßig durch Hebelantrieb. Bei Durchgangsstationen werden noch Trennmesser unter die Durchführungen gesetzt, um die Station spannungslos machen zu können. Es sind hohe, glatte Isolatoren zu verwenden, um Überschläge bei feuchtem Wetter zu vermeiden. Die Menge der Isolatoren ist auf die geringste Anzahl zu beschränken. Für gute Lüftung ist zu sorgen. Der Wasserbildung im Innern der Station bei Umschlagwetter kann man durch eine Ausführung der Wände mit Luftschicht begegnen. Für möglichst gute Erdung der Apparate und des Transformatorgehäuses ist zu sorgen. Die Erdung des Niederspannungsnullpunktes soll mindestens 20 m vom Hause entfernt durch eine besondere Erde erfolgen, um den Übertritt von Hochspannung bei einem Durchschlag der Hochspannungswicklungen des Transformators gegen Eisen in das Niederspannungsnetz zu verhüten (Abb. 455). Die SSW haben kürzlich einen Normaltyp einer Landtransformatorstation herausgebracht.

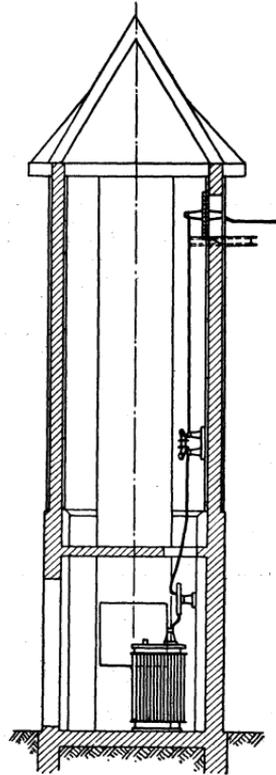


Abb. 455. Einfache Transformatorstation.

d) Maststationen. Diese gelangen dort zur Aufstellung, wo der Bau eines Hauses zu hohe Kosten verursachen würde. Die anfänglich gemachten schlechten Erfahrungen mit derartigen Stationen lagen an dem nicht wetterfesten Aufbau der hierfür verwendeten Transformatoren und dem mangelhaften Aufbau der Hochspannungssicherungen. Nachdem kurzschlußsichere und wetterfeste Transformatoren entwickelt und die Sicherungen so durchgebildet sind, daß ein gefahrloses Einsetzen der Schmelzstreifen möglich ist und Erdschlüsse durch Vögel verhindert werden, lassen sich heute wohl betriebssichere Maststationen herstellen.

Literatur: M. Neustätter, Die Hochsp.-Kraftübertr. d. Hidroelectrica Espanola. ETZ 1914, S. 535. — E. G. Fischinger, Die erste 110 000 Voltanlage in Europa. ETZ 1914, S. 845. — P. W. Sothmann u. J. Teichmüller, Die mit 110 000 Volt arbeitende U.Z. des Staates Ontario. ETZ 1914, S. 941; 1912, S. 423. — A. Feldsmann, Die Hochsp.-U.Z. d. Steinkohlenbergwerkes Rheinpreußen. ETZ 1912, S. 1223. — Über die Verwendung von Duroplatten in elektrischen Schaltanlagen. ETZ 1913, S. 829. — Hochsp.-Unterwerke im Freien. ETZ 1913, S. 1404. — W. E. Mitschell, Außenunterwerke der Alabama Power Co. ETZ 1914, S. 781. — E. Treiber, Das Kraftwerk an d. Mönhetalsperre. ETZ 1916, S. 155. — L. Steiner, Die elektr. Anlagen d. Gewerkschaft „Vereinigte Welheim“. ETZ 1916, S. 509. — L. Gorini, Kraftübertragungsanlage mit 80 000 Volt d. Energia Electrica de Cataluna, Barcelona. ETZ 1917, S. 62. — Kraftübertragungsanlagen in der Umgegend von Barcelona. ETZ 1918, S. 87. — H. Probst, Neuere Schaltanlagen. ETZ 1918, S. 141. — W. Petersen, Hochspannungsstraßen d. Elektrizität. ETZ 1919, S. 138. — J. Biermanns, Über d. Schutz elektr. Verteilungsanlagen geg. Überströme. ETZ 1919, S. 593. — H. Probst, Die Bedeutung d. Meß- u. Betätigungsstromkreise in Schaltanlagen. ETZ 1920, S. 85. — J. Biermanns, Technische Probleme d. elektr. Großwirtschaft. ETZ 1921, S. 25. — H. Probst, Ein- oder mehrstöckige Schalthäuser. ETZ 1921, S. 585. — J. Biermanns, Der heutige Stand der Überspannungsfrage. ETZ 1922, S. 805. — W. Petersen, Die Transformatorenschäden in Golpa. ETZ 1922, S. 1203. — J. Sessinghaus, Einheits-Transformatorstation f. Überlandwerke. Siemens Zeitschr. 1923, S. 428. — Schleicher, Meßeinrichtung z. Ermittl. d. günstigsten Wirk- u. Blindlastverteilung in Hochspannungsnetzen. Siemens Zeitschr. 1923, S. 430. — A. Rachel, Erfahrungen mit Höchstspannungsanlagen. M. d. V. d. El.-W. 1922, S. 538. — H. Zipp, Betr. Meßverfahren z. Ermittl. d. wirtsch. richtig. Verteilung d. Wirk- u. Blindströme. M. d. V. d. El.-W. 1923, S. 241. — H. Probst, Die Entwicklung d. neuzeitl. Hochsp.-Schaltanlagen. ETZ. Festschr. 1923, S. 34. — G. Schendell, Die Aufteilung ausgedehnter Mittelspannungsnetze. ETZ 1923, S. 891.

Bücher: W. Petersen, Hochspannungstechnik. Verl. F. Enke, Stuttgart. — J. Teichmüller, Lehrang d. Schaltungsschemata elektr. Starkstromanlagen. I. Gleichstrom. II. Wechselstrom. Verl. R. Oldenbourg, München. — H. Zipp, Handbuch d. elektr. Hochsp.-Technik. Verl. O. Leiner, Leipzig. — R. E. dler, Taschenbuch der Schaltungen aus d. Gebiet d. Starkstromtechnik. Verl. Jänecke, Leipzig. — Das Ölbüchlein, herausgeg. v. d. Verein. d. El. Werke, Berlin.

Schutzmaßnahmen in Hochspannungsanlagen.

(718) Schaltanlagen. Da der nachfolgende Betriebsstrom bei Durch- oder Überschlüssen infolge von Kurzschlüssen oder Überspannungen schwere Beschädigungen der Apparate hervorruft, sind Maßnahmen zu deren Verhütung notwendig. Infolge der immer größer werdenden Maschinenleistungen der Zentralen hat man hauptsächlich eine größere Kurzschlußsicherheit der Apparate fordern müssen. Die druckfesten Schalter genügen selbst hohen Anforderungen in dieser Beziehung, ebenso die kurzschlußsicheren Stromwandler. Will man bezüglich der Spannungswandler sicher gehen, so ist es ratsam, die nächst höhere Serie als für die betreffende Betriebsspannung notwendige zu wählen. Die in einer Anlage selbst erzeugten Überspannungen durch Fehlschaltungen und ungeschickte Schaltmanöver lassen sich in ihrer Gefährlichkeit bereits durch richtige Auswahl der Apparate und durchdachte Anordnung der Schaltanlage herabmindern. Größere Umschaltungen nehme man nur im Notfalle während des Betriebes vor und lasse diese nicht durch den Maschinen- oder Schaltwärter, sondern durch den Meister oder anderes technisch vorgebildetes Personal ausführen. Auf ein sorgfältiges Parallelschalten ist besonders zu achten. Ein häufiges Auslösen der Maschinenschalter ist durch richtige Wahl und Einstellung des Überstromschutzes zu vermeiden. Da moderne Generatoren und Transformatoren ohne Schaden kurze Zeit kurzgeschlossen laufen können, läßt man diese vielfach nur bei Kurz- oder Erd-

schlüssen innerhalb der Schaltanlage selbst auslösen, verriegelt sie aber gegen die aus dem Netz kommenden Störungen, die nur den betreffenden Streckenschalter zur Auslösung bringen dürfen. Um den Dauerkurzschlußstrom herabzusetzen, kann man auch nach einer zuerst von Brown, Boveri u. Co. angegebenen Methode eine Entmagnetisierung durch automatisches Herabsetzen der Erregerspannung beim Eintreten eines Kurzschlusses herbeiführen. Strom- und Spannungswandler sowie Auslösemagnete schützt man durch induktionsfreie Vorschalt- bzw. Überbrückungswiderstände oder Funkenstrecken. Ölschalter für Transformatoren und Fernleitungen erhalten Schutzschalter mit Vorschaltwiderständen, Transformatoren Drosselspulen ohne oder mit parallel geschalteten Ohmschen Widerständen. Bei Doppelsammelschienen erhält jedes System einen Feinschutz und eine dreiphasige Erdungsdrosselspule, die auch in einpoliger Ausführung an den Nullpunkt der Transformatoren gelegt werden kann. Bei Vorhandensein einer Erdschlußdrossel sind besondere Erdungsdrosselspulen nicht erforderlich. Die Begrenzung des Kurzschlußstromes durch vor die Maschinen oder in die Sammelschienen eingebaute Drosselspulen ist bereits in (717, S. 528) erwähnt. Um Fehlschaltungen zu verhindern, empfiehlt es sich, sämtliche Schaltzellen der Anlage fortlaufend zu nummerieren, ein ebenso nummeriertes einfaches Bild der Schaltanlage am Schaltwärterstand aufzuhängen und Schaltbefehle unter Bezeichnung der Nummer zu geben. Ausgeschaltete Zellen oder Freileitungen sind durch entsprechende Tafeln zu kennzeichnen. Außerdem kann man abgeschaltete Fernleitungen durch Einschieben eines mit isoliertem Handgriff versehenen, ω förmigen Kurzschließers in die Klemmbanken des ausgeschalteten Trennmessers kurzschließen und erden. Die Beschaffenheit der Kontakte an den Verbindungsstellen läßt sich während des Betriebes leicht mit einer an einer Schaltstange befestigten Stearinkeze kontrollieren.

(719) Hochspannungsnetze. Freileitungsnetze sind Störungen durch meteorologische Einflüsse, Fehlschaltungen und mechanische Ursachen besonders stark ausgesetzt. Es ist deshalb hier eine sorgfältige, auf den Erfahrungen der Praxis aufgebaute Bauausführung von großer Bedeutung, durch die bereits eine ganze Anzahl von Störungen vermieden werden kann. Die Abstände der Leitungen untereinander und von Konstruktionsteilen sollen reichlich sein, wobei wegen der Berührungsgefahr durch Vögel auf eine genügende Höhe der Stützen und auf eine richtige, keine Sitzgelegenheit bietende, Bauform der Querträger zu sehen ist. Bei Mehrleiterstrecken mit verschiedenen Querschnitten sind die Durchhänge richtig zu bemessen, um ein Zusammenschlagen der Leitungen bei Sturm zu verhindern. Die Anordnung von Leitungen übereinander sollte man vermeiden, oder mindestens die Isolatoren für den mittleren Draht weiter nach außen setzen, damit die bei Rauheif auftretenden starken Durchhänge nicht zur Berührung der einzelnen Drähte führen können. Strecken, die an baumbepflanzten Straßen oder durch Wald führen, sind durch genügende Ausholung vor Berührung durch Äste und Zweige zu schützen. Von wesentlichem Einfluß auf die Betriebssicherheit eines Netzes ist ferner dessen Gesamtanordnung. Die meistens durch den jahrelangen Zuwachs ziemlich regellos gewordenen Netze bedürfen einer Neuaufteilung zur Erhöhung der Sicherheit. Da ein einfacher billiger Selektiv-Überschutz zur Zeit noch nicht vorhanden ist, kann zu dem stark vermaschten Netzbetrieb nicht geraten werden, obgleich er zweifellos der rationellste wäre. Eine sternstrahlenförmige Aufteilung des Netzes ist daher vorzuziehen in der Weise, daß günstig gelegene Netzpunkte zu Schaltstationen ausgebaut werden, die von ein oder zwei Hauptspeisestationen ihre Zuleitungen erhalten, und ihrerseits Ausgangspunkte einer Anzahl von Verteilungsstrecken werden. Durch Einbau von Doppelsammelschienen oder mindestens auftrennbaren Einfach sammelschienen erhält man die Möglichkeit, die Strecken wahlweise oder bei starker Belastung über zwei Speiseleitungen zu speisen. Weitere Vorteile bei Störungen der einen oder anderen Speiseleitung ergeben sich von selbst. Durch diese Anordnung kann

man auch erreichen, daß ein vermaschter Betrieb ohne weiteres möglich wird, sobald einmal ein guter Selektivschutz vorhanden sein wird. Die Anzapfung von Speiseleitungen soll man möglichst unterlassen. Die an einen Ölschalter anzuschließenden Verteilungsleitungen sollten nicht länger als 50 bis 60 km sein. Die richtige Wahl und Anordnung des Überstromschutzes spielt eine wichtige Rolle. Sicheres Ansprechen und Auslösung in der gewünschten Reihenfolge müssen verlangt werden, damit bei einer Störung nur möglichst kleine Versorgungsbezirke betroffen werden. Die Stromauslöser bedürfen daher sorgfältigster Überwachung und sinngemäßer Neueinstellung, sobald sich Schalt- oder Belastungsvoraussetzungen ändern. Die Auswahl der Auslösesysteme kann etwa zur Zeit nach folgenden Gesichtspunkten erfolgen. Kurze Stichelungen erhalten Schnellauslöser, längere Leitungen abhängige Auslöser, wichtigere Leitungen begrenzt abhängige Auslöser, große Abnehmer oder Zuleitungen zu den Schaltstationen unabhängige Auslöser, ebenso die Speiseleitungen. Letztere können auch, wenn sie parallel betrieben werden, mit Selektivschutz versehen werden, deren Anschaffung sich auch heute schon für derartig wichtige Leitungen lohnt. Die größte Zahl der Netzstörungen werden durch gesprungene Isolatoren und Erdschlüsse verursacht. Bis zur Herstellung eines einwandfreien Kittes empfiehlt es sich daher, bis zu 20 kV Betriebsspannung einteilige Isolatoren, von 20 bis 40 kV aber zweiteilige, zusammengehanfte Isolatoren oder Hängeisolatoren mit möglichst wenigen Kittflächen zu nehmen. — Vielfach wird der erhebliche Wert der Erdschlußstromstärke in großen Netzen nicht genügend beachtet, z. B. bei Bemessung der Erdleitungen, der Widerstände von Hörnerableitern u. a. m. Um die Erdschlußstromstärke soweit herabzusetzen, daß ein Erdschlußlichtbogen nicht mehr stehen bleibt, kann man große Netze durch Transformatoren im Verhältnis 1 : 1 unterteilen oder Erdschlußdrosseln einbauen. Die in einem Netz auftretende Erdschluß-

stromstärke berechnet sich zu $i_0 = \frac{E \cdot (l_f + 25 l_k)}{300}$ Ampere und die Scheinleistung einer

Erdschlußdrossel zu $L_0 = E_0 \cdot i_0$ kVA, wo E = verkettete Spannung in kV, E_0 = Phasenspannung in kV, l_f = Länge der Freileitung in km und l_k = Länge des Kabelnetzes in km bedeuten. Die zur Abtrennung kurzer Strecken einzubauenden Mastschalter sollen möglichst in der Nähe von Telephonanschlüssen liegen, um schnelle Bedienbarkeit zu erreichen. Mastschalter sollten nur hierfür und nicht zu Umschaltzwecken verwendet werden. Diesem Zweck sollen nur die Schaltstationen dienen. Für dauernd guten Kontakt der Schaltflächen ist zu sorgen, da sonst empfindliche Lichtschwankungen, ungleiche Belastung der Phasen, Überspannungen sowie Geräusche in benachbarten Telephonleitungen auftreten. Besondere Sorgfalt ist auf die Ausführung und Kontrolle der Erdungen zu legen. Eine einwandfreie Lösung der Erdungsfrage ist trotz vielem Bemühen noch nicht erreicht worden. In welchem Umfange und wo im Netz Überspannungsapparate einzubauen sind, ist im voraus schwer zu bestimmen. Meistens kann man gefährdete Stellen erst nach einiger Betriebszeit feststellen. Kennzeichnet man alle vorkommenden Netzstörungen durch farbige Nadeln auf dem Netzplan, so erhält man nach einigen Jahren von den besonders gefährdeten Stellen im Netz Kenntnis. Am häufigsten verwendet man Hörnerableiter mit Öl- oder Emaillwiderständen. Öftere Kontrolle der Ableiter ist nötig, da Zerstörungen der Widerstände durch Überlastung und Witterungseinflüsse häufig vorkommen. In letzter Zeit neigt man dazu, Überspannungsschutzapparate möglichst sparsam anzuwenden und lieber die Durchschlagsfestigkeit und Kurzschlußsicherheit der angeschlossenen Apparate und Transformatoren zu erhöhen. Durch gewitterreiche Gegenden führende Strecken mit schlechten Erdungsverhältnissen werden nach Petersen durch ein geerdetes Eisenseil oberhalb der Leitungen geschützt. Über die Einrichtung der Netztransformatorenhäuser siehe (717, c) S. 531). Eine wichtige Rolle im Netzbetrieb spielt das Betriebstelephon. Anschluß an das Staatstelephon genügt nicht, da dieses nicht zu jeder Tages- und Nachtzeit zur Verfügung steht. Man ver-

wendet daher eigene Betriebstelephonanlagen, die entweder am Staatsgestänge oder unterhalb der Hochspannungsleitungen verlegt werden. In letzterem Falle ist auf genügenden Abstand von den Hochspannungsleitungen und auf genügende Anzahl von Stützpunkten zu achten, damit kein Zusammenschlagen der Leitungen bei Sturm erfolgt. Die drahtgerichtete und drahtlose Telephonie bedeutet auch für den Betrieb einen Fortschritt, die Ausarbeitung einer geeigneten Apparatur dürfte nur eine Frage der Zeit sein. Schließlich gehört zu den Schutzmaßnahmen in Hochspannungsanlagen ein tadellos organisierter Revisions- und Störungsdienst, auf dessen Durchbildung die größte Mühe zu verwenden sich lohnt.

Der Schutz von Hochspannungskabelnetzen gegen Überspannungen gestaltet sich einfacher und sicherer, da die meteorologischen Einflüsse fortfallen. Als Schutz gegen auftretende Wanderwellen bei Fehlschaltungen, Über- oder Durchschlägen an den angeschlossenen Apparaten wählt man hauptsächlich den Hörnerfeinschutz. Bei großen Kabelnetzen mit hohen zu übertragenden Leistungen ist nötigenfalls eine Begrenzung der Kurzschlußstromstärke durch Drosselspulen vorzusehen. Die Ölschalter für Kabelstrecken werden zweckmäßig mit Vorschaltwiderständen versehen; das Abschalten durch Trennmesser ist nicht rätlich. Für Abführung der Restladungen in den Kabeln ist Sorge zu tragen, bevor an diesen gearbeitet wird. Kabelstrecken ermöglichen die Anwendung des vorzüglichen Differentialschutzes gegen Überströme, da die besonderen Meßleitungen in die Kabel eingeschlossen werden können.

Literatur: W. Petersen, Der Schutzwert v. Blitzseilen. ETZ 1914, S. 1. — L. Binder, Schaltvorgänge u. elektr. Wanderwellen. ETZ 1914, S. 177. — W. Prehm, Übersp.-Schutz in Theorie u. Praxis. ETZ 1914, S. 417. — W. Linke, Schaltvorg. b. elektr. Masch. u. Transf. ETZ 1914, S. 757. — Bendmann, Betriebsregul. von Leitg.-Netzen d. Max. Zeitrelais. ETZ 1914, S. 845. — J. Mayer, Zur Blitzschutzfrage. ETZ 1914, S. 975. — E. Piffner, Übersp.-Schutz d. Drosselspulen u. Kondensatoren. ETZ 1914, S. 1101. — L. Binder, Messung. üb. d. Form d. Stirn- u. Wanderwellen. ETZ 1915, S. 241. — W. Petersen, Überströme u. Überspannungen in Netzen mit hohem Erdschlußstrom. ETZ 1916, S. 129. — K. Kuhlmann, Das Überspannungsproblem. ETZ 1916, S. 661. — W. Petersen, Der aussetzende Erdschluß. ETZ 1917, S. 553. — F. Schrottke, Zur Überspannungsfrage. ETZ 1922, S. 1425.

Bücher: Benischke, Schutzvorrichtungen d. Starkstromtechnik geg. atmosph. Entladungen. — W. Petersen, Überspannungen u. Übersp.-Schutz. — K. Kuhlmann, Grundzüge des Übersp.-Schutzes in Theorie u. Praxis.

Siebenter Abschnitt.

Elektrische Kraftübertragung.

Allgemeines.

(720) Zweck und Vorteile der elektrischen Kraftübertragung. Die elektrische Kraftübertragung bezweckt die wirtschaftliche Fortleitung benötigter Energiemengen in technisch leicht verwertbarer Form, wenn möglich unmittelbar bis zu der anzutreibenden Arbeitsmaschine. Ihre Überlegenheit zeigt sich in der Möglichkeit der Energiefortleitung auf praktisch beliebige Entfernungen bei geringen Energieverlusten, in der Einfachheit des Betriebes nicht ortsfester Maschinen mit Hilfe beweglicher Kabel, in der Möglichkeit, große Energiemengen in Akkumulatoren aufzuspeichern und sie nach Bedarf abzugeben, in der bequemen Anwendbarkeit für die mannigfaltigsten Zwecke, wie Beleuchtung, Motorenbetrieb, chemische Zwecke, Heizung usw. Die Motoren lassen sich für Leistungen von etwa $\frac{1}{60}$ kW und weniger bis herauf zu 10000 kW und mehr bauen, stellen also das gegenwärtig vollkommenste Mittel der Energieteilung dar. Die besonderen Vorzüge des Elektromotors sind: geringer Bedarf an Raum und Wartung, geringes Gewicht, hoher Wirkungsgrad, Widerstandsfähigkeit gegen Staub und Schmutz, vorzügliche Regelbarkeit der Geschwindigkeit, meistens unabhängig von der Belastung usw.

Die wirtschaftliche Bedeutung der elektrischen Kraftübertragung beruht auf der Möglichkeit, in großen, günstig gelegenen Kraftwerken die erforderliche Energie für ein weit ausgedehntes Gebiet zu erzeugen und sie mit geringen Verlusten bis zum Verbrauchsorte zu leiten, also die Ausnutzung der in den Rohprodukten Kohle, Gas usw. vorhandenen Energie mit vollkommenen Mitteln zu bewirken, insbesondere die in Wasserkräften gegebenen und in Talsperren künstlich aufgespeicherten Energiemengen wirtschaftlich günstig zu verwerten.

(721) Eigenschaften der wichtigsten Stromarten.

a) Gleichstrom (431 u. f.). Da der Kommutator den Bau von Maschinen für hohe Spannungen schwierig macht, kommt der Gleichstrom nur bei nicht zu großen Entfernungen in Frage. Eine Spannung über 1000 V wird selten gewählt. Eine Spannungswandlung ist nur durch sich drehende, Wartung erfordernde Umformer, deren Wirkungsgrad verhältnismäßig gering ist, möglich (569 u. f.). Gleichstromenergie läßt sich in Akkumulatoren aufspeichern, mit ihnen können die in Lichtenanlagen auftretenden Tagesschwankungen der Belastung sowie die in Kraftanlagen stoßweise auftretenden Belastungsschwankungen in weitgehendem Maße ausgeglichen werden (598 u. f.).

Die Motoren gehen unter Last an, sie lassen sich für sehr niedrige Drehzahl bauen. Hauptschlufmotoren vertragen stärkere Überlastungen als Nebenschlufmotoren; bei ihnen geht die Drehzahl mit wachsender Belastung in weitgehendem Maße zurück (442).

b) Drehstrom (501 u. f.). Da die Generatoren und Motoren für hohe Spannungen gebaut werden können und Spannungswandlung in ruhenden, mit hohem Wirkungsgrad arbeitenden Transformatoren möglich ist, so ist der Drehstrom besonders gut zur Übertragung großer Energiemengen auf große Entfernungen geeignet.

Für Antrieb durch Dampfturbinen werden die Generatoren für sehr große Leistungen und hohe Drehzahl gebaut, größte bisher gebaute Maschinen etwa 60 000 kVA bei 1000 Umdr/min (Abb. 299) und etwa 20000 kVA bei 3000 Umdr/min. Höchste Generatorspannung etwa 10000 V, doch sind auch schon Maschinen für höhere Spannungen gebaut. Höchste Fernleitungsspannung etwa 150 000 V, größte wirtschaftlich zu bewältigende Entfernung etwa 200 km.

Die Drehstrommotoren gehen, wenn in den Läuferstromkreis ein Anlaßwiderstand geschaltet wird, unter voller Last an, vertragen hohe Überlastung und erfordern wenig Wartung. Sie lassen sich bei der üblichen Frequenz 50 Per/s nicht für so niedrige Drehzahlen bauen wie Gleichstrommotoren.

c) Einphasiger Wechselstrom (497 u. f., 546 u. f.). Bezüglich Ausführung der Generatoren und Motoren für hohe Spannung sowie hinsichtlich wirtschaftlicher Spannungswandlung gilt das Gleiche wie für Drehstrom. Die neueren Formen von Motoren (Repulsionsmotoren, Reihenschlußmotoren usw.) gehen unter Last an, lassen sich aber nicht für so große Leistungen ausführen wie die Drehstrom- und Gleichstrommotoren. Hinsichtlich Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Belastung verhalten sie sich ähnlich wie die Gleichstrom-Haupt-schlußmotoren.

(722) Die Leitungsanlage zur Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie ist so zu bemessen, daß die gesamten Energiefortleitungskosten (Kosten der Energieverluste sowie Abschreibung und Verzinsung der Leitungen) möglichst gering werden, und daß bei allen vorkommenden Belastungen an den Stromverbrauchern die von ihnen benötigte Spannung herrscht. Die Unterlagen für die Berechnung der Energiefortleitungskosten sind jedoch in den meisten Fällen unsicher und ungenau, und die Möglichkeit zukünftiger Erweiterung der Anlage verlangt mindestens die gleiche Berücksichtigung, so daß von der Berechnung des sogenannten „wirtschaftlichen Querschnittes“ (675), bei dem die Fortleitungskosten auf ein Mindestmaß zurückgehen, meistens abgesehen werden kann.

Über die Berechnung von Leitungen und Leitungsnetzen s. (643) bis (669) u. (672) bis (675), Bau der Leitungen s. (676) bis (696), Apparate, Sicherungen, Schaltanlagen s. (697) bis (719).

Regelung der Drehzahl der Motoren.

(723) Gleichstrom. Wie unter (431) bis (451) näher ausgeführt ist, erfolgt die Regelung der Drehzahl der Motoren entweder durch Änderung der Feldstärke oder durch Änderung der dem Anker zugeführten Spannung. Die in letzterem Falle am meisten angewandten Mittel sind: a) ein vor dem Anker liegender Widerstand, b) Anschluß an eine Steuerdynamo, c) Gegenschaltung, d) Mehrleiternetz.

Der Widerstand im Ankerstromkreis wird nur in untergeordneten Betrieben verwandt, sobald die mit ihm verbundenen Nachteile, Energieverlust im Widerstand und Veränderlichkeit der Geschwindigkeit bei verschiedenen Belastungen, nicht von besonderem Einfluß sind. Bei der Regelung mit Hilfe einer Steuerdynamo wird die Energie zum Betrieb des Motors in einem besonderen Generator, dessen Spannung mit Hilfe eines vor der Magnetwicklung liegenden Regelwiderstandes verändert wird, der sogenannten Steuerdynamo oder Anlaßdynamo, erzeugt. Die jeweilige Drehzahl des Motors ist dann praktisch unabhängig von seiner Belastung. Wird die Steuerdynamo durch einen an das Netz angeschlossenen Motor angetrieben, so wird die Schaltung nach dem amerikanischen Erfinder Ward Leonard als Leonardschaltung (436) bezeichnet. Sie wird in großem Umfange zur Regelung der Geschwindigkeit sehr großer Motoren (Bergwerksfördermaschinen, Umkehrwalzenstraßen), sowie in solchen Fällen, in denen eine feinstufige, von der Belastung unabhängige, Regelung verlangt wird (Aufzüge, Papiermaschinen, Krane usw.) angewandt.

Ähnlich wie die Regelung mit Steuerdynamo arbeitet die Regelung der Ankerspannung mit Gegenschaltung (447). Hierbei liegt der Anker des zu regelnden Motors

mit den Ankern von 2 Gleichstromgeneratoren hintereinander in einem gemeinsamen Stromkreis. Die Ankerspannung des Motors wird zwischen Null und einem Höchstwert feinstufig dadurch geregelt, daß die Anker der beiden Generatoren bei Stillstand des Motors auf gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Spannungen eingestellt sind und zur Regelung der Motorspannung die Spannung des einen Generators von $-e_{max}$ über Null auf $+e_{max}$ mit einem vor der Magnetwicklung liegenden Umschalter und Widerstand verändert wird.

In Anlagen mit einer größeren Zahl Motoren empfiehlt sich oft die Einrichtung eines Mehrleiternetzes, etwa mit 3 oder 4 verschiedenen Spannungen, mit Hilfe dessen ohne Widerstandsregelung mehrere Ankerspannungen, etwa 6, eingestellt werden können, ein Mittel, das in amerikanischen Maschinenfabriken verschiedentlich angewandt wird (447). Bei Zuhilfenahme eines Feldregelwiderstandes läßt sich ohne ins Gewicht fallende Verluste eine weitgehende feinstufige Regelung herbeiführen (449).

(724) Drehstrom. Die Drehzahl der gewöhnlichen asynchronen Drehstrommotoren läßt sich am einfachsten mit Hilfe eines in den Läuferstromkreis geschalteten Widerstandes verändern (528, 1), ein Mittel, das trotz der mit ihm verbundenen Verluste und der Veränderlichkeit der Drehzahl bei verschiedenen Belastungen der Einfachheit und der niedrigen Anlagekosten halber häufig angewandt wird.

Auch bei großen Motoren wird es in bestimmten Fällen mit Vorteil benutzt, z. B. in Anlagen mit großen Schwungmassen, deren Energieinhalt die Motoren bei Belastungsstößen unterstützen soll (Schlupfwiderstand). Wenn das den Motor belastende Drehmoment mit sinkender Drehzahl gleichfalls abnimmt, wie bei Ventilatorantrieb, treten nur verhältnismäßig geringe Verluste im Widerstande auf.

Bei den polumschaltbaren Motoren (530) und den Kaskadenmotoren (529) werden zwar Widerstandsverluste vermieden, doch sind diese Motoren für die meisten Fälle zu teuer und ermöglichen auch nur die Einstellung einzelner weniger Drehzahlen, nicht aber eine feinstufige Regelung in weiten Grenzen. Beide Motoren, hauptsächlich der Kaskadenmotor, kommen für den Antrieb großer Bergwerksventilatoren vielfach in Frage.

Für eine feinstufige wirtschaftliche Regelung großer asynchroner Drehstrommotoren, z. B. bei Antrieb von großen Bergwerksventilatoren und von Walzenstraßen, kommen hauptsächlich in Frage: a) Umformung der an den Schleifringen abgenommenen Drehstromenergie in Gleichstrom zwecks Speisung eines den Hauptmotor unterstützenden Gleichstrom-Hintermotors (529, b), b) Umformung des den Schleifringen abgenommenen Drehstromes auf gleiche Spannung und Frequenz, wie das Hauptnetz besitzt, und Rückgabe dieser Energie ins Netz.

Für mittelgroße Leistungen sind die Doppelrepulsionsmotoren (Brown, Boveri & Co.), die Drehstrom-Reihenschlußmotoren (Siemens-Schuckertwerke) und die Drehstrom-Nebenschlußmotoren (Siemens-Schuckertwerke) mit Vorteil zu verwenden. Die beiden ersteren Motorarten finden Anwendung für Bergwerksfördermaschinen mittlerer Leistung, die Drehstrom-Nebenschlußmotoren u. a. für Werkzeugmaschinenantriebe. Die Drehzahl wird bei diesen drei Motorarten mittels Bürstenverschiebung geregelt.

Sondergebiete der elektrischen Kraftübertragung.

I. Bergwerke.

(725) Hauptschachtfördermaschinen. Die Fördermaschinen zerfallen in Trommelmaschinen (konische, zylindrische, konisch-zylindrische Trommeln), Treibscheiben- oder Koepemaschinen und Bobinenmaschinen. Der Motor treibt die Arbeitswelle entweder unmittelbar oder mittels Zahnradvorlegees an. Bei Maschinen von einigen 100 kW Motorleistung ab ist unmittelbare Kupplung vorzuziehen. Die erforderlichen Bremsen werden durch Druckluft, Bremsgewichte, Hilfsmotoren oder Bremsmagnete betätigt. Die Vollkommenheit

der Anlage wird bedingt durch die erreichte Steuerfähigkeit und die Sicherheit gegen Überschreitung der zulässigen Fördergeschwindigkeit sowie hauptsächlich gegen Zuweitfahren der Förderschale. Sie hängt von der Ausführungsart des elektrischen Teiles ab. Dieser soll folgende Aufgaben erfüllen: vollkommene Steuerfähigkeit und weitestgehende Sicherheit, Ausgleich der Belastungsschwankungen, soweit das Netz dies nötig macht, geringe Betriebskosten und Anlagekosten. Es kommen in Frage:

a) Antrieb durch einen gewöhnlichen asynchronen Drehstrommotor. Die Anlagekosten sind mäßig. Da die Fördergeschwindigkeit von der jeweiligen Belastung sowie davon, ob Last gehoben oder gesenkt wird, abhängt, läßt sich für größere Maschinen eine einigermaßen ausreichende Steuerfähigkeit auf rein elektrischem Wege schwer erreichen, vielmehr wird dazu zweckmäßig eine geeignet ausgebildete Regelbremse zu Hilfe genommen. Da sich der Motor bei der üblichen Frequenz von 50 Per/s nur bei sehr großen Leistungen für die geringe Drehzahl der Förderwelle bauen läßt, ist fast immer ein Zahnradvorgelege nötig. Die Stromstöße beim Anfahren sowie beim Wiedereinschalten des Motors am Schluß des Zuges, ferner beim Umsetzen einer mehrstöckigen Förderschale sind groß. Das Netz wird daher ungünstig beeinflusst. Der Energieverbrauch wird durch die Widerstandsverluste beim Anlassen sowie beim Fahren mit Gegenstrom unter Umständen sehr vergrößert. Um diesen auch von der Bewegungsenergie der Massen abhängigen Verlust soweit wie möglich zu vermindern, ist die Fördergeschwindigkeit nicht zu groß zu nehmen. Für Anlagen mit geringer Schachtteufe und großer stündlicher Zügezahl ist der Antrieb durch einen asynchronen Drehstrommotor ungünstig. Allgemein läßt sich nur bei kleinen und mittelgroßen Fördermaschinen eine ausreichende Wirtschaftlichkeit und Steuerfähigkeit mit ihm erreichen.

b) Antrieb durch Wechselstrom-Repulsionsmotor oder Drehstrom-Reihenschlußmotor. Die Grenze, für die die Motoren sich noch bauen lassen, liegt ungefähr bei einer mittleren Leistung von 300 bis 400 kW. — Hinsichtlich der Schwierigkeit der unmittelbaren Kupplung gilt das unter a) Gesagte. Da die Regelung lediglich durch Bürstenverschiebung erfolgt, werden Widerstandsverluste vermieden, und der Energieverbrauch steigt beim Anlassen allmählich an. Wird beim Verzögern vor den Ständer ein Widerstand gelegt, der so groß ist, daß Erregung des Ständers vom Netz aus vermieden wird, so ist es möglich, nutzbare Energie ins Netz zu geben und elektrisch abzubremsen. Auch hinsichtlich der Wirkung auf das Netz beim Einschalten und Anlassen sowie hinsichtlich des Energieverbrauches sind beide Motoren günstiger als der asynchrone Drehstrommotor. Ihre Nachteile sind hauptsächlich die große zum Verschieben der Bürsten nötige Kraftanstrengung, der hohe Bürstenverschleiß und die hohen Anschaffungskosten. Für Neuanlagen werden deshalb diese Motoren so gut wie gar nicht mehr genommen.

c) Antrieb durch Gleichstrommotor im Anschluß an eine Steuerdynamo. Die Geschwindigkeit ist praktisch von der Belastung unabhängig und allein abhängig von der Stellung des Steuerhebels, der den im Magnetstromkreis der Steuerdynamo liegenden Widerstand ein- und ausschaltet. Daher läßt sich ein sehr einfacher und sehr zuverlässig wirkender Sicherheitsapparat ausbilden, und die Steuerfähigkeit ist die denkbar günstigste. Da der Gleichstrommotor sich für niedrige Drehzahlen bauen läßt, ist in allen Fällen, in denen die Größe der Maschine es wünschenswert macht, unmittelbare Kupplung zwischen Motor und Fördermaschinenwelle möglich. Der Energieverbrauch der Steuerdynamo entspricht annähernd der Fördergeschwindigkeit, so daß die Belastungsweise des die Steuerdynamo antreibenden Drehstrommotors verhältnismäßig günstig ist. Verluste in den Widerständen treten in verschwindend geringem Umfange auf. Die den Strom für den Fördermotor liefernde Steuerdynamo wird unmittelbar durch eine Dampfmaschine oder eine Dampfturbine oder durch einen

Elektromotor, meistens einen Drehstrommotor, angetrieben. Bei unmittelbarem Antrieb durch eine Dampfturbine, der jedoch nur bei geringer Entfernung zwischen Kraftwerk und Förderanlage möglich ist, ist mit der Dampfturbine noch ein Drehstromgenerator für die übrigen Betriebe zwecks Schaffung einer Grundbelastung zu verbinden.

Bei Antrieb der Steuerdynamo durch einen Drehstrommotor wird, wenn das Kraftwerk im Verhältnis zum Energieverbrauch der Fördermaschine zu klein ist, ein Belastungsausgleich vorgesehen, und zwar entweder in Form eines Schwungrades oder einer Akkumulatorenbatterie. Da ein Schwungrad keinerlei Wartung bedarf, wenig Raum einnimmt, auch keinen schlechteren Gesamtwirkungsgrad der Anlage ergibt als eine Batterie, wird in der Regel ein Schwungrad genommen (Ilgner, ETZ 1902, S. 961; vgl. Abb. 322). In Verbindung mit großen modernen Dampfturbinenkraftwerken ergibt sich im Jahresdurchschnitt ein wesentlich geringerer Dampfverbrauch für die effektive Schacht-PSH als selbst bei den besten Dampffördermaschinen.

Der wirtschaftliche Vorteil des elektrischen Antriebes der Fördermaschinen gegenüber Antrieb durch Dampfmaschine ist gegeben durch den geringeren Verbrauch an Brennmaterial, bezogen auf die effektive Schacht-PSH und den Jahresdurchschnitt, durch die Einfachheit und Sicherheit der Bedienung, durch den Fortfall der hin- und hergehenden Massen und die dadurch erreichte Möglichkeit, schneller anzufahren und zu verzögern und infolgedessen größere Tagesleistungen zu erzielen, durch die Möglichkeit, die Fördermaschine über den Schacht zu setzen und dadurch wesentlich an Raum zu sparen, durch die Vergrößerung der Jahresleistung des Kraftwerkes und die dadurch verursachte Erniedrigung der Erzeugungskosten der elektrischen Energie usw.

(726) Ventilatoren. Wichtig sind hauptsächlich die großen Hauptschachtventilatoren zum Bewettern ganzer Gruben. Sie werden bei größeren Leistungen unmittelbar mit dem antreibenden Motor, fast immer einem Drehstrommotor, gekuppelt. Der Umstand, daß der Bedarf einer Grube an frischen Wettern mit ihrer Ausdehnung wächst, bringt oft die Notwendigkeit einer Regelung der Motordrehzahl mit sich. Sie kann mit Hilfe eines in den Läuferstromkreis geschalteten Regelwiderstandes (528,1) oder durch Ausbildung des Drehstrommotors als Kaskadenmotor (529) oder mit Hilfe eines an die Schleifringe des Läufers angeschlossenen Regelumformers (556) bewirkt werden. Ein Regelwiderstand ist am billigsten. Da beim Ventilator das erforderliche Drehmoment mit dem Quadrat der Drehzahl abnimmt, so nimmt bei Regelung mit einem solchen Widerstand auch der Energieverbrauch mit dem Quadrat der Drehzahl ab, während die Motorleistung mit der dritten Potenz der Drehzahl sinkt, die Verluste im Widerstand sind also verhältnismäßig gering. Dennoch sind die gesamten Jahresverluste unter Umständen erheblich, weil ein Hauptschachtventilator Tag und Nacht durchlaufen muß. Bei einem Kaskadenmotor, bei dem vorteilhaft der Sekundärmotor polumschaltbar gemacht wird, lassen sich mehrere Drehzahlen einstellen, eine ununterbrochene Regelung ist aber nicht möglich. Bei Verwendung eines Regelumformers im Läuferstromkreis wird die an den Schleifringen abgenommene Regelenergie im Umformer entweder in Gleichstrom umgewandelt und einem auf der Welle des Hauptmotors sitzenden Hintermotor zugeführt, oder in Drehstrom von gleicher Frequenz und gleicher Spannung, wie der Netzstrom besitzt, umgeformt und ins Netz zurückgegeben.

(727) Wasserhaltungen. Für die Wasserhaltungen werden Kolbenpumpen oder Kreiselpumpen genommen und beide fast immer unmittelbar mit den Motoren gekuppelt. Kolbenpumpen haben besseren Wirkungsgrad als Kreiselpumpen, sind aber wesentlich teurer und erfordern mehr Raum und Wartung. Für Hängepumpen, die beim Abteufen und Sumpfen von Schächten nötig sind, werden nur Kreiselpumpen, angetrieben durch vollkommen gekapselte Drehstrommotoren, deren Gehäuse durch Wasser gekühlt ist, genommen. Die üblichen

Drehzahlen der Kreiselumpen sind 1500 Umdr/min und bei großer Förderhöhe und verhältnismäßig geringer Wassermenge 3000 Umdr/min. Die Kolbenpumpen arbeiten mit etwa 100 bis 150 Umdr/min. Eine Regelung der Drehzahl ist bei Wasserhaltungen nicht erforderlich. Für die ortsfesten Wasserhaltungen werden tropf- oder spritzwasserdichte oder ganz geschlossene Motoren genommen. Bei letzteren ist die Kühlluft mit Hilfe sogenannter Lutten, das sind Rohrleitungen aus dünnwandigem Eisenblech von großem Durchmesser, durch ein Luftfilter hindurch den Motoren zuzuführen. Der Maschinenraum der Wasserhaltungen ist gegen Überflutung durch Ansteigen des Wassers so weit wie möglich zu schützen.

(728) Bohrmaschinen. In Frage kommen für weiches Gestein, wie Kali, Mennete, Kohle usw., Drehbohrmaschinen, für hartes Gestein Stoßbohrmaschinen. Der antreibende Motor, fast immer ein Drehstrommotor mit Kurzschlußanker, wird in der Regel unmittelbar an die Bohrmaschine angebaut. Bei den Drehbohrmaschinen wird häufig in das Getriebe zwischen Motor und Bohrer eine Reibungskupplung eingebaut, die bewirkt, daß der Bohrvorschub mit der Härte des Gesteins selbsttätig sinkt und steigt. Von den Stoßbohrmaschinen ist hauptsächlich diejenige mit Federhammer zu erwähnen, bei der der Bohrer durch hin- und hergehende Doppelfedern mit der vom Motor angetriebenen Welle verbunden ist. Ein mittels Gleitkupplung mit dem Bohrgetriebe verbundenes Schwungrad bewirkt annähernd gleichmäßige Beanspruchung des Motors und begrenzt die Beanspruchung des Getriebes, so daß die Abnutzung der einzelnen Teile auf ein geringes Maß herabgedrückt wird. Die Vorteile der elektrisch angetriebenen Stoßbohrmaschine gegenüber der Preßluftmaschine sind der geringe Energieverbrauch, der nur etwa gleich dem zehnten Teil desjenigen beim Preßluftbetrieb ist, die Unabhängigkeit des Energieverbrauchs vom Verschleiß und die durch die Feder gegebene große Rückzugskraft des Bohrers.

Elektrische Bohrhämmer haben sich bisher nicht bewährt. Es ist noch nicht möglich gewesen, ihr Gewicht so gering zu halten, daß sie bei genügender Leistungsfähigkeit bequem in der Hand gehalten werden und mit dem verhältnismäßig leichten Preßlufthammer in Wettbewerb treten können.

(729) Grubenbahnen. Zum Betrieb der Grubenlokomotiven können sowohl Gleichstrom- wie auch Wechselstrommotoren genommen werden. Die Verwendung der ersteren bildet die Regel. Wechselstrommotoren, und zwar Reihenschlußsowohl wie Repulsionsmotoren, sind vor mehreren Jahren eingeführt worden, um die sich drehenden, Wartung erfordernden Umformer zu vermeiden, die bei Gleichstrom-Grubenbahnen zum Anschluß an das Drehstromnetz nötig sind, und dadurch die Anlage- und Betriebskosten herabzudrücken. Die mit Wechselstrom ausgeführten Grubenbahnen haben sich betriebstechnisch gut bewährt, jedoch ist in Anlage und Betriebskosten eine Ersparnis nicht eingetreten. Andererseits haben sie weit mehr tödliche Unfälle durch Berührung der Kontaktleitungen herbeigeführt, weil Wechselstrom für den menschlichen Organismus gefährlicher ist als Gleichstrom. Auch macht die Wartung der Wechselstrom-Kommutatormotoren größere Schwierigkeiten als diejenige der Gleichstrom-Kommutatormotoren. Wenn zur Verringerung der Berührungsfähigkeit die Kontaktleitung so hoch gelegt wird, daß zufällige Berührung wenig zu befürchten ist, werden die Anlagekosten wegen der Vergrößerung des Streckenprofils zu hoch. Für Neuanlagen kommt daher Wechselstrom kaum noch in Frage.

Bei Gleichstromanlagen wird der dem Netz entnommene Drehstrom in Einankerumformern oder Quecksilbergeleichrichtern in Gleichstrom umgeformt. Die übliche Spannung beträgt 220—300 V, der Strom wird den Lokomotiven durch einpolige Oberleitung zugeführt und durch die Schienen zum Umformer zurückgeleitet. Eine Ausnahme hiervon kommt nur für Kalibergwerke in Frage, in denen das auf die Schienen fallende Salz den Berührungswiderstand zwischen Rad und Schiene leicht so sehr erhöht, daß ein einwandfreier Betrieb nicht aufrecht zu erhalten ist, weshalb hierfür doppelpolige Oberleitung besser ist. In Anlagen

mit Schienenrückleitung ist besonders auf Gruben, auf denen mit Hilfe des elektrischen Stromes geschossen wird, die Sprengpatronen also elektrisch gezündet werden, für gute Instandhaltung der Schienenverbinder Sorge zu tragen, um Streuströme, die den Schießbetrieb leicht stören, unschädlich zu machen. Die Lokomotiven sind den engen zur Verfügung stehenden Räumen durch enge Bauart anzupassen.

(730) Anlagen in schlagwettergefährlichen Grubenräumen. Jede elektrische Anlage, mit Ausnahme der Grubenbahnen mit Oberleitung, läßt sich so ausführen, daß eine Gefahr der Entzündung durch Schlagwetter, solange die Anlage gut gewartet und instand gehalten wird, nicht besteht.

Motoren, Apparate und Zuleitungen sind gegen mechanische Beschädigungen gut zu schützen und daher entsprechend widerstandsfähig auszubilden. Die bei nicht ortsfesten Maschinen erforderlichen beweglichen Zuleitungen sind derart auszuführen, daß sie einerseits genügend biegsam, andererseits gegen mechanische Beschädigungen widerstandsfähig genug sind. Die Einzelheiten geben die vom VDE aufgestellten Richtlinien für die Ausführung elektrischer Anlagen in schlagwettergefährlichen Grubenräumen.

(731) Sonstige Betriebe in Bergwerken. Außer bei den angegebenen Maschinen wird der elektromotorische Antrieb unter Tage noch für Schüttelrutschen, kleine Hilfsförderhaspel, Förderungen mit endloser Kette oder Seil, Zubringerpumpen, Sonderventilatoren, sowie über Tage zum Betrieb der Kohleseparationen, Kohlewäschen, Kompressoren, Erzaufbereitungen, Salzmühlen, Werkstätten usw. benutzt. In den meisten Fällen handelt es sich dabei, was den elektrischen Antrieb angeht, um einfache motorische Anlagen ohne Sonderbedingungen, so daß ein näheres Eingehen auf sie nicht erforderlich ist.

II. Hütten- und Walzwerke.

(732) Ausführung der Kraftwerke. Die Kraftwerke werden in der Regel im Anschluß an Hochöfen errichtet, um die im Hochofengas enthaltene Energie nutzbar zu machen. 1 kg im Hochofen verhütteter Koks liefert etwa 4,5 m³ Gas. Der Eigenverbrauch eines Ofens für Winderhitzung, Betrieb der Gebläsemaschinen usw. beträgt zuzüglich der Undichtigkeitsverluste etwa 60 %, so daß etwa 40 % zur Erzeugung von Strom frei werden¹⁾. Zum Betrieb der Generatoren des Kraftwerkes werden sowohl Großgasmaschinen wie auch Dampfturbinen aufgestellt. Erstere verbrauchen für 1 kWh indizierter Gasmaschinenleistung bei voller Belastung etwa 4 m³ Hochofengas, letztere etwa das Doppelte. Da der Gasverbrauch der Großgasmaschinen mit sinkender Belastung nur wenig abnimmt, stellt sich im Jahresmittel der Vergleich für die Dampfturbinen günstiger, und zwar ergibt sich bei Verfeuerung der Gase unterm Kessel und Benutzung großer Dampfturbinen nur ein um etwa 50 bis 60 % größerer Gasverbrauch als bei Verbrennung der Gase unmittelbar in den Gasmaschinen²⁾. Letztere bedingen höhere Ausgaben für Schmier- und Putzmittel, Wartung und Ausbesserungen sowie höhere Anschaffungskosten der gesamten Anlage. Trotzdem ergeben sie in der Regel geringere Selbstkosten für die kWh, sobald das verbrauchte Gas seinem Brennwert und dem ortsüblichen Kohlenpreis entsprechend bewertet wird. Betriebstechnisch vorteilhaft ist die gleichzeitige Verwendung von Gasmaschinen und Dampfturbinen, wobei letztere die Energie für die Belastungsspitzen liefern. Wärmeverbrauch der Gasmaschinen des Kraftwerkes des Georg-Marien-Bergwerks- und Hüttenvereins bei Osnabrück angegeben zu 4400 kcal/kWh bei 76 % Belastung. Unter Einrechnung aller Un-

¹⁾ Vgl. Langer, Die Maschinenanlage auf modernen Hüttenwerken. Stahl und Eisen 20. 4. 1910.

²⁾ Vgl. E. Riecke, Wärmeverbrauch von Gas- und Turbodynamos in Hüttenzentralen. Stahl und Eisen 27. 11. 1907.

kosten stellte sich 1 kWh auf großen Hüttenkraftwerken vor dem Kriege auf etwa 3 bis 5 Pfennig.

Es kommen sowohl Drehstrom wie auch Gleichstrom in Frage. Der letztere hat wichtige betriebstechnische Vorteile, wie die leichte Regelungsfähigkeit der Motoren usw., macht aber bei der großen Ausdehnung neuzeitlicher Hüttenwerke Schwierigkeiten hinsichtlich der wirtschaftlichen Fortleitung der Energie. Daher wird bei großen Werken in der Regel Drehstrom von 3 bis 10 kV genommen.

(733) Walzenstraßen. a) Stets in gleicher Richtung umlaufende Walzenstraßen. Soll die Straße dauernd mit der gleichen Grundgeschwindigkeit laufen, so eignen sich der Drehstrommotor und der Gleichstrommotor annähernd gleich gut. Der letztere wird, um die Schwungmassen richtig zur Arbeitsleistung heranzuziehen und selbsttätig den dazu nötigen Abfall der Drehzahl zu geben, als Doppelschlußmotor ausgeführt, während beim Drehstrommotor der nötige Abfall der Drehzahl durch einen Schlupfwiderstand herbeigeführt wird. Soll die Straße mit verschiedenen Grunddrehzahlen laufen, so ist der Gleichstrommotor dem Drehstrommotor gegenüber nennenswert im Vorteil, da sich die verschiedenen Drehzahlen bequem durch Änderung der Feldstärke einstellen lassen. Beim Drehstrommotor werden sie am besten mit Hilfe eines Regelumformers, der die in den Schleifringen abgenommene Energie wieder nutzbar macht (556), eingestellt.

b) Umkehrstraßen (Vorblokstraßen, Grobblechstraßen, Schienen- und Trägerstraßen). Da der Motor in der Minute 15 bis 20mal umgesteuert werden muß, läßt sich nur ein Gleichstrommotor in Verbindung mit einer Steuerdynamo (436) benutzen. Zum Ausgleich der sehr erheblichen Belastungsschwankungen ist der dabei nötige Zwischenumformer mit Schwungrad auszurüsten (nach Ilgner [725, c] Abb. 322). Der Energieverbrauch einer Walzenstraße und damit auch die erforderliche Größe des Antriebsmotors hängen in erster Linie von dem Gesamtgewicht des stündlich zu verwalzenden Eisens und der dabei erzielten Verlängerung ab. Jeder Eisensorte entspricht bei einem bestimmten Gewicht des Walzgutes und einer bestimmten Verlängerung eine gewisse erforderliche Arbeit, die allerdings auch von der Temperatur des Walzgutes, der Kaliberabstufung, dem Durchmesser der Walzen sowie der Walzgeschwindigkeit abhängt. Erfahrungszahlen hierüber sind in der einschlägigen Literatur veröffentlicht¹⁾. Der Wirkungsgrad zwischen den Klemmen des Umformermotors und den Walzen beläuft sich je nach der Belastung und der Größe der Anlage auf etwa 50 bis 70%.

Der wirtschaftliche Vorteil des elektrischen Antriebes der Walzenstraßen, insbesondere der großen Umkehrstraßen, gegenüber Antrieb durch Dampfmaschinen liegt in dem sehr geringen Verbrauch an Brennstoff, der sich im Jahresdurchschnitt für die t Walzgut ergibt, in der Vergrößerung der Jahresleistung des Kraftwerkes und der dadurch verursachten Erniedrigung der Erzeugungskosten der elektrischen Energie, in der Einfachheit und Sicherheit der Bedienung, in der durch die vollkommene Steuerfähigkeit des Motors gegebenen Möglichkeit der Erzielung größerer Jahresleistungen, in der Möglichkeit, den Energieverbrauch und damit auch den Zustand der Anlage dauernd zu überwachen usw.²⁾.

¹⁾ Vgl. Puppe, Versuche zur Ermittlung des Kraftbedarfes in Walzwerken. Verlag Stahl-eisen, Düsseldorf 1909. — Puppe, Neuere Forschungsergebnisse auf walztechnischem Gebiete. Vortrag, gehalten auf dem Internationalen Kongreß für Bergbau usw., Düsseldorf 1910. Verlag Julius Springer, Berlin. — Puppe, Beitrag zur Kenntnis des Kraftbedarfes von Träger-, Draht- und Blechstraßen. Stahl und Eisen 1912, S. 6. — Versuche an dem elektrisch angetriebenen Blockwalzwerk der Juliehütte O.-Schl. Stahl und Eisen 1913, S. 825. — Untersuchungen im Auftrage des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute über verdrängtes Volumen und Walzarbeit. Stahl und Eisen 1914, S. 1545.

²⁾ Einzelheiten bemerkenswerter ausgeführter Anlagen sind unter anderem enthalten in folgenden Veröffentlichungen: Th. Wendt, Die elektrisch betriebenen Umkehrwalzenstraßen in Georgsmarienhütte. Stahl und Eisen 1908, S. 577. — G. Meyer, Die elektrisch betriebene Umkehrblockstraße der Rheinischen Stahlwerke. Stahl und Eisen 1909, Heft 23.

(734) Rollgänge. Man unterscheidet *Arbeitsrollgänge* und *Transportrollgänge*. Die ersteren werden zur Bedienung der Umkehrstraßen benutzt und müssen in ein paar Sekunden umgesteuert werden können. Letztere laufen dauernd in gleicher Richtung und stellen an den Antriebsmotor und die Steuerapparate geringere Anforderungen. Zum Antrieb werden Gleichstrom-Reihenschlußmotoren oder Drehstrommotoren mit Schleifringanlasser verwandt. Der Gleichstrommotor erlaubt wegen der geringeren Eigenmassen ein rascheres Umsteuern. Der Antrieb der Rollen erfolgt mit mehrfacher Zahnradübersetzung. Die Motoren müssen in allen Teilen sehr kräftig gebaut und gut gegen Staub und Schmutz geschützt sein. Da die gewöhnlichen Motoren diesen Bedingungen nicht genügen, sind besondere „Rollgangsmotoren“, ähnlich den Kranmotoren, von den Elektrizitätsfirmen ausgebildet worden.

(735) Hochofenaufzüge. Die Größe der zu fördernden Lasten und der erforderlichen Geschwindigkeiten bedingt, daß der Antrieb ähnlich wie derjenige von Bergwerksfördermaschinen auszubilden ist. Da ähnlich wie bei diesen ein genaues Einfahren auf die richtige Höhe, nämlich die Höhe der Gichtbühne, nötig ist, gestaltet sich der Antrieb am vollkommensten bei Verwendung eines Gleichstrommotors in Verbindung mit einer Steuerdynamo (436), doch läßt sich auch ein Gleichstrommotor in Verbindung mit einem gewöhnlichen Ankeranlasser oder ein asynchroner Drehstrommotor mit Schleifringmotor verwenden, nur daß alsdann, besonders bei veränderlicher Belastung, größere Aufmerksamkeit seitens des Führers notwendig wird.

(736) Sonstige Hüttenwerksmaschinen. In Frage kommen außer den angegebenen wichtigsten Maschinen auf Hüttenwerken noch eine größere Zahl von Transportmaschinen sowie Maschinen zur Adjustage, d. h. zur Fertigbearbeitung der aus den Walzenstraßen kommenden Erzeugnisse. Der elektrische Antrieb der Transportmaschinen ist nach den unter (737) bis (740) dargelegten Gesichtspunkten auszuführen. In der Regel handelt es sich um stark beanspruchte Maschinen, weshalb der elektrische Teil besonders kräftig und reichlich sowie widerstandsfähig gegen Staub und Schmutz auszuführen ist. Bei den Maschinen zur weiteren Verarbeitung der Erzeugnisse der Walzenstraßen, wie den Scheren, Warmsägen, Lochmaschinen, Blechbiegemaschinen usw. werden an den elektrischen Antrieb, der hier, ebenso wie bei den Transportmaschinen, fast in allen Fällen selbstverständlich geworden ist, keine besonderen Forderungen gestellt, höchstens ist es bei schweren, mit Schwungmassen ausgerüsteten Scheren usw. nötig, ähnlich wie bei den ständig durchlaufenden Walzenstraßen, für richtigen Abfall der Drehzahl Sorge zu tragen.

III. Hebezeuge.

(737) Wahl der Stromart. Da in den meisten Fällen Motoren für Gleichstrom, Drehstrom und neuerdings auch für einphasigen Wechselstrom ohne weiteres zum Antrieb der Hebezeuge benutzt werden können, wird in der Regel die zur Verfügung stehende Stromart unmittelbar verwandt. Am brauchbarsten ist der *Gleichstrommotor*. Zum Antrieb von Kranen wird, sobald Gleichstrom zur Verfügung steht, stets ein Gleichstrom-Reihenschlußmotor genommen, dessen Vorzüge (hohes Anfahrmoment und hohe Überlastbarkeit, Sinken der Drehzahl bei starker und Steigen bei schwacher Belastung, sowie geringe Eigenbewegungsenergie des Ankers) ihn für den Antrieb von Kranen jeder Art zum vollkommensten Motor machen. Dagegen sind zum Antrieb von Aufzügen Nebenschlußmotoren vorzuziehen, da sie mit annähernd gleichmäßiger Drehzahl bei veränderlicher Belastung arbeiten und bei niedergehender Last nicht durchgehen, sondern Energie ins Netz zurückgeben. Für angestrengte Betriebe wird bei großen Leistungen, z. B. bei großen Wagenkippern, angestrengt arbeitenden großen Aufzügen (Warenhausaufzüge), mit Vorteil die Regelung durch Steuerdynamo (436) verwandt, die bei jeder, auch negativer, Belastung sehr genaues Fahren und Bremsen durch Energie-

rückgabe ermöglicht. Der Drehstrommotor, der in seinen Betriebseigenschaften dem Gleichstrom-Nebenschlußmotor gleicht, ist für Antrieb von Hebezeugen jeder Art auch geeignet, aber in vielen Fällen weniger als der Gleichstrommotor. Sein Anfahrmoment und seine Überlastbarkeit reichen für Hebezeugbetrieb vollkommen aus, von Nachteil ist aber, insbesondere für Kranbetrieb, daß seine Drehzahl bei schweren Lasten nur wenig abnimmt, so daß alsdann die verbrauchte Leistung diejenige von Gleichstrom-Hauptschlußmotoren übersteigt. Die Vorteile der Regelung durch Steuerdynamo sind mit ihm nicht zu erzielen.

Der einphasige Wechselstrommotor wird als Reihenschluß-Wechselstrommotor oder als Repulsionsmotor verwandt und gleicht alsdann in seinen Betriebseigenschaften dem Gleichstrom-Hauptschlußmotor. Bei Aufzugsbetrieb muß der Läufer nach Erreichung der vollen Drehzahl selbsttätig kurzgeschlossen werden, so daß er mit unveränderter Drehzahl weiterläuft.

(738) Bestimmung der Motorgröße. Die Motorgröße wird nicht nur nach der größten vorkommenden Belastung, sondern auch nach der Dauer der Belastung und der Pause bestimmt, da auch hiervon die Erwärmung des Motors abhängt¹⁾. Es werden besondere Motoren für aussetzenden Betrieb genommen. Die Leistung dieser Motoren wurde nach den bisherigen Normalien des VDE als Zeitleistung angegeben (der Motor kann ohne Unterbrechung die Leistung eine Stunde lang abgeben, ohne daß seine Erwärmung das zulässige Maß überschreitet). Diese Zeitleistung steht zu dem aussetzenden Betrieb in keiner Beziehung, und der Krankonstrukteur war bei der Auswahl der Motoren auf Schätzungen angewiesen.

Demselben Übelstand hat der VDE Rechnung getragen und bei der Neubearbeitung der „Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen (REM)“ ETZ 1922, Heft 11, S. 357, in § 28 den „Aussetzenden Betrieb“ wie folgt definiert: „Einschaltzeiten und stromlose Pausen wechseln ab, und die gesamte Spieldauer, die sich aus Einschaltdauer und stromloser Pause zusammensetzt, darf höchstens 10 Minuten betragen“ und § 31: „Der aussetzende Betrieb wird durch die relative Einschaltdauer gekennzeichnet. Relative Einschaltdauer ist das Verhältnis von Einschaltdauer zur Spieldauer“.

Als normale Werte der relativen Einschaltdauer gelten: 15, 25, 40 %. Wie sich ein Betriebsdiagramm mit unregelmäßigen Flächen (keine Rechtecke) auf die relative Einschaltdauer umformen läßt, ist in ETZ 1920, Heft 25 und 26 (Adler und Schiebeler) und in den Preislisten verschiedener Elektrizitätsfirmen behandelt. Mit dem neugeschaffenen Begriff der „Aussetzleistung“ und der „relativen Einschaltdauer“ lassen sich die Kranmotoren, den Betriebsverhältnissen angepaßt, bestimmen.

(739) Krane. a) Einteilung der Krane. Man unterscheidet Krane mit geradliniger Fortbewegung, wie Laufkrane, Bockkrane, Velozipedkrane, feststehende drehbare Krane, wie Werkstatt- und Werftdrehkrane, und fahrbare Drehkrane, wie Portaldrehkrane für Häfen, Drehkrane auf Lagerplätzen zum Verteilen der Kohlen usw. Die Ausbildung des elektrischen Antriebes hängt von der Arbeitsweise der Krane ab, gleicht sich aber in wesentlichen Punkten für alle Krane. Bei Laufkranen unterscheidet man Einmotoren- und Mehrmotorenkrane, je nachdem für die in Frage kommenden Bewegungen ein einziger Motor oder mehrere Motoren, je einer für jede Bewegung, genommen werden.

b) Ausbildung der Motoren, der Bremsen und der Steuerapparate. In trockenen, staubfreien Räumen sind offene Motoren zulässig, doch werden, um einheitliche Typen für alle vorkommenden Fälle zu haben, neuerdings in der Regel ganz gekapselte Motoren genommen, die zwecks bequemer Zugänglichkeit des Kommutators, der Bürsten usw. zweiteilig gemacht werden. Allseitig gedrungener Bau zur Erreichung geringsten Raumbedarfes ist gleichfalls erforderlich. Bei Drehstrommotoren ist der Luft-

¹⁾ Vgl. Oelschläger, ETZ 1900.

zwischenraum zwischen Ständer und Läufer größer zu machen als bei gewöhnlichen Motoren, und die Lager sind in ihren Abmessungen reichlich zu halten, um zu vermeiden, daß der Läufer bei den unvermeidlichen Erschütterungen des Motors am Ständer schleift.

Je nachdem die **Bremsen** den Zweck haben, die in Bewegung befindlichen Teile zum Stillstand zu bringen und nach dem Anhalten den Zustand der Ruhe zu sichern oder die niedergehende Last abzubremsen und die Senkgeschwindigkeit zu regeln, unterscheidet man **Stopp- oder Haltebremsen** und **Senkbremsen**. Die stets erforderlichen Stopp- oder Haltebremsen wirken am zweckmäßigsten an derjenigen Stelle, an der das kleinste Drehmoment vorhanden ist, also z. B. bei Krausrüstungen mit raschlaufenden Motoren auf die Motorwelle oder die Welle des ersten Vorgeleges. Um zu bewirken, daß bei ausgeschaltetem Motor die Bremse stets angezogen ist, werden die Bremsen in der Regel mit einem Bremsmagnet verbunden, der das Bremsgewicht lüftet, und der mit dem Motor ein- und ausgeschaltet wird. Die **Senkbremsen** haben den Zweck, die niedergehende Last abzubremsen. Da sie aber einen nicht unerheblichen Energieverbrauch mit sich bringen und der Abnutzung stark unterworfen sind, werden sie gegenwärtig fast stets ersetzt durch besondere **Senkbremschaltungen**, die es ermöglichen, rein elektrisch abzubremsen, wobei der Motor entweder auf Widerstand arbeitet oder Energie ins Netz zurückgibt. Beim Gleichstrom-Hauptschlußmotor wird der Anker über einen Widerstand kurzgeschlossen und die Magnetwicklung so geschaltet, daß sie im gleichen Sinne wie beim Lastheben erregt ist. Zur sicheren Einleitung der Generatorwirkung wird an den ersten Senkstufen die Magnetwicklung unmittelbar ans Netz gelegt. Durch allmähliches Verringern des Regelwiderstandes kann die Senkgeschwindigkeit in weitgehendem Maße vermindert werden. Den Drehstrommotor kann man beim Senken entweder mit etwas übersynchroner Geschwindigkeit als Generator aufs Netz arbeiten lassen oder nach Umschalten von 2 Ständerzuleitungen mittels Gegenstromes allmählich bis annähernd auf Null abbremsen. Die Energie der niedergehenden Last und die gesamte Bewegungsenergie werden dabei im Widerstand verbraucht.

Der Apparat, mit dessen Hilfe die verschiedenen Schaltungen ausgeführt werden, der **Steuerapparat** oder die **Schaltwalze**, braucht nicht unmittelbar am Motor aufstellung zu finden, sondern kann an beliebiger Stelle aufgestellt werden. Der Platz kann so gewählt werden, daß der Kranführer das Auf- und Niedergehen des Arbeitsstückes gut übersieht. Darin liegt ein wesentlicher Vorzug des elektrischen Antriebes von Kranen, der z. B. in Stahlwerken von großem Werte ist. Der Steuerapparat besteht aus dem eigentlichen Kontaktapparat und dem Widerstand, der getrennt von ihm aufgestellt wird. Im Gegensatz zu den sonst üblichen Regelwiderständen stehen die Kontaktfinger im Kontaktapparat fest, während die auf einer Walze befestigten Gleitstücke unter ihm hindurchgedreht werden. Das erleichtert sehr die Ausführung der verschiedenen Schaltungen, die für den Kranbetrieb nötig sind. Um die Zahl der Kontakte gering halten zu können, wird stets eine kräftige magnetische Funkenlöschung an allen Kontakten vorgesehen, die zu der großen Widerstandsfähigkeit solcher Apparate erheblich beiträgt.

(740) Aufzüge. Aufzugmaschinen werden durch Gleichstrom-Nebenschlußmotoren oder durch Drehstrommotoren, je nachdem die eine oder die andere Stromart zur Verfügung steht, angetrieben. Da Netze mit einphasigem Wechselstrom selten sind, kommen einphasige Wechselstrommotoren nur selten in Frage. Der Motor treibt die Trommelwelle mit Schnecke und Schneckenrad oder mehrfachem Zahnradvorgelege an. Da der Hauptvorteil des elektrischen Antriebes von Aufzügen in der vollkommenen Steuerfähigkeit und der hohen Betriebssicherheit liegt, bilden der Steuerapparat und die Sicherheitsvorrichtungen den wichtigsten Teil eines elektrischen Aufzuges. Die Bauart der Steuerapparate nebst Zu-

behör hängt von der gewünschten Art ihrer Bedienung ab. Diese erfolgt entweder von der Kabine oder von Anschlagstellen an den verschiedenen Stockwerken aus, und zwar entweder durch Übertragung mittels Seiles oder Handrades oder durch elektrische Übertragung.

Bei der **S e i l ü b e r t r a g u n g** erfolgt die Bedienung mit Hilfe eines längs des Aufzugweges gespannten Seiles, das bei Steuerungen von der Kabine aus durch diese hindurchgeführt wird. Da hierbei das allmähliche Einschalten eines Anlagers Schwierigkeiten machen würde, wird, um die Anfahrtschwindigkeit und die Anfahrtsstromstärke von der Bedienung unabhängig zu machen, meistens ein einfacher Umschalter, der manchmal noch mit einer oder zwei Widerstandsstufen ausgerüstet ist, in Verbindung mit einem Selbstanlasser benutzt. Der erstere wird durch das Seil betätigt. Der letztere ist entweder so gebaut, daß durch einen Zentrifugalregler die Widerstandsstufen nacheinander kurzgeschlossen werden, oder das Kurzschließen der Stufen erfolgt unabhängig von der Anfahrtschwindigkeit durch eine besondere Hilfskraft, wie ein Gewicht oder ein Federwerk mit Windflügelhemmung. Bei der **H a n d r a d s t e u e r u n g** wird der Wendeanlasser mit Hilfe eines in der Kabine untergebrachten Handrades durch den Führer allmählich ein- und ausgeschaltet. Die Geschwindigkeit am Anfang und am Ende der Fahrt wird also unmittelbar durch den Führer geregelt.

Um einen Führer entbehren zu können, werden die Aufzüge in den Wohnhäusern in der Regel mit **D r u c k k n o p f s t e u e r u n g** ausgerüstet. Die in der Kabine untergebrachten Druckknopfplatten, die von den Druckknöpfen der Kabine betätigten Relais, die auf den an der Aufzugmaschine angebrachten Anlaßwiderstand arbeiten, und der als Wendeanlasser ausgebildete Anlasser sind die hauptsächlichsten Steuerteile einer Anlage mit Druckknopfsteuerung. In der Regel sind die Relais in einem im Maschinenraume stehenden Kopierapparat, der wie ein Fördermaschinenteufelzeiger die Bewegungen des Aufzuges in verkleinertem Maßstabe wiedergibt, vereinigt. Die Schaltungen werden derart ausgeführt, daß die Kabine nur dann in Bewegung gesetzt werden kann, wenn alle Türen geschlossen sind. An den Endpunkten der Fahrbahn werden Sicherheitsausschalter angebracht, die von der Kabine beim Zuweitfahren betätigt werden und ein sofortiges Stillsetzen des Aufzuges herbeiführen, sobald sie in Tätigkeit treten. Bei stark benutzten Aufzügen, insbesondere dann, wenn, wie bei Warenhausaufzügen, ein Führer ohnehin erforderlich ist, werden besondere Kabinenschalter in der Kabine angeordnet, die die Relais ein- und ausschalten, so daß im Gegensatz zu der normalen Druckknopfsteuerung auch das Stillsetzen der Kabine durch den Führer bewirkt wird. Zur Verbindung der Kabine mit dem Maschinenraum dient ein biegsames Kabel.

Bei Aufzügen für große Fahrgeschwindigkeit ist die Regelung mit **S t e u e r d y n a m o** (436), insbesondere wenn die Beanspruchung sehr hoch ist, vorteilhaft, die ein sehr genaues, von der Belastung unabhängiges Fahren ermöglicht. Wegen der durch den dabei nötigen Umformer bedingten dauernden Verluste kommt sie jedoch bei normal beanspruchten Aufzügen nicht in Frage.

IV. Fabrikbetrieb.

(741) Papierfabriken. Die wichtigsten Maschinen in Papierfabriken sind die eigentlichen **P a p i e r m a s c h i n e n**, auf denen das Papier hergestellt wird. Sie stellen an den Antrieb verschiedene Sonderbedingungen, die durch einen Elektromotor, und zwar einen Gleichstrom-Nebenschlußmotor, am vollkommensten erfüllt werden können. Es ist zunächst nötig, daß die Papiermaschine langsam und vollkommen stoßfrei auf die gewünschte Geschwindigkeit gebracht werden kann, eine Forderung, der mit Hilfe eines feinstufigen Anlagers leicht genügt wird. Ferner soll die gewünschte Geschwindigkeit unabhängig von den vorkommenden Belastungsschwankungen möglichst genau eingehalten werden, andererseits aber muß

es möglich sein, die Drehzahl in weiten Grenzen zu ändern, entsprechend den verschiedenen Papiersorten, die auf der Maschine hergestellt werden sollen. Die Grenzen, innerhalb deren sie feinstufig regelbar sein muß, sind sehr weite, bis zu 1 : 20 und mehr. Energieverluste dürfen natürlich bei den verschiedenen Drehzahlen nur in geringem Maße vorkommen.

Diese Forderungen lassen sich in praktisch brauchbarer Weise nur mit Hilfe eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors erfüllen. Dabei erfolgt die Regelung entweder mit Hilfe eines in den Magnetstromkreis geschalteten Widerstandes oder mittels Gegenschaltung oder mit Hilfe einer Steuerdynamo in Form der Leonardschaltung. In dem ersten Falle sind, besonders bei sehr weitem Regelbereich, große Motoren nötig, da es möglich sein muß, das bei den verschiedenen Drehzahlen ziemlich unveränderliche Drehmoment auch bei stark geschwächtem Felde zu entwickeln.

Die Leonardschaltung (436) und die Gegenschaltung (723) stellen sich bei sehr großem Regelbereich und den größeren Papiermaschinen meistens billiger und wirtschaftlicher als ein Nebenschlußmotor mit Regelwiderstand im Magnetstromkreis. Im Anschluß an ein Drehstromnetz kommt in erster Linie die Leonardschaltung in Frage. Die Bedingungen hinsichtlich gleichmäßiger Drehzahl, gleichmäßigen Anlassens und feinstufiger Regelung lassen sich bei ihr am vollkommensten erfüllen. Der Einfluß der Belastungsschwankungen auf die Gleichmäßigkeit der Drehzahl ist bei geringer Spannung der Steuerdynamo, also geringer Papiergeschwindigkeit, am größten. Um ihn in den zulässigen Grenzen zu halten, nimmt man neuerdings, besonders bei den Maschinen für feine Papiersorten, mit Vorteil einen sogenannten Schnellregler (584, 585) zu Hilfe, der auch die niedrigste Papiergeschwindigkeit bis auf etwa $\frac{1}{2}$ bis 1% gleichmäßig hält.

Bei den **Kaländern** zum Trocknen und Glätten des Papiers erfolgt die Regelung der Geschwindigkeit ähnlich wie bei den Papiermaschinen. Im allgemeinen sind die Regelbereiche kleiner als bei den Papiermaschinen, so daß man in den meisten Fällen für die Regelung der eigentlichen Arbeitsgeschwindigkeit mit der Feldregelung auskommt. Für das Einziehen des Papiers wird vielfach das Aushilfsmittel benutzt, den Motor an eine niedrige Hilfsspannung zu legen und damit die erforderliche niedrige Geschwindigkeit (etwa $\frac{1}{10}$ der Höchstgeschwindigkeit) zu erreichen. Die sonstigen Hilfsmaschinen, wie **Schleifer**, **Holländer**, **Hadernschneider**, **Kollergänge** usw., erfordern keine oder nur geringe Regelung der Drehzahl, so daß der gewöhnliche Drehstromasynchronmotor oder Gleichstrom-Nebenschlußmotor, letzterer unter Umständen mit Regelung der Drehzahl mittels Widerstandes im Magnetstromkreis, stets genügen.

(742) Werkzeugmaschinen. Ist die Stromart nicht von vornherein, sei es durch Anschluß an ein bestehendes eigenes Kraftwerk oder an ein Stadtnetz, festgelegt, so ist die Entscheidung nach folgenden Gesichtspunkten zu treffen: Drehstrom läßt für kleine Leistungen die Verwendung von Kurzschlußanker-motoren zu und gibt bei großen Entfernungen zwischen den einzelnen Werkstätten geringere Leitungsverluste als Gleichstrom. Dieser dagegen ist dem Drehstrom hinsichtlich Regelfähigkeit der Motoren überlegen, auch weisen die Kran-ausrüstungen die oben näher angegebenen Vorteile auf. Der Drehstrom ist daher nur bei großen Entfernungen zwischen den einzelnen Werkstätten vorzuziehen.

Diejenigen Werkzeugmaschinen einer Fabrik, die in der Regel gleichzeitig laufen, werden in Gruppen von einem Motor unter Zwischenschaltung einer Transmission angetrieben, während für die unregelmäßig benutzten Maschinen, wie große Dreh- und Hobelbänke, Schleifsteine usw. der Einzelantrieb vorzuziehen ist. Insbesondere gestaltet sich auch für die meisten Holzbearbeitungsmaschinen, wie Hobelmaschinen, Kreissägen, Bandsägen usw., teils wegen ihrer sehr hohen Geschwindigkeit, teils wegen der aussetzenden Betriebsart der Einzelantrieb vorteilhafter. Im gegebenen Falle können für Einzelantrieb noch andere Gründe sprechen,

wie Schwierigkeiten bei der Anbringung der Transmissionen, bessere Zugänglichkeit zum Arbeitsstück, bessere Beleuchtung usw.¹⁾

Soll mit Rücksicht auf die Verschiedenheit der Materialien und die Abmessung der Arbeitsstücke die nötige Regelung der Drehzahl von Drehbänken, Hobelmaschinen usw. auf elektrischem Wege vorgenommen werden, so ist ebenfalls Einzelantrieb der Maschinen nötig. Sehr vorteilhaft gestaltet sich bei Gleichstrom dann die in amerikanischen Werkzeugmaschinenfabriken vielfach übliche Einstellung der verschiedenen Drehzahlen mit Hilfe eines Mehrleiternetzes (723), wobei es möglich ist, den Anker an verschiedene Spannungen zu legen, und unter Zuhilfenahme der Feldregelung die Möglichkeit einer weitgehenden feinstufigen Regelung mit normalen Motoren bei gutem Wirkungsgrad zu erhalten.

Was die Ausführungsart der Motoren angeht, so sind in den meisten Fällen gewöhnliche offene Motoren zulässig; nur in Holzbearbeitungswerkstätten sind geschlossene Motoren nötig, falls nicht für vollkommene Beseitigung des Staubes und der Späne unmittelbar an den Arbeitsmaschinen durch eine Staubsaugeanlage gesorgt ist.

Die erforderliche Motorleistung hängt von den angetriebenen Maschinen ab und ist in jedem Falle vom Lieferanten der Werkzeugmaschine anzugeben, falls sie nicht durch gleichartige schon im Betrieb befindliche Maschinen bekannt ist.

(743) Spinnereien. Der Betrieb der wichtigsten Maschinen, der Ringspinnmaschinen, stellt folgende Bedingungen an die Ausbildung des elektrischen Antriebs: Der Motor muß unempfindlich gegen Staub und Schmutz und auch bei dem unvermeidlichen feinen Staub praktisch feuersicher sein. Die Drehzahl muß möglichst gleichmäßig sein und nach Bedarf geregelt werden können. Der Gleichstrommotor läßt sich durch vollkommene Kapselung praktisch feuersicher machen. Die zur Kühlung nötige Frischluft kann dabei durch Rohrleitungen und Kanäle den Motoren zugeführt werden. Die Anker der Motoren werden mit Ventilatoren ausgerüstet, durch die die Luft angesaugt und durch den Motor hindurchgedrückt wird. Die Drehzahl kann mit Hilfe eines in die Feldwicklung geschalteten Widerstandes geregelt werden.

Neuerdings werden zum Antrieb der Spinnmaschinen in der Regel Wechselstrom-Repulsionsmotoren oder Drehstrom-Reihenschlußmotoren aufgestellt, deren Drehzahl sich ohne Widerstand durch Verdrehung der Bürsten verändern läßt. Um zu vermeiden, daß sich Schlingen oder Knoten im Garn bilden, ist es nötig, daß der Arbeitsvorgang, bei dem das gesponnene Garn auf die Spule aufgewickelt wird, schnell eingeleitet wird, d. h. die Beschleunigungsdauer kurz ist. Andererseits muß zur Vermeidung von Fadenbrüchen gleichmäßig beschleunigt werden. Ferner wird neuerdings, um mit einer bestimmten Ringspinnmaschine die höchste Leistung erzielen zu können, die Drehzahl des Motors während des Betriebes durch einen selbsttätig wirkenden „Spinregler“ so geregelt, daß das Garn stets mit der größten zulässigen Spannung auf die Spule gewickelt wird. Allen diesen Bedingungen kann beim Repulsionsmotor und beim Drehstrom-Reihenschlußmotor bequem mit Hilfe der Bürstenverschiebung genügt werden.

Mit Rücksicht auf die erforderliche Sicherheit gegen Feuersgefahr werden die Repulsions- und Reihenschlußmotoren ebenso, wie dies für die Gleichstrommotoren angegeben war, am besten ganz gekapselt und an eine Rohrleitung angeschlossen, durch die reine und kühle Luft zugeführt wird.

Die Verbindung zwischen Ringspinnmaschine und Motor erfolgt durch Zahnradvorgelege, wenn nicht unmittelbare Kupplung der Hauptarbeitswelle mit dem Motor möglich ist.

Die Hilfsmaschinen in Spinnereien, wie Ballenbrecher, Schlagmaschinen, Krempel usw. werden meistens an Transmissionen angeschlossen und von Gruppenmotoren, neuerdings vielfach auch durch Einzelmotoren angetrieben.

¹⁾ Kübler, Elektrische Einzelantriebe. ETZ 1908.

(744) Webereien. Die Webstühle werden wegen der Notwendigkeit, sie jederzeit einzeln schnell an- und abstellen zu können, ebenfalls einzeln angetrieben, und zwar gegenwärtig stets durch Drehstrommotoren mit Kurzschlußanker (Abb. 313 u. 314). Da die erforderlichen Motorleistungen nur gering sind und nur etwa 0,3 bis 2 kW betragen, können die Drehstrommotoren trotz des Kurzschlußankers bequem so gebaut werden, daß sie das erforderliche doppelte bis dreifache Anfahrmoment entwickeln. Um sie gegen Verstaubung zu schützen, werden die Motoren am besten ganz gekapselt. Ganz oder teilweise offene Motoren verlangen zu viel Reinigungsarbeit, was bei der großen Zahl der Motoren den Betrieb erschwert, und geben auch leicht zu Störungen Anlaß. In gewissen Sonderfällen, z. B. häufig bei Scher- und Stickmaschinen, muß es möglich sein, während des Betriebes eine zweite und dritte Geschwindigkeit einstellen zu können, zu welchem Zwecke polumschaltbare Drehstrommotoren brauchbar sind.

Die Verbindung des Stuhles mit dem Motor erfolgt am besten mittels Zahnradvorgeleges. Riemenantrieb ist wegen des bis zu 10% größeren Reibungsverlustes weniger vorteilhaft. Mit Rücksicht auf die Verschiedenheit der herzustellenden Gewebe sind verschiedene Arbeitsgeschwindigkeiten des Webstuhles nötig, die durch Auswechslung der Zahnräder leicht eingestellt werden können. Ein besonderer Vorzug des Zahnradantriebes liegt auch noch darin, daß nach dem Anstellen des Stuhles fast sofort die volle Geschwindigkeit erreicht wird, und kein Schlupf wie beim Riemen auftritt, wodurch leicht Fehler im Gewebe herbeigeführt werden. Beim Abstellen des Stuhles, wobei die in Bewegung befindlichen Massen schnell durch Anziehen einer Bremse zum Stillstand gebracht werden müssen, würde infolge der verhältnismäßig großen Bewegungsenergie der in Drehung befindlichen Motormassen leicht Zähne brechen. Dieses wird vermieden entweder dadurch, daß durch den Bremshebel auch die Kupplung zwischen Motor und Stuhl gelöst wird, oder daß zwischen Motor und Webstuhl eine sogenannte Rutschkupplung eingebaut wird, die, sobald der Motor über sein volles Drehmoment hinaus belastet wird, anfängt zu gleiten.

Das Ein- und Ausschalten der Motoren erfolgt durch besonders gebaute Webstuhlschalter, kräftig ausgebildete, meistens in gußeisernen Kästen im Fußboden untergebrachte Schalter mit leicht auswechselbaren Kontakten.

V. Elektrischer Betrieb in der Landwirtschaft und Überlandzentralen.

(745) Allgemeines. Die ersten elektrischen Anlagen in der Landwirtschaft waren Einzelanlagen, die meistens zum Anschluß vorhandener Kraftbetriebe, wie Mühlen, Brennereien, Sägewerke u. dgl. als Gleichstromanlagen gebaut wurden. Hauptsächlich dienten sie der Beleuchtung, aber auch der Kleinkraft, wie Wasserpumpen und Häcksel schneiden, selten kamen sie fürs Dreschen in Anwendung. Wirtschaftliche Gesichtspunkte waren nicht maßgebend. Später schlossen sich mehrere günstig zueinander liegende Güter oder Gemeinden zur gemeinsamen Versorgung zusammen. Für diese Verhältnisse reichte der Gleichstrom noch aus. Mit der Entwicklung des Drehstromes wagte man sich an größere Gebiete, man erkannte die Bedeutung gerade der elektrischen Kraft für die Landwirtschaft, und so entstanden die ersten Überlandzentralen in rein ländlichen Gegenden, deren wirtschaftliche Ergebnisse allerdings wenig ermutigend waren. Etwa im Jahre 1905 setzte eine verstärkte, teilweise stürmische Bewegung zur Versorgung des platten Landes mit elektrischer Energie ein. Der Elektromotor sollte die Leutenot auf dem Lande, die infolge der Industrialisierung Deutschlands allmählich schärfere Formen angenommen hatte, wenn auch nicht ausgleichen, so doch erheblich mildern. Leider wurden beim Bau die alten Fehler (752) wiederum gemacht, so daß infolge der unausbleiblichen Fehlschläge ein heftiger Streit für und wider Überlandzentralen die Folge war. Nun lassen sich wohl für die Wirtschaftlichkeit länd-

licher Überlandzentralen allgemein gültige Richtlinien aufstellen, die ganze Zusammensetzung des Gebietes muß aber von Fall zu Fall in Rechnung gesetzt werden. Wie verschieden da die Verhältnisse liegen, zeigt die nachstehende Tabelle 1, die dem statistischen Handbuch für das Deutsche Reich 1907 S. 114—117 entnommen ist. Für die infolge des Weltkriegs abgetretenen Gebiete sind Abzüge gemacht; da aber für diese Gebiete noch keine genauen statistischen Angaben vorliegen, sind die Zahlen der Tabelle nicht ganz genau.

Tabelle 1. Landwirtschaftliche Betriebe.

Größenklassen ha	Zahl der Betriebe 1000 ×	Größe der Flächen			
		landwirtschaftlich benutzt 1000 ha	forstwirtschaftlich benutzt 1000 ha	Öd- und Un- land einschl. unkultivierter Weide 1000 ha	sonstige Fläche: Haus- und Hof- raum, Wege und Gewässer 1000 ha
unter 2	3011	1663	403	83	99
2 — 5	956	3047	530	197	93
5 — 20	912	8614	1767	730	161
20 — 100	258	8809	2079	870	161
über 100	21	6235	2343	275	270
Zusammen:	5158	28368	7122	2155	784

Kleingrundbesitz findet sich in der Hauptsache in Süd-, West- und Mitteldeutschland, Großgrundbesitz im Osten des Reiches vor. Bei ersterem sind Dreschgenossenschaften vorteilhaft, bei letzterem ist Einzelbetrieb notwendig.

(746) Verbrauchsunterlagen, bezogen auf den Hektar unterm Pfluge. Beleuchtung. Zur Zeit der Kohlenfadenlampe betrug der Verbrauch durchschnittlich 4 kWh/ha, der durch die Metallfadenlampe auf etwa 2 kWh/ha sank, infolge der besseren Ausnutzung, vor allen Dingen infolge Einführung der Beleuchtung für die Arbeiterhäuser, aber auf seine frühere Höhe und darüber stieg. Diese Angaben gelten für Groß- und Kleingrundbesitz bis etwa 8 ha. Bei noch kleineren Besitzungen, namentlich unter 5 ha, bietet die Einheit des ha keine sichere Grundlage für den Verbrauch mehr.

(747) Kleinkraft. Hier ist der Elektromotor besonders wertvoll. Seine Überlegenheit gegen alle anderen bisherigen Betriebsarten, namentlich auch in wirtschaftlicher Beziehung ist unbestritten, sein Anwendungsgebiet vergrößert sich ständig, weitgehendste Mechanisierung aller Arbeitsmaschinen muß und wird kommen und rückt damit erst die Vorteile des elektrischen Betriebes ins rechte Licht. Verbrauch etwa 4 bis 6 kWh/ha steigend bis auf 8 kWh/ha. Motoren für kleine Maschinen vorteilhaft tragbar, sonst ortsfest für Einzel- oder Gruppenantrieb. Einen Auszug aus einer umfassenden Zusammenstellung von Wall em in der ETZ 1910, S. 673 gibt Tabelle 2.

(748) Dreschen. Der Verbrauch des Dreschens hängt vom Umfang des Körnerbaues und der Intensität der Wirtschaft ab, nebenbei fällt auch das trockene oder feuchte Einbringen der Ernte und die Länge des Strohes ins Gewicht, er schwankt zwischen 10 bis 18 kWh/ha und beträgt im Durchschnitt 12 bis 14 kWh/ha. Ein Minderverbrauch infolge geringeren Körnerbaues kann durch intensivere Wirtschaft und bessere Bodenverhältnisse ausgeglichen werden. Die Motoren sind wohl durchgängig fahrbar angeordnet. Bei größeren Gütern ist zum Ausdrusch der vom Hofe weiter entfernten Mieten oder Feldscheunen ein fahrbarer Transformator erforderlich. Die Größe der Motoren muß wegen des Anlaufes und der

Tabelle 2. Zusammenstellung der wichtigeren Kleinkraftmaschinen.

Name	Arbeitsbreite und sonstige Größenangaben	Leistung für den zehnstündigen Arbeitstag	Normaler Kraftbedarf in kW	Erforderliche Bedienung Leutezahl	Bemerkungen
Getreidereinigungsmaschine für Saatgut	40—70 cm	8—16 t	1—2,5	1—2	
Windfege	—	7,5—10 t	0,5	1—2	
	—	15—20 t	1,0	—	
Trieur	—	ca. 5 t	0,5	1—2	
	—	ca. 12,5 t	1	—	
Düngermühle	—	ca. 30 t	1,5—2	1	
Pumpe für Be- und Entwässerungsanlagen	je nach Bedarf und Förderhöhe				
Entladevorrichtung in der Scheune (Heu- und Strohaufzug) . . .	—	ca. 30 t	1—2	1—2	
Entladevorrichtung für ganze Fuder	—	ca. 100 t	2,5—4	1—2	
Elevator für Beförderung von Stroh, Heu und Getreide auf die Mieten oder den Boden in der Scheune	je nach örtlichen Verhältnissen	je nach Förderhöhe und Förderlast	ca. 2,5	2	
Sackaufzug	desgl.	desgl.	ca. 1	2	
Jauchepumpe	bei 4—5 m Förderhöhe	220 m ³	ca. 0,4	1	
Transportrinne (Schüttelrinne)	je nach Länge und örtlichen Verhältnissen		2,5—4	1	
Transportband	30 m Förderlänge 400 mm breit	10—20 t	ca. 2,5	1	
Spill zum Befördern schwerer Lasten			je nach Leistung	1—2	Geschwindigkeit 5 m/s
			4—9		
Winde desgleichen	—	ca. 5 t	ca. 4	1—2	
Grobstrohpresse	—	ca. 15 t	ca. 5	3—5	
	—	30 t	ca. 7—10	—	
Glattstrohpresse mit Selbstbinder	1500 mm breit	ca. 18 t	ca. 2,5—4	3—5	
Mahlmühle, einfacher Mahlgang	1,5 m D.	ca. 0,2—0,4 t ¹⁾	ca. 2,5—3	1	1) Je nach Getreideart und Schärfe der Steine
Häckselmaschine für Verkaufsgut	40 cm breite Schnittfläche	ca. 10 t	ca. 3—4	3	
Desgl. größeres Modell, einschl. Sieb, Reinigungsvorrichtung und Elevator	—	ca. 20 t	ca. 5—8	3	
Kreissäge	25 bis 50 cm D.	—	1—6	1	
Gattersäge	—	—	5—7	1	
Bandsäge, Bohrmaschine, Drehbank, Radmaschine, Schleifstein	—	—	0,5—3	1	

Name	Arbeitsbreite und sonstige Größenangaben	Leistung für den zehnstündigen Arbeitstag	Normaler Kraftbedarf in kW	Erforderliche Bedienung Leutezahl	Pe-merkungen
Torfpresse	—	30000—40000 Soden	ca. 5	10—12	
Schleifstein, Bohrmaschine, Drehbank, Bläser	—	—	ca. 1,5	1—2	
Häckselmaschine	30—40 cm	3—7 t Pferdehäcksel	1,5—3	2—3	
Ölkuchenbrecher	22—35 cm	ca. 15 t	ca. 0,75	1	
Rübenschneider	—	ca. 6,5 t	ca. 2,5	1	
Schrotmühle	160 cm Mahlscheibendurchm.	0,25—0,5 t	ca. 2,5	1—2	
Schrotmühle	600 cm Mahlscheibendurchm.	3—3,5 t	5—7	1—2	
Kartoffelquetsche	—	ca. 20 t	0,5—1	1	
Haferquetsche	8—15 cm	ca. 2 t	ca. 1,5	1	
Wasserpumpe für Trinkwasser und Stallversorgung	je nach Bedarf und Förderhöhe				
Torfstreu-Reißwolf	—	75—100 t	3—4	1	
Schafschere	—	—	ca. 0,1	1	
Fahrbare Säge	in einem Schnitt	1 Stamm von 40 cm Durchm.	ca. 4—6	1	

schweren Stöße reichlich bemessen werden. Die geeignete Motorgröße liegt bei Gütern von etwa

10 ha zwischen	3,3 u. 4,4 kW;	250 ha höchstens	18 bis 21 kW;
25 „ „	5,3 u. 7,0 „ ;	400 „ „	21 bis 28 „
50 „ „	7,0 u. 8,5 „ ;	500 „ „	28 bis 33 „
125 „ „	12,5 u. 18 „ ;		

Bei Neuanschaffung von Dreschsätzen sollte man sich möglichst an die kleineren Größen halten. Der Streit um die Frage, ob das elektrische Dreschen mit anderen Betriebsarten, namentlich mit Lokomobilbetrieb, den Vergleich aushalten kann, ist müßig. Für sich betrachtet kann das elektrische Dreschen teurer werden, im Rahmen der Gesamtversorgung ist aber der elektrische Betrieb nicht nur durchaus wirtschaftlich, sondern es sind die Vorteile der steten Betriebsbereitschaft, namentlich in regnerischen Zeiten, gar nicht hoch genug einzuschätzen. Auch die volkswirtschaftlichen Gesichtspunkte dürfen nicht übersehen werden, beträgt doch die Kohlenersparnis beim elektrischen Betriebe bis zu 50 % gegenüber dem Lokomobilbetriebe. Die Strompreise sind deshalb auch von untergeordneter Bedeutung. Hervorzuheben ist weiterhin die Gleichmäßigkeit des Ganges, die bei Lokomobilbetrieb nur mittels besonders großer Typen erzielt werden kann. Zum Dreschen eines Zentners Getreide wird durchschnittlich 0,5 kWh benötigt. Zusammengefaßt kann man sagen, daß die reine Landwirtschaft für ihre Betriebe nach einer gewissen Reihe von Jahren der Entwicklung durchschnittlich 20 kWh/ha unterm Pfluge gebraucht. Dieser Verbrauch läßt sich durch Vergrößerung des Anwendungsgebietes (746) ganz erheblich steigern,

was umso leichter möglich ist, als der mechanische Antrieb beim elektrischen Betriebe bis ins kleinste durchgeführt werden kann.

(749) Landwirtschaftliche Industrie. Mit der Landwirtschaft hängen aufs engste Betriebe, wie Mühlen, Molkereien, Stärkefabriken, Brennereien, landwirtschaftliche Maschinenfabriken, Trockenanlagen zusammen, die sich in allen Gegenden, wenn auch in wechselnder Zusammensetzung, wiederfinden. Ihren Verbrauch kann man zu 25 bis 40% von dem der reinen Landwirtschaft annehmen, bezogen auf die Abgabe an ein ganzes Gebiet.

Von ganz besonderer Bedeutung scheint die Haltbarmachung von saftigen Futtermitteln durch Elektrizität zu werden. Gelingt es, diese Aufgabe technisch und wirtschaftlich zu lösen, so kann der Ankauf des teuren ausländischen Kraftfutters erspart werden. Vgl. die Broschüre der Elektro-Futter-Gesellschaft Dresden: „Frischhaltung von Grün- und Saffutter aller Art durch Elektrizität“, „Die elektrische Futtermittelkonservierung“ von Dipl.-Ing. Arthur Vietze, Generaldirektor, Halle a. d. S., „Elektrofutter“ von Hermann Osten und „Reingewinn aus Elektro-Futtermitteln . . .“ von W. Grams.

Bei Überlandzentralen mit leistungsfähigen Wasserkraften scheint die Ausnutzung der Elektrizität zu Heizzwecken aussichtsreich zu sein. (Siehe Vortrag von Dr. Paßavant Heft 321 der Mitteilungen der Vereinigung der Elektrizitätswerke Jahrgang XXI, 1922).

(750) Pflügen. In den Jahren 1908 bis 1912 hatten die elektrischen Pflüge in den Provinzen Posen und Pommern größere Verbreitung gefunden, als die Entwicklung des Motorpfluges einsetzte, die die weitere Ausdehnung zunächst hemmte. Da die Motorpflüge bei welligem und steinigem Gelände, sowie bei regenreichen Perioden versagen, ihre Anwendbarkeit außerdem auf eine gewisse Pflügtiefe beschränkt ist, so tritt für diese Fälle der Seilpflug, mag es sich um Dampf- oder Elektropflüge handeln, wieder in den Vordergrund. Wirtschaftlich ist der Elektropflug dem Dampfflug überlegen, hat auch den Vorteil, bergiges Gelände noch bearbeiten zu können, in dem letzterer versagt, aber den Nachteil, daß er von der Leitung, namentlich beim Umsetzen, abhängig ist. Bei geschulter und eingearbeiteter Bedienungsmannschaft macht sich diese Abhängigkeit weniger bemerkbar. Könnte der Transport künftigvielleicht durch Lastkraftwagen erfolgen, würde dieser Nachteil fortfallen. Man unterscheidet Ein- und Zweimaschinenpflüge. Bei dem Einmaschinenpflug wird der zweite Windewagen durch den sogenannten Ankerwagen ersetzt. Der Windewagen besitzt je eine Trommel für das direkte und indirekte Seil. Durch Aufrollen des direkten Seils bewegt sich das Ackergerät auf den Windewagen zu, das indirekte Seil läuft über eine Rolle des Ankerwagens und ermöglicht dadurch den Gegenzug. Bei diesem System ist also nur eine Stromzuführung (fahrbarer Transformator) erforderlich, damit nur die Hälfte der Stickleitungen. Beim Zweimaschinenpflug sind 2 Windewagen vorhanden, der Betrieb regelt sich wie beim Dampfflug. Entsprechend den beiden Stromabnahmepunkten sind mehr Stickleitungen zu bauen. Die Anlagekosten sind infolgedessen höher. In beiden Fällen wähle man das Stromzuführungskabel von den fahrbaren Transformatoren zum Windewagen aus praktischen Gründen nicht zu kurz, Spannung für die Motoren von 62 bis 72 kW Dauerleistung, infolgedessen etwa 1000 V. Die AEG baut hauptsächlich das Einmaschinensystem nach *B r u t s c h k e* oder *M e y e r* und eigener Konstruktion. Die SSW bevorzugen mehr das Zweimaschinensystem, das für schwere Böden anscheinend betriebssicherer ist, auch eine größere Leistung hat und vor allen Dingen die Benutzung eines Gerätes zum Schalen gestattet. Der Stromverbrauch beträgt durchschnittlich 48 bis 52 kWh für den gepflügten ha, der im einzelnen bei schweren Böden und tiefem Pflügen bis 80 kWh heraufgeht. Bei Einführung des elektrischen Pflügens ist ein Ausgleich der Schläge erforderlich, die möglichst rechtwinklig und nicht unter 100 Morgen sein sollen. Elektrische Motorpflüge, im besonderen die Bodenfräse der SSW, befinden sich noch im Versuchsstadium.

(751) **Feldbahn.** In landwirtschaftlichen Betrieben haben sich elektrische Feldbahnen bis auf einige Fälle in Gegenden mit starkem Zuckerrübenbau infolge ihrer Unwirtschaftlichkeit bislang nicht einführen können.

Wirtschaftlichkeit.

(752) **Anlagekosten.** In der ETZ 1910, S. 607 ist die nachfolgende Tabelle 3 veröffentlicht, in der die 3 Hauptgruppen von Überlandzentralen zusammengestellt sind, und die zeigt, wie teuer verhältnismäßig rein landwirtschaftliche Zentralen bezogen auf 1 kW Zentralleistung werden.

Diese Zahlen brauchen aber nicht abzuschrecken, wenn man die Fehler der ersten Anlagen vermeidet, die darin bestanden, daß viel zu teuer gebaut, das Versorgungsgebiet zu klein gewählt, zum größten Teil mit fremden, also teureren Geldern gewirtschaftet und schließlich noch der Betrieb nicht nach streng kaufmännischen Grundsätzen geführt wurde.

Die Gesichtspunkte für die Kraftwerke sind die gleichen wie bei anderen Zentralen. Leitungen und Transformatorstationen sind bei aller Betriebs-

Tabelle 3. Anlagekosten der Überlandzentralen für

Laufende Nummer	1. Industrie			2. Industrie und Landwirtschaft			3. Landwirtschaft		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
	für die nutzbar abgegebene kWh M	für 1 kW Zentralleistung M	Benutzungsstd. Jahresabgabe max. Belastung 	für die nutzbar abgegebene kWh M	für 1 kW Zentralleistung M	Benutzungsstd. Jahresabgabe max. Belastung 	für die nutzbar abgegebene kWh M	für 1 kW Zentralleistung M	Benutzungsstd. Jahresabgabe max. Belastung
1	1,48	1265	1500	5,05	6750	1180	7,30	2370	1300
2	1,24	1850	1470	3,58	1520	1640	7,15	1620	1550
3	1,00	1590	2110	2,96	2500	1240	6,67	2000	920
4	0,97	1720	1240	2,80	1360	800	5,40	2740	—
5	0,90	780	1490	2,35	1410	935	4,65	1550	835
6	0,78	710	2420	1,89	635	—	4,25	2130	800
7	0,69	1060	2100	1,85	1670	—	3,82	3170	1250
8	0,68	717	2280	1,73	1320	1520	3,64	2320	1110
9	0,58	650	2150	1,64	2470	1730	3,53	3660	1240
10	0,54	1080	4000	1,56	1145	1280	2,58	940	470
11	0,52	1250	3200	1,43	1460	1550	2,50	1160	875
12	0,51	520	1850	1,36	645	1170	2,15	1520	1520
13	0,48	1060	2820	1,24	1130	—	2,00	1960	—
14	0,46	—	3600	1,21	2020	2100	1,94	1310	—
15	0,44	525	2550	1,16	1290	1510	1,75	2200	1660
16	0,35	850	3300	1,13	—	—	—	—	—
17	0,35	1000	5940	1,06	742	1340	—	—	—
18	0,12	—	—	0,86	1225	2470	—	—	—
19	—	—	—	0,78	1130	2280	—	—	—
20	—	—	—	0,77	1120	1750	—	—	—
21	—	—	—	0,62	1085	2720	—	—	—
22	—	—	—	0,57	925	2620	—	—	—
23	—	—	—	0,20	—	3800	—	—	—
Mittelwert	0,67	1039	2445	1,64	1340	1770	3,95	2043	1127

sicherheit so einfach wie möglich zu halten, Holzmasten sollen aber unter allen Umständen imprägniert sein. Auf richtige Wahl der Transformatoren ist besonders zu achten. Bei einem großen Versorgungsgebiet ist der Ausgleich derart gut, daß es unwesentliche Spitzen nur in den Übergangsmonaten, in denen noch nicht

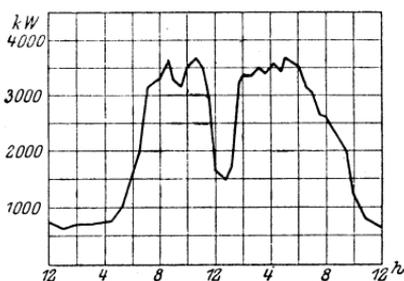


Abb. 456. Belastungskurve eines Wintertages von der Überlandzentrale Belgard.

oder nicht mehr gedroschen wird, gibt. Jede landwirtschaftliche Industrie muß neben den Landstädten zum Anschluß gebracht werden, die Ausnutzung wird dann eine viel bessere, als in den Beispielen nach Tabelle 3. Im Anschluß hieran ist die in Abb. 456 dargestellte Belastungskurve von der Überlandzentrale Belgard interessant.

Baut die Überlandzentrale möglichst mit eigenen Geldern und wählt eine kaufmännisch bewegliche Gesellschaftsform, so wird die Wirtschaftlichkeit nicht ausbleiben. Auf besondere Überschüsse kann verzichtet werden, ohne natürlich ausreichende

Rücklagen für Erneuerungen außer acht zu lassen. Hauptsache ist die wirtschaftliche Verbesserung des Versorgungsgebietes. Es empfiehlt sich deshalb, daß die betreffenden Kommunalverbände selbst bauen und die Verwaltung nach den bereits erwähnten Grundsätzen einrichten.

(753) Abschreibungen und Tilgung. Die Abschreibungen können mit Rücksicht auf die Höhe des im Leitungsnetz angelegten Kapitals niedrig gehalten werden. Es genügt, wenn 2 bis 3% vom gesamten ursprünglichen Anlagekapital jährlich abgeschrieben oder zurückgelegt werden. Nachstehend einige mittlere Abschreibungssätze für fertig verlegte Anlageteile aus Überlandnetzen; die Rücklagen sind verzinslich angelegt und der Wert des Altmaterials ist berücksichtigt:

Kupferleitungen	1%
Aluminiumleitungen	2%
Eisenleitungen	10%
Eisen- oder Betonmaste	1%
Holzmaste mit Zubehörteilen	4%
Transformatoren mit Schalteinrichtungen	4%

Soweit das Anlagekapital durch Anleihen, z. B. bei Kommunalverbänden, aufgebracht wird, muß eine Tilgung in der von der Aufsichtsbehörde festgesetzten Weise erfolgen. Im allgemeinen rechnet man mit 0,75 bis 1,5%. Es ist dahin zu streben, die Tilgung erst nach 3 oder 5 Jahren beginnen zu lassen, um über die ersten Entwicklungsjahre besser hinweg zu kommen.

(754) Verkaufspreise und Tarife. Etwas niedrigere oder höhere Verkaufspreise sind für die Landwirtschaft nicht von ausschlaggebender Bedeutung, viel wichtiger ist, daß überhaupt elektrischer Strom zur Verfügung steht, da dessen Verbrauch auch bei bester Ausnutzung bezogen auf den ha unterm Pfluge gegenüber den anderen Unkosten durch Düngung und Bearbeitung des Bodens sehr gering ist. Aus dieser Erwägung heraus ist es überflüssig, z. B. für Dreschen besondere, niedrigere Preise festzusetzen, und verkehrt, die Tarife nicht ausreichend zu wählen. Schuld an diesen Zuständen und dem Streben nach ungesunden Verkaufspreisen tragen die Baugesellschaften, die sich durch gegenseitiges Unterbieten den Rang abzulaufen suchten.

Die Wahl des Tarifsystems gehört zu der wichtigsten Aufgabe. In dem vorliegenden Abschnitte handelt es sich vorwiegend um die Bedürfnisse der landwirtschaftlichen Überlandzentralen, welche oft ganz andere Bedürfnisse haben als die Industriezentralen. Da jedoch die bei diesen im Laufe der Jahre eingeführten Tarife

sehr vielseitig geworden sind (631 u. ff.), so eignen sich eine große Anzahl derselben auch für die vorliegenden Zwecke. Neben reinen Zählerтарifen kommen Pauschalтарife und gemischte Tarife mit Grundgebühren zur Anwendung. Da der Tarif eine Prämie auf die Ausnutzung enthalten soll, wird von den verschiedensten Seiten empfohlen, für die Landwirtschaft eine nach der Größe des Besitzes gestaffelte Grundgebühr für den Morgen unterm Pfluge oder auf die Größe der verwendeten Transformatoren einen Einheitspreis für Licht und Kraft vorzusehen. Die Folge ist ein selbsttätiger Zwang zur guten Ausnutzung, Fortfall der getrennten Licht- und Kraftnetze, damit bedeutende Ersparnis der nicht unerheblichen Installationskosten, Anschluß von Koch-, Heiz- und landwirtschaftlichen Industrie-strom an ein Netz. Ähnliche Vorschläge in der Broschüre „Bemerkungen zum Potsdamer Tarif von Dr. K. M a r k a u“, Verlag von Julius Springer, Berlin.

Bei gewerblichen Betrieben Festsetzung einer Grundgebühr nach Anschlußwerten, etwa für jede Lampe und Pferdekraft eines Motors. Näheres darüber ETZ 1918, S. 473 und 1919, S. 55. Bei Mühlen, Stärkefabriken und Trocknungsanlagen Ausbau entsprechender Tarife für Nachtbelastung.

VI. Elektrische Bahnen.

(755) Betriebsarten. Die Wahl des Systems, der Betriebsmittel und der Streckenausüstung ist aufs engste verknüpft mit der Art und dem Charakter des Bahnbetriebes.

Man unterscheidet den leichten S t r a ß e n b a h n - (engl. tramway, amerik. street railway) Betrieb mit kleinen Zugkräften und Geschwindigkeiten und den v o l l b a h n a r t i g e n (engl. railway, amerik. railroad) Betrieb, der folgendermaßen gekennzeichnet werden kann:

1. S c h n e l l z u g s b e t r i e b mit großen Stationsentfernungen und hohen Geschwindigkeiten. Die Motoren sind für Dauerleistung zu bemessen. Hohe Anfahrbeschleunigungen sind unwesentlich. Die Höchstgeschwindigkeit ist an die Höchstleistung gebunden.

2. S t a d t s c h n e l l b a h n - oder B e s c h l e u n i g u n g s b e t r i e b mit kurzen Stationsentfernungen und hohen Anfahrbeschleunigungen. Die Motoren sind für häufiges Anfahren in kurzen Zwischenräumen zu bemessen.

3. S c h w e r e r G ü t e r z u g s b e t r i e b mit großen Anfahrzugkräften und mittleren Geschwindigkeiten. Die Motoren sind für die Höchstzugkräfte, die häufig und in kurzen Zwischenräumen auftreten, zu bemessen. Hohe Anfahrbeschleunigungen sind unwesentlich. Höchstleistung bei mittlerer Geschwindigkeit.

A. Kritik der Systeme.

(756) Fahrdrabtspannung. Für die leichten Straßenbahnbetriebe ist heute das Gleichstrom-Niederspannungssystem mit 500—600 V am Fahrdrabt allgemein angenommen. Für den Betrieb der Vollbahnen dagegen ist man sich zurzeit nur über die Notwendigkeit der Verwendung hoher Spannungen einig. Über das System aber bestehen noch Meinungsunterschiede.

Die für die Zugförderung erforderlichen großen Leistungen im Vollbahnbetriebe verlangen nämlich die Wahl von hohen Spannungen, um die vom Fahrdrabt abzunehmenden Stromstärken in den praktischen Grenzen zu halten, die durch die konstruktiven Rücksichten für den Bau der Stromabnehmer und der Fahrdrabtleitung gegeben sind, während wirtschaftliche Rücksichten, Ersparnisse an Kupfer in der Oberleitung, Beschränkung der Zahl der Unterwerke, Bedingungen für die Sicherheit und die Aufrechterhaltung des Betriebes (Speisung einer Teilstrecke von einer benachbarten) eine weitere Erhöhung der Fahrdrabtspannung bedingen. Von diesem allgemeinen Gesichtspunkte aus scheinen daher Einphasenwechselstrom, Drehstrom und Gleichstrom in gleicher Weise

für den Betrieb von Vollbahnen geeignet, und jedes einzelne System ist vielfach befürwortet und angegriffen worden (vgl. Literatur S. 568). Aber während die für Gleichstrom und Drehstrom zulässigen Fahrdrachtspannungen immer noch nicht jene für den ökonomischen Betrieb für Vollbahnen zweifellos erforderliche Mindestspannung von etwa 6—10 kV erreichen, haben Einphasenbahnen mit 15 bis 20 kV am Fahrdracht einwandfreien Betrieb ergeben.

Gleichstrommotoren arbeiten schon heute mit 1,5 kV am Kollektor einwandfrei. Baute man sie für 2—3 kV, so ergäben zwei solcher Motoren in Reihe sogar 4—6 kV Fahrdrachtspannung. Aber abgesehen von der Notwendigkeit, zwei Motoren zu verwenden und sie unveränderlich in Reihe zu legen, haben die der Bedienung unterliegenden stromführenden Teile (Bürsten, Kollektor) die volle Spannung gegen Erde.

Im Drehstromsystem dagegen drückt die doppelpolige Oberleitung und die besonders bei Weichen und Kreuzungen schwierige Isolation der beiden Fahrdrähte gegeneinander die Fahrdrachtspannung gegen eine Grenze von ca. 3—6 kV. Die Möglichkeit, die Ständer direkt für Hochspannung zu wickeln, wird oft als Vorteil des Drehstroms angesehen. Das ist aber auch für Einphasenmotoren möglich und für die Spindlersfelder Strecke ausgeführt worden. Die Verwendung von Hochspannung im Ständer drückt aber ebenfalls die Fahrdrachtspannung gegen eine Grenze von 3—6 kV, erschwert die Herstellung und Ausbesserung der Motoren und ergibt unwirtschaftliche Ausnutzung des Wickelraumes. Indessen besitzen selbst die für Hochspannung gewickelten Einphasenmotoren nur Niederspannung am Kollektor und allen der Bedienung zugänglichen Teilen und sind dem Hochspannungs-Drehstrommotor in der Einfachheit der Wicklungen ohne Kreuzungen und durch die im Niederspannungskreis erfolgende Fahrtwendung an Betriebssicherheit überlegen.

(757) Speisung und Verteilung. Die doppelpolige Oberleitung und die damit verbundenen Schwierigkeiten in der Ausrüstung der Strecke bilden den schwerwiegendsten Einwand gegen das Drehstromsystem. Die Möglichkeit einer vollständig zuverlässigen und guten Ausführung der doppelpoligen Oberleitung ist nach den Erfahrungen der letzten Jahre freilich keine Frage mehr.

Die Energieübertragung mittels Drehstroms hat der einphasigen Übertragung gegenüber bei gleichen Spannungen gegen Erde und bei gleichen Verlusten eine Kupferersparnis von ca. 15,5 % voraus. Da aber die Fahrdrachtspannung im Einphasensystem höher als im Drehstromsystem gewählt werden kann, so ist es tatsächlich das Einphasensystem, das den geringeren Kupferverbrauch für sich hat.

Die niedrige Fahrdrachtspannung der Gleichstrombahnen erfordert für längere Strecken Unterwerke mit umlaufenden Maschinen und Drehstrom-Gleichstromschaltanlagen, die der Wartung bedürfen. Unterwerke, allerdings nur mit ruhenden Transformatoren, sind auch für lange Dreh- und Einphasenstromstrecken erforderlich.

Die Einrichtung und die Schaltanlage der Einphasenwerke ist unter allen Systemen am einfachsten.

Schwachstromstörungen durch Wechselstrombahnen werden als schwerwiegendster Einwand gegen die einphasige Verteilung angesehen.

Die Möglichkeit zu puffern und die Kraftwerksmaschinen nur für den mittleren Energiebedarf bemessen zu können, ist oft zu Unrecht dem Gleichstrom allein zugeschrieben und als dessen besonderer Vorteil empfunden worden. Indes können auch Wechselstromwerke in ähnlicher Weise wie Gleichstromwerke mit Pufferanlagen (Speicherbatterien oder Schwungradpuffern) ausgestattet werden (788). (Albtalbahn, ETZ 1915, S. 181.)

(758) Geschwindigkeitsregelung. Drehstrommotoren können durch Widerstände (Burgdorf-Thun), durch Polumschaltung (Simplon) und durch Kaskadenschaltungen (Valtellina) geregelt werden (724). Für die letztgenannte

Regelungsart sind mindestens zwei Motoren erforderlich. Keine der Methoden vermag dem Drehstrommotor die für Bahnbetrieb erwünschte Schmiegsamkeit zu geben.

Gleichstrommotoren werden durch Widerstände in Reihe mit dem Anker und durch Schwächung oder Unterteilung des Feldes geregelt und besitzen — von Anfahrstufen abgesehen — mehrere wirtschaftliche Geschwindigkeitsstufen. **Einphasenmotoren** werden mit Hilfe von Transformatoren fast verlustfrei geregelt. Diese Regelungstransformatoren machen den Einphasenmotor unempfindlich gegen die Spannungsschwankungen der Linie. Während das Drehmoment des Drehstrom-Induktionsmotors quadratisch mit der Linienspannung und die Geschwindigkeit des Gleichstrommotors (mit der Höchstgeschwindigkeit in der Parallelstellung) geradlinig mit der Spannung fällt, ist es bei Einphasenmotoren durch Anordnung von Klemmen am Transformator, die einer höheren Spannung entsprechen, möglich, den Motor in weiten Grenzen von der Linienspannung unabhängig zu machen.

In allen Fällen ist die Regelung des Einphasenmotors derjenigen des Drehstrommotors (wo sie wirtschaftlich ist) an Einfachheit, derjenigen des Gleichstrommotors aber an Wirtschaftlichkeit überlegen.

(759) Nutzbremung. Die Möglichkeit der Stromrückgewinnung, die bei Drehstrom stets gegeben und als sein besonderer Vorteil angesehen worden ist, liegt unter Verwendung allerdings zusätzlicher Einrichtungen auch bei allen anderen Systemen vor. Auf der Chicago—Milwaukee—St.-Paul-Bahn ist die Stromrückgewinnung für 3 kV Gleichstrom mit bestem Erfolg durchgeführt. Vergleichende Zusammenstellung über Nutzbremung verschiedener Systeme und Literaturangaben s. See f e h l n e r, El. Kraftbetr. u. Bahnen 1917, S. 225.

Indessen ist die Nutzbremung der Motoren mit einer Reihe betriebstechnisch nicht ganz gefahrloser Schwierigkeiten verknüpft. Einerseits ist die Sicherheit des Zuges (der schlaffen Kupplung wegen) bei der Talfahrt gefährdet, andererseits unterliegen die Kraftwerksmaschinen der Gefahr des Durchgehens.

(760) Wirtschaftlichkeit. Die Unterhaltungskosten des gegenwärtigen Einphasensystems sind denen des Gleichstroms ungefähr gleich. Dagegen sind die gesamten Betriebskosten für Einphasenstrom geringer, weil es höheren mittleren Wirkungsgrad und geringere Betriebskosten in den Unterwerken hat. Dieser Unterschied wird um so größer sein, je länger die Bahn und je geringer die Verkehrsichte ist. Die zweifellos billigere Ausrüstung der Drehstrombetriebsmittel wird durch die höheren Kosten der Drehstromoberleitung und die ebenfalls billigere Gleichstromausrüstung durch die Kosten der Unterwerke mehrfach aufgewogen. Das größere Gewicht der Einphasenausrüstungen aber ist deshalb kein Nachteil, weil die Anzugskraft des Motors ausreicht, die Räder zum Schleifen zu bringen.

(761) Zusammenfassung. Von Einzelheiten abgesehen, steht heute jedenfalls soviel fest, daß die Betriebssicherheit und Einfachheit die einpolige Oberleitung, wirtschaftliche Rücksichten aber die Verwendung hoher Fahrdrachtspannungen verlangen. Beiden Anforderungen wird das Einphasensystem gerecht.

Für besondere Verhältnisse, z. B. für Vorort- oder Zwischenstadtbahnen von geringer Streckenlänge und dichtem Verkehr, ist freilich hoch- oder niedergespannter Gleichstrom mit dritter Schiene sehr geeignet. Im Interesse der Einheitlichkeit und des Übergangsverkehrs kann sich aber auch in solchen Fällen oft die Verwendung des Einphasensystems empfehlen. Dem Drehstromsystem haften im Vollbahnbetriebe, ungeachtet guter Betriebsergebnisse in Italien, erhebliche Nachteile an. Auf Strecken ohne Weichen und Verschiebegleise (Tunnels) kann es oft von Vorteil sein. In nicht allzuferner Zeit werden vielleicht auch Quecksilbergleichrichter für schwere Zugförderung geeignet sein.

Die Wahl des Stromsystems ist letzten Endes eine Frage des Stromzuführungssystems und damit eine Frage der Fahrdrachtspannung und des Leitungssystems. Aber während die geforderte einpolige Oberleitung auf dem europäischen Fest-

land zu nahezu einheitlicher Annahme des Einphasensystems geführt hat, gibt sie in Amerika Veranlassung zur stetigen Steigerung der Gleichstromspannung und zu Versuchen mit Umformerlokomotiven.

Literatur: Gleichmann, Denkschrift z. Einföhr. el. Betr. auf bayr. Staatsb. Z. V. D. I. 1908. EKB 1908, ETZ 1910. — Elektrisierrg. d. Berliner Stadtb. Z. V. D. I. 1907. EKB 1907. — Elektrisierrg. d. Gotthardbahn, ETZ 1918, S. 275. EKB 1918. — Hruschka, Elektrisierrg. d. österr. Staatsb. EKB 1911, S. 561. — Mauduit, Bericht d. Studienkomm. f. Elektrisierrg. Frankreichs, E & M Bd. 37, S. 553. Revue gén. de l'électricité Bd. 5 u. 6. — Kummer, Wahl der Stromart usw. Sammlung Vieweg, Braunschweig. — Dittes, Energieversorg. d. Vollbahnen. E & M 20. Juli 1919. — Ceija, Amerikan. Stellgn. i. d. Frage Gleichstrom und Wechselstrom usw. E & M 1914, S. 301. — Wittfeld, El. Zuföhr. und Diesellok. Zentralbl. d. Bauverw. 1919, S. 513. — Alexander, El. Betr. auf Fernbahnen AEG-Zeitg. März 1920 ff. — Phasenumformerlok, E & M 1919, S. 437; 1920, S. 86. — Dittes, Elektrisierung d. österr. Bundesbahn. E & M Sonderheft 1922. — Gleichmann, Elektr. d. Deutsch. Reichseisenb. Organ f. Fortschritte d. Eisenbahnwesens 1922. — Wechmann, Elektr. Fernzugbetrieb d. Deutsch. Reichsb. ETZ 1922. — Gotthardbahn, ETZ 1922. — Seefehner, Handbuch d. elektr. Zuföhrung. Berlin 1922.

B. Betriebsmittel.

1. Allgemeine Gesichtspunkte.

(762) Wahl der Motorleistung. Die Größe der Motoren wird in der Regel mit Rücksicht auf die Erwärmung festgesetzt, wenn nicht die höchste erforderliche Zugkraft, insbesondere im Beschleunigungs- und Rangierbetrieb, die Wahl einer höheren Motorleistung vorschreibt. Dabei ist darauf zu achten, daß normale Straßenbahnmotoren oft vollkommen gekapselt laufen. Neuerdings ist man zur Eigenlüftung übergegangen. Im geschlossenen Lokomotivgehäuse hochgelegte Motoren werden in der Regel künstlich geköhlt.

Für schweren Betrieb empfiehlt es sich, die gewählten Motoren an Hand der Kennlinien des Fahrplanes und der Fahrdiagramme auf Erwärmung nachzurechnen (795). Für stark aussetzenden Betrieb (Straßenbahnen) genügt es, wenn der Motor die geforderte mittlere Leistung eine Stunde lang auf dem Prüfstand abgeben kann (Luftgeköhlte Straßenbahnmotoren, EKB 1915, S. 368).

(763) Wahl der Zugeinheit. Für Straßenbahnen bildet der einzelne Motorwagen mit oder ohne Anhänger das natürlichste und wirtschaftlichste Betriebsmittel. Schwere Züge dagegen, für die ein einziger Motorwagen nicht mehr ausreicht, können entweder aus mehreren Motorwagen mit Anhängern bestehen oder von Lokomotiven gezogen werden. Die Wahl der sogenannten Zugeinheit bildet eine der wichtigsten Fragen vom wirtschaftlichen und verkehrstechnischen Standpunkte aus.

Motorwagenzüge sind z. B. für Straßenbahnbetrieb oft deshalb empfehlenswert, weil einerseits die durch die kurzen Stationsentfernungen notwendige hohe Anfahrbeschleunigung die Nutzbarmachung des Adhäsionsgewichtes vieler Wagenachsen erfordert, andererseits die zu den verschiedenen Tageszeiten stark schwankenden Verkehrsziffern auch Züge wechselnder Länge verlangen, die wirtschaftlich und rasch nur gebildet werden können, wenn der Motorwagen (und Anhänger) die Zugeinheit ist. Dasselbe gilt für Linien mit Kopfstationen, in denen das Umsetzen und Verschieben der Lokomotive erhebliche Zeitverluste verursacht.

Wo diese Bedingungen nicht zutreffen, sind jedoch Lokomotivzüge den Motorwagenzügen meist überlegen. Lokomotiven erfordern geringere Unterhaltungskosten als Motorwagen. Besonders die hochgelegten Motoren erleichtern die Zugänglichkeit, Aufsicht und Unterhaltung und gestatten die Verwendung kräftiger Motorlager.

Für viele Vollbahnlinien wird ein gemischter Betrieb, in denen Motorwagenzüge den schwachen und öfteren Zwischenortsverkehr, Lokomotivzüge aber den schnelleren Fernverkehr übernehmen, von größtem Vorteil sein (vgl. auch 800).

(764) Antrieb der Fahrzeuge. Die Motoren treiben die Triebachsen der Straßenbahnen am besten mittels Zahnradvorgeleges an, dessen großes Rad auf die Wagenachse aufgekeilt ist. Auf diese stützt sich gleichzeitig (ungefedert) mittels Tatzenlagers der tiefhängende Motor, der andererseits gefedert an einem Wagenquerträger aufgehängt ist (Straßenbahnauflängung).

Die Radkastenabstände betragen bei Straßenbahnen 75—120 mm (selten weniger) über SO, je nach der Unterhaltung der Strecke, für Vollbahnen 125—150 mm. Der von der preußischen Staatsbahn vorgeschriebene Abstand beträgt 150 mm. Grubenbahnen verwenden 40—50 mm.

Der Vorteil des Zahnradantriebes liegt in der Möglichkeit, auch für niedrige Fahrzeuggeschwindigkeiten leichte und schnell laufende Motoren verwenden und große Zugkräfte am Radumfang ausüben zu können, und ist deshalb insbesondere für schweren Güterzugsbetrieb geeignet. Den tiefhängenden Motoren sind aber durch den Laufraddurchmesser Leistungsgrenzen gezogen, die in Verbindung mit dem Bau von Motoreinheiten wachsender Größe, sowie allgemeinen Erwägungen über Lauffähigkeit der Lokomotive, günstige Schwerpunktslage und Verringerung der unabgefederten Massen dazu geführt haben, die Motoren hoch zu legen und im abgefederten Lokomotivrahmen zu lagern. Für die Motoren selbst ist diese Lösung vorteilhaft, weil die Motoren in offener Ausführung gebaut werden und der Bedienung leichter zugänglich gemacht werden können.

Die hochliegenden Motoren übertragen ihr Drehmoment auf die Triebachse entweder unmittelbar oder über eine Vorgelegewelle mit Hilfe von Kuppelstangen. Da aber die Kuppelstangen eine starre Verbindung zwischen den ungedeferten Treibrädern und den abgefederten Motormassen darstellen, muß eine Anordnung gewählt werden, die die Wirkung des Federspieles ausschaltet. Wo eine Vorgelegewelle vorhanden ist, soll sie daher in angenähert gleicher Höhe mit der Triebachse liegen. Andernfalls bietet für unmittelbaren Antrieb die Wahl einer in der Höhe der Triebachse im federnden Rahmen gelagerten Blindwelle eine ausgezeichnete Lösung. Die Blindwelle besitzt gegen den Motor kein Spiel. Da sie überdies in gleicher Höhe mit den nicht abgefederten Treibachsen liegt und das Drehmoment mittels horizontaler Stangen auf sie übertragen wird, kann auch nur die horizontale Komponente des Federspiels wirksam werden. Diese aber ist beim nahezu vertikalen Federspiel vernachlässigbar (vgl. Brecht, Neuere Bauarten von Wechselstromlokomotiven, Z. d. V. D. I. 1909, S. 993 und Heyden, Beitrag zur Frage des Antriebes elektrischer Vollbahnlokomotiven. EKB 1909, S. 308. Storer u. Eaton, Design of Electric Locomotive. Electrician v. 28. 10. 1910, S. 88, Referat ETZ v. 14. 12. 1910). Kumer, Maschinenlehre d. elektr. Zugförderung. Berlin, Julius Springer 1915. Baeker, Antriebe und Bauarten el. Lok. Glasers Annal. 1920. Bd. 86. Heft 8/9.

Für eine andere zuerst von Ganz & Co. ausgeführte Lösung sind 2 Motoren notwendig, welche durch einen dreieckigen Kuppelrahmen derart miteinander gekuppelt sind, daß die Verbindungslinie die eine Seite eines Dreiecks darstellt, dessen gegenüberliegende Spitze beim Lauf einen dem Motorkurbelkreis gleichen Kreis beschreibt, der in gleicher Höhe mit den Treibachsen liegt. Hierdurch wird das Drehmoment nur in horizontaler Richtung unter Ausschaltung der Federspielbewegung des Lokomotivrahmens übertragen (Patent Westinghouse-Kando, vgl. ETZ 1910, Heft 41 u. 42, Kleinow, El. Kraftbetr. u. Bahnen 1910, Heft 25, 1913, S. 337).

Besondere Ausführungsformen direkt auf die Laufachse aufgesetzter Motoren sind in Amerika ausgebildet worden. Die Gleichstromlokomotiven der New-York-Central verwenden ungefedert auf der Achse sitzende Anker, deren Magnetjoch durch die Wagenquerträger selbst gebildet werden, während die Wechselstromlokomotive der N.Y.N.H.H.R. die Anker auf eine die Laufachse umgebende Hohlwelle setzt, und die Triebräder mittels federnder Kupplungen antreibt.

Für Einzelachsantrieb hat neuerdings Buchli eine geistreiche Lösung angegeben. (BBC Mitth. Sept. 1922.)

Zusammenstellung bisher ausgeführter Antriebsarten vgl. Lydall, El. Railway J. v. 27. 12. 1913. — Laternser, Wirtschaftliche und konstruktive Gesichtspunkte im Bau mod. Großelektrolok. Schweiz. Bauz. 1921, S. 49; Seefehner, Handbuch, Berlin 1922. — Seefehner, Entwicklungsmöglichkeiten. E & M 1921, S. 783. — Döry, Grenzleistungen im Zahnradantrieb. E & M 1922, S. 113.

Die Deutsche Reichsbahn hat für ihren Bedarf folgende 6 Einheitstypen geschaffen (Wechmann, ETZ 1922):

Lokomotive für	Höchstgeschwindigkeit a. d. Wagerechten km/h	Zahl der Triebachsen	Gewählte Achsanordnung	Zahl und Dauerleistung (kW) der Motoren	Abb.
1. Güterzüge:					
a) im Flachland	65	4	1 B B 1	$2 \times 580 = 1160$	457 a
b) im Gebirge	55	6	C C	$4 \times 360 = 1440$	457 b
2. Personenzüge:					
a) Vorortverkehr	70	3	1 C 1	$2 \times 360 = 720$	457 c
b) im Gebirge	90	4	2 B B 1	$4 \times 360 = 1440$	457 d
3. Schnellzüge:					
a) im Flachland	110	3	2 C 2	$1 \times 1200 = 1200$	457 e
b) im Gebirge	90	4	1 A A A A 1	$4 \times 360 = 1440$	457 f

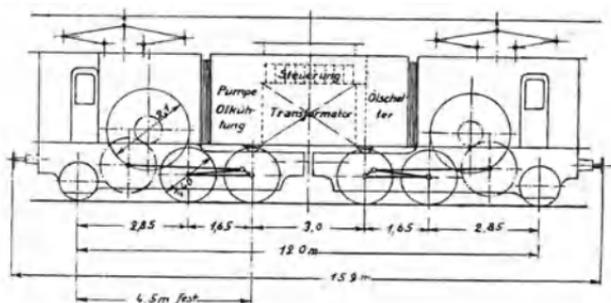


Abb. 457 a. Güterzuglokomotive für Flachland.

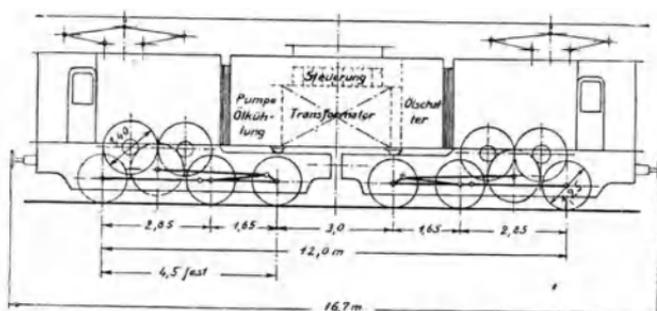


Abb. 457 b. Güterzuglokomotive für Gebirge.

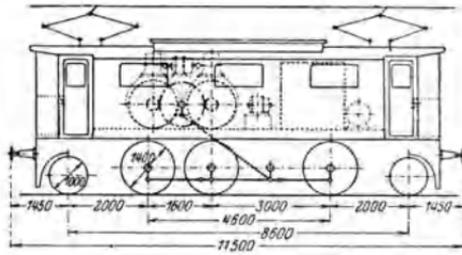


Abb. 457 c. Personenzuglokomotive für Vorortverkehr.

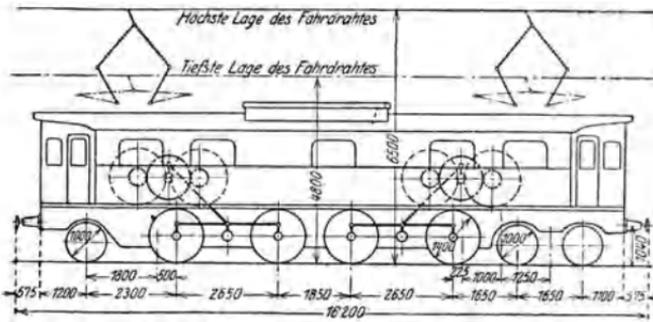


Abb. 457 d. Personenzuglokomotive für Gebirge.

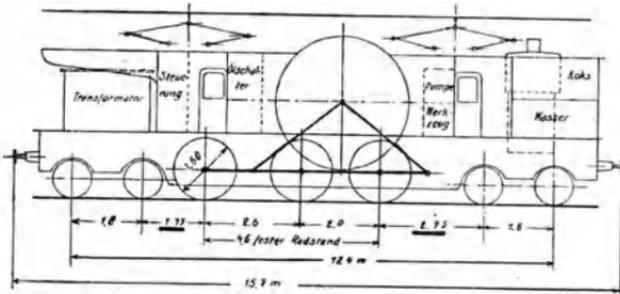


Abb. 457 e. Schnellzuglokomotive für Flachland.

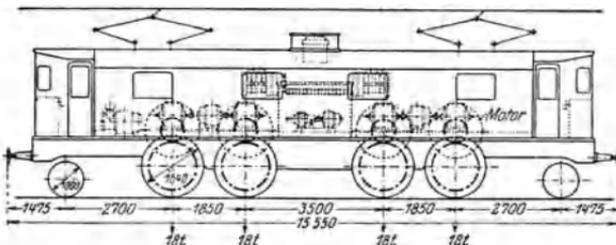


Abb. 457 f. Schnellzuglokomotive für Gebirge.

(765) Schüttelerscheinungen. Der Parallelkurbelantrieb neigt oft zu Schwingungen, die zu gefährlichen Beanspruchungen, ja selbst zu Zerstörungen des Triebwerks führen können. In der Regel hat jede Lokomotivart eine oder mehrere ihr eigentümliche Geschwindigkeiten, bei denen sie in Erschütterungen gerät. Die Erscheinung hat ausgesprochenen Resonanzcharakter. Die Erschütterungen wachsen mit zunehmender Geschwindigkeit und verschwinden oft ganz unvermittelt.

Die oft Schüttelerscheinung genannte Schwingungsbewegung blieb längere Zeit ungeklärt. Zur Aufdeckung der Ursache hat besonders der von W. K u m m e r erkannte Einfluß der Motormasse auf die Triebwerksbeanspruchung geführt. Die Erkenntnis, daß die Elastizität des Parallelkurbelantriebs zusammen mit der Ankermasse des Elektromotors ein schwingungsfähiges System bildet, das der Dampflokomotive ihres fast masselosen Antriebs wegen abgeht, gestattete durch Bestimmung der schwingenden Massen und Elastizitäten die Eigenfrequenz (f) des Systems und die Frequenzen (mf) zu ermitteln, bei denen es in Resonanz gerät ($m = 1 - 2 - 4$, K u m m e r, ETZ 1915, S. 311). Die K u m m e r'sche Reihe der Schüttelfrequenzen ($4 - 2 - 1$) ist in ihrer vollen Bedeutung erst gewürdigt worden, als nach Aufzeigung der vom Lagerspiel (durch J. B u c h l i, ETZ 1914, S. 614 und durch A. C o u e n h o v e n, Forschungsarbeiten des VDI, Heft 218) und von der Veränderlichkeit der Elastizität (durch E. M e i ß n e r, Schweizer Bauzeitung 1918, Band 72, S. 95) herrührenden Schwingungserreger K. E. M ü l l e r (Dissertation Zürich 1919 und Schweizer Bauzeitung 1919, Band 74, S. 141, 151, 169) die Frequenzreihe ($4 - 2 - 1$) als „ausgezeichnete“ gemeinsame Werte zweier anderer Reihen von Schüttelfrequenzen feststellte, nämlich der von der veränderlichen Elastizität herrührenden Reihe ($1 - 2 - 3 \dots n$) und der von der Schwingung durchs Lagerspiel herrührenden Reihe ($1/1 - 1/2 - 1/3 \dots 1/n$), die sich ersichtlich in den K u m m e r'schen Werten ($4 - 2 - 1$) überdecken.

Als wirksamstes Mittel zur Verminderung der Schwingung hat sich die zuerst von B u c h l i, ETZ 1914, vorgeschlagene Erhöhung der Elastizität des Systems durch den Einbau von federnden Kupplungen oder federnden Zahnrädern erwiesen. Ein treffendes Bild über den heutigen Stand der Frage enthält der Vortrag von K u m m e r in den Verhandlungen der Schweizer Naturforschenden Gesellschaft, Bern 1922, II. Teil, S. 324. D ö r y, Schüttelerscheinungen, Sammlung Vieweg, Braunschweig 1923, Heft 68.

2. Die Motoren und ihre Regelung.

(766) Gleichstrom. Die gebräuchlichen Betriebsspannungen sind 500—600 V für Straßenbahnen und leichte Bahnbetriebe ohne besonderen Bahnkörper innerhalb von Städten, sowie 750—1500 V außerhalb von Städten, bzw. für Bahnen mit besonderem Bahnkörper (Berliner und Hamburger Hochbahn 800 V, Köln—Bonn 1000 V). Die Durchbildung des Wendepolmotors, dessen Bau die Anwendung höherer Betriebsspannungen erst gestattete, hat insbesondere in Amerika dazu beigetragen, die Normalspannungen in rascher Folge zu erhöhen. Die Butte, Anaconda & Pacific-Bahn hat auf 41 km langer Strecke 2,4 kV eingeführt. Mit gleicher Spannung elektrisiert die Canadian-Northern-Bahn ihre Endstrecke mit längerem Tunnel. Die Chicago—Milwaukee—St.-Paul-Bahn verwendet 3 kV, die Lancashire- und Yorkshire-Bahn betreibt seit einigen Jahren Triebwagenzüge mit 3,5 kV und die Westinghouse-Gesellschaft hat eine Ausrüstung für 5 kV (2 Doppelmotoren, 4 Anker zu 1250 V, 35 kW, EKB 1916, S. 175) gebaut.

Der Vorteil der Wendepolmotoren liegt nicht nur in der Möglichkeit der Verwendung höherer Spannungen und der Vergrößerung des Wirkungsbereiches der Kraftwerke, sondern auch in der Möglichkeit einer wirtschaftlichen Geschwindigkeitsregelung. Während man sich bei Wagenausrüstungen mit Motoren ohne Wendepole mit nur zwei wirtschaftlichen Geschwindigkeiten zufrieden geben muß, der einen bei Reihen-, der anderen bei Parallelschaltung der Motoren, ermöglicht die Eigenschaft des Wendepolmotors, auch bei stark geschwächtem Felde einwand-

frei zu laufen, eine weit feinere Geschwindigkeitsabstufung ohne Verwendung von Vorschaltwiderständen, lediglich durch Änderung der Feldstärke. Von dieser Eigenschaft der Geschwindigkeitsregelung wird man mit Vorteil Gebrauch machen, wenn es sich darum handelt, mit demselben Fahrzeug Linien verschiedener Spannung zu durchfahren. Man fährt dann in Parallelschaltung und schwächt auf der Niederspannungsstrecke das Motorfeld so weit ab, daß man die gewünschte Geschwindigkeit erhält. Aber auch für solche Bahnen, die nur mit einer Linien-Spannung arbeiten, bedeutet die Schmiegsamkeit in der Geschwindigkeitsregelung einen großen Vorzug des Wendepolmotors, besonders dann, wenn die Geschwindigkeit innerhalb weiter Grenzen geändert werden soll: Auch da, wo häufig Steigungen mit ebenen Strecken abwechseln, ist der Wendepolmotor angebracht.

Wenn die Wendepolmotoren in den Dauerstufen mit geschwächtem Feld arbeiten, ist es möglich, das (beim Anfahren) ungeschwächte Feld hoch zu sättigen, also mit starkem Feld und kleinem Ankerstrom große Anfahrzugkräfte zu erhalten. Die verkleinerten Stromstöße ergeben kleinere Verluste in den Speiseleitungen und Kraftwerken und geringere Spannungsschwankungen im Netz, wodurch die Wagenbeleuchtung angenehmer wird und die Erdströme kleiner ausfallen.

Ist der Wagen mit 4 Motoren ausgerüstet, so können sie entweder in Gruppen von je 2 Motoren, die dauernd in Reihe liegen, geschaltet werden, oder es liegen beim Anfahren alle 4 Motoren in Reihe und werden erst zu zweien und schließlich zu vier parallel geschaltet. Das ist besonders für Zwischenstadtbahnen von Vorteil, die innerhalb der Städte langsam fahren müssen, und je 2 Motoren dauernd in Reihe liegen lassen können.

Literatur: Adler, Feldschwächung bei Bahnmotoren, Berlin 1919. Schaltung für stufenlose Regelung und Energierückgewinnung (Versuchswagen der Pariser Stadtbahn). EKB 1914, S. 280.

Beispiele üblicher Widerstandsschaltungen:

1. Reihewiderstände.

a) Kurzschlußkontakte in Reihe, Abb. 458 a.

b) Kurzschlußkontakte parallel, Abb. 458 b.

Die Kontakte in a) haben dauernd, solange der Motor läuft, den Motorstrom zu führen, nach b) dagegen nur solange, bis der nächste Kontakt geschlossen ist. Daher Kontakte in a) größer als in b). Dagegen würde durch ein z. B. hängengebliebenes Schütz in b) der ganze hinter ihm liegende Widerstand kurzgeschlossen bleiben, nach a) nur der zugehörige Teilwiderstand.

2. Parallelwiderstände, Abb. 458 c.

Bei Reihewiderständen nach 1. steht für die ersten Controllerstellungen der ganze Widerstand für Wärmeausstrahlung zur Verfügung und die Widerstände werden daher kleiner. Die Parallelwiderstände nach 2. benötigen kleinere Schützkontakte; bei Reihenschaltung nach 1. sind alle Kontakte für den vollen Strom zu bemessen.

3. Reihen-Parallelwiderstände, Abb. 458 d.

Gegenüber 1. und 2. sind für 5 Stellungen nur 4 Schützen und nur 3 Widerstandsgruppen erforderlich. Dieselben Verbindungen finden Anwendung für Reihen-

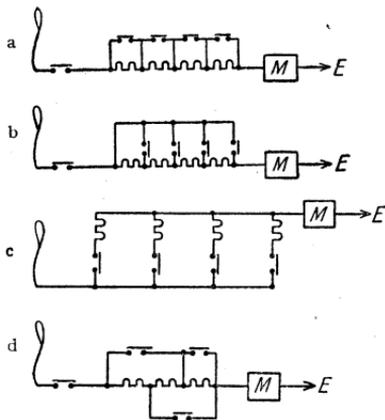


Abb. 458 a bis d.

parallelschaltung von 2 oder mehr Motoren. Ausführungsbeispiel für 4 Motoren, je 2 dauernd in Serie, vgl. Abb. 459.

Literatur: Beschreibung ausgeführter Gleichstrombahnen: Triebwagen Bonn—Königswinter, 2×62 kW, 1000 V. EKB 1912, S. 581. — 55 t-Schmalspur-Lok. Moselhütte, 4×120 kW, 2000 V. EKB 1912, S. 753. — 800 V-Triebwagen Hamburg Hochbahn, 2×75 kW. EKB 1912, S. 317. — 600 V-Pennsylvania-Lok., 2×1500 kW. ETZ 1910, S. 241. — 650 V-1500kW-Lok. Mailand—Varese. EKB 1913, S. 236. — 5 kV-150 kW-Versuchswagen. EKB 1916, S. 175. — 3,0 kV-Chicago—Milwaukee—St.-Paul. EKB 1918 v. 14. 8.

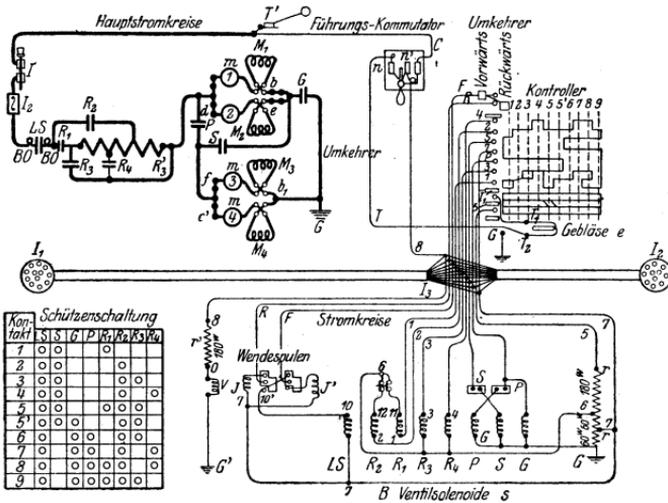


Abb. 459. Regelung durch Reihen-Parallelwiderstände.

(767) Einphasenstrom. Den modernen Einphasenbahnmotoren ist die Verwendung eines vom Arbeitsstrom durchflossenen Gleichstromankers und einer Kompensationswicklung am Ständer gemeinsam (Arbeitsachse). Der Arbeitsstrom ergibt im Verein mit dem Erregerfeld das nützliche Drehmoment.

Dem Gleichstrommotor gegenüber ist die Kommutierung des Einphasenmotors schwieriger. Das kommt daher, daß in den durch die Bürsten kurzgeschlossenen Ankerspulen, die sich nicht mehr, wie bei Gleichstrom, im konstanten Treibfeld, sondern in einem Wechselfeld befinden, transformatorisch eine EMK, die Transformatorspannung, induziert wird, die die Stromwendung erschwert.

Man muß deshalb die Transformatorspannung entweder so niedrig bemessen, daß noch praktisch funkenfreie Kommutierung möglich ist, oder durch Verwendung besonderer Hilfsfelder Gegenspannungen erzeugen, die die Transformatorspannung aufheben. Schließlich kann sie auch in besonderen Widerstandsverbindungen zwischen Anker und Kollektor vernichtet werden.

Im einen Fall erhält man den reinen Serienmotor ohne besondere Hilfsmittel für die Wechselstromkommutierung (Abb. 460 a), im andern Falle sind je nach der Art der Hilfsfelder verschiedene Schaltungsanordnungen möglich.

Am gebräuchlichsten ist ein phasenverschobenes Hilfsfeld an der Wendestelle (Abb. 460b) nach Behn-Eschenburg und R. Richter. Bildet man das Hilfsfeld am ganzen Ständerumfang aus (Abb. 460c), dann erhält man den Motor mit Doppelfeldung, der ebenso wie der kompensierte Repulsionsmotor von Winter-Eichberg (Abb. 460d) mehrfach (Blankenese—Ohlsdorf, London—Brighthon) verwendet worden ist.

Die Geschwindigkeit wird durch Änderung der totalen Arbeitsspannung geregelt. Sie wird in der Regel der mit Anzapfungen versehenen Sekundärwicklung des Hochspannungstransformators in Verbindung mit Starkstrom-

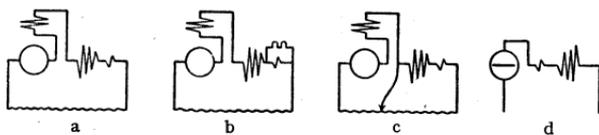


Abb. 460 a bis d. Verschiedene Schaltungen des Einphasenmotors.

schaltern oder mittels Hüpfers oder Schütze entnommen. Auch Potentialregler und Bürstenverschiebung werden zur Geschwindigkeitsregelung verwendet.

Alle Einphasenbahnmotoren können direkt oder nach einigen Umschaltungen auch mit Gleichstrom betrieben werden. Wechselstrom-Gleichstromausrüstungen haben namentlich in Amerika Verbreitung gefunden (in Europa: Wien—Baden, EKB 1907, S. 9), sind aber wegen des erhöhten Ausrüstungsgewichtes und wegen der Verwickeltheit der Steuerung nicht zu empfehlen. Auf der Strecke Wien—Preßburg werden die Züge abwechselnd von Gleichstrom- und Einphasenlokomotiven übernommen (EKB 1914, S. 553).

Literatur: Ossanna, Einphasenbahnmotoren für schwere Zugförderung. ETZ 1911, S. 581. — Döry, Einphasenbahnmotoren. Sammlung Vieweg, Braunschweig 1919. — Gerstmayer, Wechselstrombahnmotoren. München 1916.

Beschreibung ausgeführter Anlagen und Lokomotiven. Hamburg—Blankenese—Ohlsdorf: Rötzig, Glasers Annalen 1908, Bd. 63. — v. Glinzki, Z. d. V. D. I. 1908, S. 1581. — Cronbach und Freund, ETZ 1909, und Dietl, EKB 1909, S. 601. — Wechselstromlok. d. preuß. Staatsb. mit 3 Zahnradmotoren zu 260 kW, 6 kV. ETZ 1908, S. 427. — Dessau—Bitterfeld: Heyden, EKB 1909. — 2200 kW, 2-D-1-Lok. EKB 1918, S. 131. — Rjukanbahn. EKB 1912, S. 713. — St. Pölten—Mariazell. EKB 1912, S. 291. — Jeumont Lok. d. franz. Südbahn. EKB 1911, S. 546. — Mittenwaldbahn. EKB 1913, S. 116. — Riksgränsbahn. EKB 1914, S. 186; 1915, S. 232. — Schlesische Triebwagen (Kleinow). EKB 1915, S. 109. — N. Y. N. H. H. R. EKB 1913, S. 533. — Lötschberg. ETZ 1913, S. 1275. Gotthard-Lok. Schweiz. Bauz. v. 11. 10. 1919. ETZ 1922. — Lok. auf der Ausstellung Malmö. Z. d. V. D. I. Bd. 59, S. 557. — Schlesische Gebirgsbahnen. ETZ 1919, S. 345. — Zugförderung in Schlesien (Usbeck). ETZ 1921, S. 1357. — Riksgränsbahn. V. D. I. 1920, S. 205; EKB 1921, S. 145. — Rhätische Bahn. Rev. gén. él. Bd. 8, 1920, S. 872. — Lok. d. österr. Staatsb. EKB 1921, S. 143.

(768) Drehstrom. Der Drehstrommotor ist seiner Natur nach ein Motor konstanter Geschwindigkeit. Seine Höchstgeschwindigkeit ist an den Synchronismus gebunden. Sein beschränkter Regelbereich und seine Empfindlichkeit gegen Spannungsschwankungen sind seine Nachteile. Die Vorteile liegen in der Einfachheit der Motoren und ihrer Regelungsausrüstung. Will man diese Vorteile nicht aufgeben, so darf man auch die Regelung durch Widerstand im Läuferkreis nicht verlassen. Die Katarakt-Tunnel-Lokomotive der Great-Northern-Bahn ist ein Ausführungsbeispiel hierfür. Diese Lokomotive besitzt daher nur eine ökonomische Geschwindigkeit bei Synchronismus.

Durch Verwendung der Kaskadenschaltung haben Ganz & Co. auf der Valtellinastrecke 2 bzw. 3 wirtschaftliche Geschwindigkeitsstufen erreicht, während Brown-Boveri & Co. und die Maschinenfabrik Örlikon den Simplon-Lokomotiven durch Verwendung polumschaltbarer Motoren mit Kurzschlußanker 2 bzw. 4 wirtschaftliche Geschwindigkeiten verliehen haben.

Übersynchron (im Gefälle angetrieben) arbeitet der Drehstrommotor ohne besondere Umschaltung auf das Netz zurück. Als Betriebsspannung hat sich für Drehstrombahnen 3 kV am Fahrdrabt und am Motor als normal herausgebildet. Die Kataraktlokomotive verwendet 6 kV am Fahrdrabt, einen Leistungstransformator auf der Lokomotive und Niederspannungsmotoren für 500 V.

Literatur: v. Kando, Güterzuglok. der ital. Staatsb. 3 kV Drehstrom, 1500 kW. Z. d. V. D. I. 1909, S. 1249, 1320. — Brown-Boveri & Co., Simplon-Lok. 3 kV Drehstrom 1600 kW. Z. d. V. D. I. 1909, S. 607. — Giori Drehstromlok. Electr. World v. 11. 8. 1910. — Kaskaden-Tunnel-Drehstromlok., 6 kV. Proc. A. I. E. E. 1909, S. 1110. — 2-C-2-Lok. ital. Staatsb. ETZ 1920, S. 138. — Mont-Cenis-Anlage. ETZ 1921, S. 1345.

3. Steuerungs- und Fahrzeug-Ausrüstung.

(769) **Schaltwalzen. Schütze.** Einzelne laufende Motorwagen und Lokomotiven können mittels gewöhnlicher oder verstärkter Straßenbahn-Schaltwalzen gesteuert werden, solange die Leistung des Fahrzeuges etwa 300 bis 400 kW nicht übersteigt.

Die großen Leistungen im Vollbahnbetriebe aber können nicht mehr unmittelbar geschaltet werden. Man verlegt daher die Schaltung der Arbeitsströme in besondere Apparate, die an beliebigem und geeignetem Platz des Fahrzeuges untergebracht und vom Führerstand aus (mechanisch, durch Druckluft oder elektrisch) betätigt werden. Die Apparate selbst können als Schaltwalzen oder als Einzelschalter (Schütze, Hüpfer) ausgebildet sein.

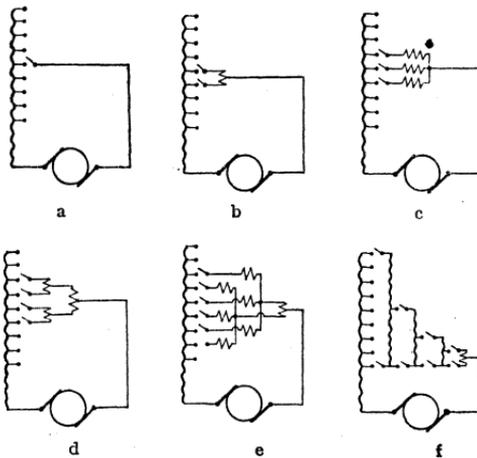


Abb. 461a bis f. Schützsaltungen.

Für die hohe Stufenzahl, die der Vollbahnbetrieb verlangt und für die großen Stromstärken der Wechselstromlokomotiven (bis zu 1000 A) sind viele, große Schütze notwendig (Abb. 461a). Um ihre Zahl und Größe zu vermindern, war man bemüht, Anordnungen zu finden, die die Beherrschung der großen Ströme in vielen Stufen mit wenigen und kleinen Schützen erlauben.

Den Auftakt zu dieser Entwicklung gab die Stromspaltung mittels eines einfachen Spannungsteilers (Abb. 461 b). Bei dieser Schaltung sind auf jeder Geschwindigkeits-(Dauer-)Stufe zwei Schütze gleichzeitig eingeschaltet. Deshalb braucht jedes Schütz für nur den halben Strom bemessen zu werden. Diese Schaltung ist oft verwendet worden, weil sie die Energieunterbrechung beim Schalten vermeidet. Man blieb bei ihr nicht stehen. Die Siemens-Schuckert-Werke führten auf ihrer preußischen 1—C—1-Schnellzuglokomotive einen Dreifachspannungsteiler aus, der drei gleichzeitig eingeschaltete Schütze für je $\frac{1}{3}$ des Motorstromes erfordert (Abb. 461 c).

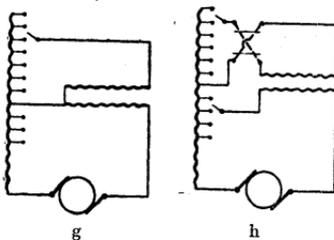


Abb. 461 g u. h. Schützsaltungen.

Die Westinghouse-Gesellschaft, die Bergmann Elektrizitätswerke und die Almänna Svenska Elektrizitäts-Gesellschaft gingen durch die Verwendung mehrerer Spannungsteiler sogar zur

Vierteilung, Sechsteilung und Mehrteilung des Stromes über (Abb. 461 d—f). Die Größe der Schütze wurde dadurch auf $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ und $\frac{1}{n}$ vermindert. Um auch ihre Zahl zu verringern, verwendete man Zusatztransformatoren in verschiedenen Anordnungen. Die erste Anwendung der Zusatztransformatoren rührt von Lammeher (Abb. 461 g). Man braucht für eine Anzahl Stufen nur noch die halbe Schützenszahl, weil jedes Schütz in der benutzten Zu- und Gegenschaltung des Zusatztransformatoren zweimal verwendet wird. Durch Ausbildung des Zusatztransformatoren als Volltransformator und durch seine Grob- und Feinregelung (Abb. 461 h u. 463) (Döry), gelang es, sowohl die Zahl der Schütze als auch

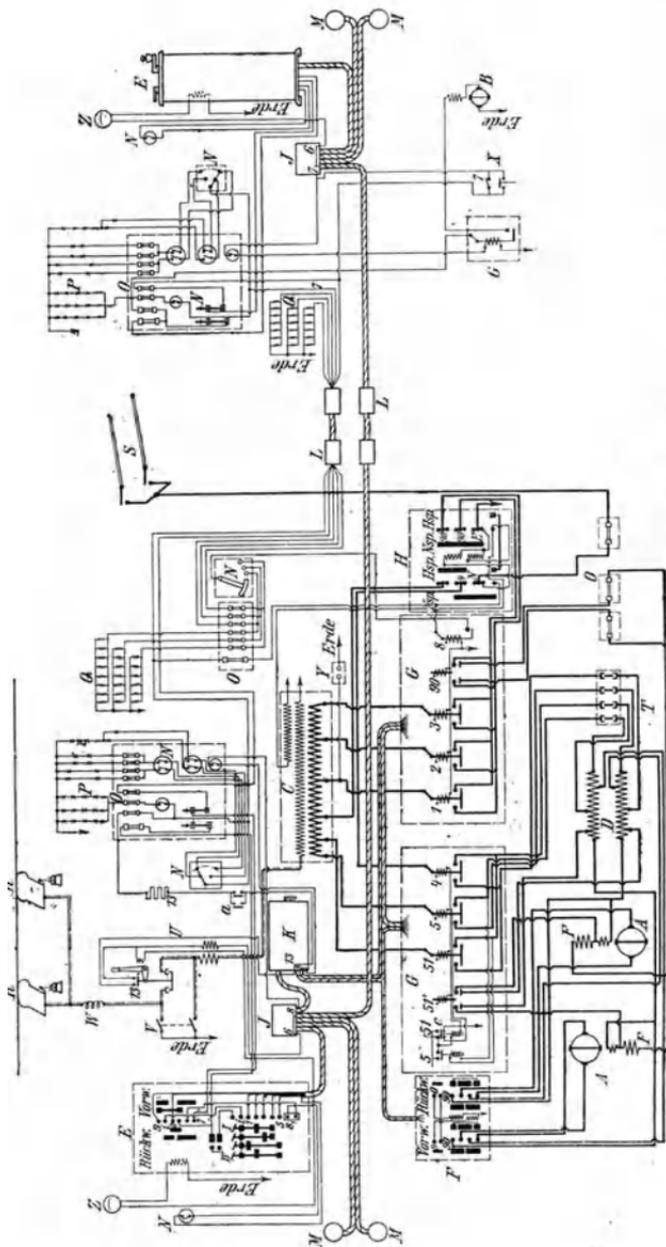


Abb. 462. Zugsteuerungsschema für einen Wagen mit 2 Wechselstrom-Kommulatormotoren.

- A Motoren.
- C Hochspannungsisolierungstransformatoren.
- D Sorten-(Erreger-)Transformatoren.
- E Führer (Steuer)schalter.
- F Kompensationswicklung-Fahrtwender.
- G Schütze.
- H Spannungsschalter.
- R Hochspannung-Stromabnehmer.
- S Niederspannung-Stromabnehmer.
- I Verbindungsbrett.
- L Steuerkabel.
- M Kupplungsdoesen.
- W Blitzschutz-Drosselspule.

ihre Größe bis auf einen Bruchteil zu vermindern, so daß sie in Form einer Schaltwalze nebeneinander gereiht von Hand bedient werden können. Um Kontakte ganz zu vermeiden, verwendete R. Richter einen Potentialregler, der sich an Anzapfungen eines Stufentransformators abrollt (ETZ 1913, S. 867). Auch die Geschwindigkeitsregelung durch Bürstenverschiebung ist mehrfach ausgeführt worden.

Die mittelbaren Steuerungen sind in den Fällen notwendig, in denen Zug-

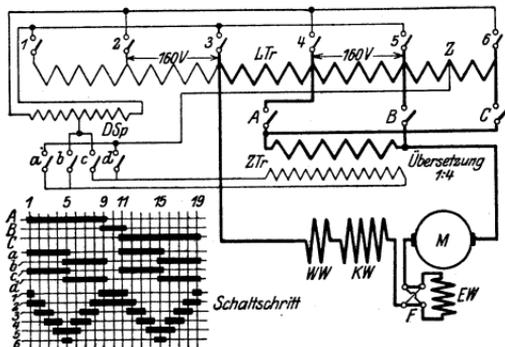


Abb. 463. Schaltplan einer Einphasenlokomotive.

Einphasenhochspannungstriebwagens und Abb. 463 den Schaltplan einer 1000 kW-Einphasenlokomotive mit Einzelsteuerung und von Hand bedienter Starkstromschaltwalze.

Literatur: Ein anschauliches Bild sämtlicher für preußische Vollbahnlok. verwendeten Steuerungssysteme gibt Wachsmuth, Glasers Annal. Bd. 79, Heft 10—12; Bd. 80, Heft 1—2, Ref. ETZ 1918, S. 314. — Döry, Die Steuerung der Wechselstromlok. E & M 1913, S. 69. — R. Richter, Schaltung von Stufentransf. ETZ 1921, S. 613.

(770) Stromabnehmer. Die überwiegende Zahl von Straßenbahnen mit Oberleitung verwenden den Rollenstromabnehmer, der besseren Kontakt gibt als der Bügel und noch für etwa 300—400 A ausreicht, gegen 200—250 A beim Bügel. Die Abspannung des Fahrdrahtes aber muß für die Rolle genauer sein und erfordert in Kurven und Weichen eine erhöhte Anzahl Befestigungspunkte. Lebensdauer der Bügel-Schleifstücke etwa 10—15 000 km, unter günstigen Bedingungen bis 30 000 km.

Für Vollbahnbetrieb kommen in der Regel die Pantographen- oder Scherenstromabnehmer (Abb. 464) zur Verwendung, Bügel mit scherenartigem Traggestänge, die besonders für hohe Geschwindigkeiten (130 km/h) geeignet sind. Die Wirkung des Windes ist gering, weil der Wind die eine Scherenstange niederdrückt, die andere anhebt. Bügelstromabnehmer für hohe Geschwindigkeiten erhalten Windflügel zur Kompensation des Winddruckes.

Das Schleifstück wird durch Spiralfedern in der senkrechten Lage festgehalten und durch den Druck, den es gegen den Fahrdraht ausübt, aus der senkrechten Lage abgelenkt. Die Schleifstücke sind in der Regel aus Aluminium von Y-förmigem Querschnitt und leicht auswechselbar. Wo es die klimatischen Verhältnisse zulassen, sind sie mit einer Rille versehen, die mit dickflüssigem Fett ausgefüllt ist. Die Laufzeit der Aluminiumschleifstücke beträgt im Mittel etwa 5—10 000 km. Nutzbare Breite etwa 0,7—1,5 m, normal etwa 1 m.

Valtellina (3 kV Drehstrom) und Butte-Anaconda (2,4 kV Gleichstrom) verwenden der hohen Stromstärke wegen auf Kugeln oder Rollen gelagerte Walzen, Simplon dreieckige Bügelrohre aus Messing (Lebensdauer 8000 km, Abnutzung des Fahrdrahtes 0,3—0,4 mm bei 80 000 Bügelbestreichungen).

steuerung gefordert wird, wo also ein aus mehreren Fahrzeugen gebildeter Zug von einer Stelle angesteuert werden soll. Bei der elektrischen Zugsteuerung werden die Fahrzeuge durch Steuerstromleitungen, die die vom Fahrschalter beeinflussten Steuerströme führen, miteinander verbunden.

Abb. 459 zeigt die Schaltung für Gleichstromzugsteuerung mit Reihen- und Parallelschaltung der Motoren und Widerstandsstufen, Abb. 462 die elektrische Zugsteuerung eines

Stromabnehmer müssen gut isoliert sein, sollen Wechsel der Fahrtrichtung gestatten, dürfen, um den geringen Unebenheiten des Fahrdrahtes auch bei großer Geschwindigkeit folgen zu können, nicht zu Schwingungen neigen und müssen deshalb kleines Trägheitsmoment des eigentlichen Schleifstückes, bezogen auf den Drehpunkt, besitzen. — Stromabnehmer für dritte Schiene vgl. (777).

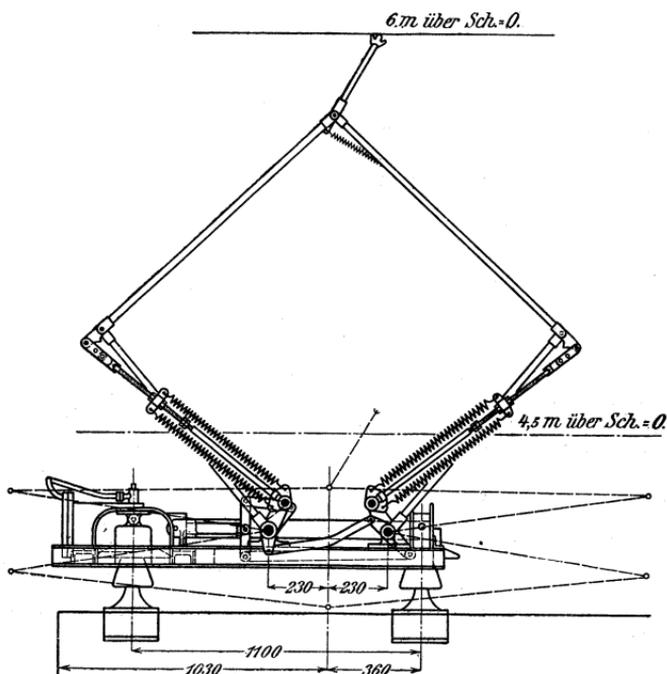


Abb. 464. Scherenstromabnehmer der AEG.

(771) Hochspannungsausrüstung für Wechselstrom. Die Hauptausschalter der Fahrzeuge für Wechselstromhochspannung werden als Ölschalter ausgebildet und von Hand oder bei Zugsteuerungen elektrisch oder durch Druckluft bedient. Zur Vermeidung von Überspannungen empfiehlt es sich, zur Dämpfung eine Widerstandsvorstufe vorzusehen.

Die Hochspannung führenden Teile werden oft in einer besonderen Hochspannungskammer untergebracht. Die Tür des Hochspannungsraumes ist zuweilen durch den Stromabnehmer derart verriegelt, daß sie nur bei niedergelegtem Bügel geöffnet werden kann. Bei geöffneter Tür der Kammer sollen durch einen Schalter alle in der Kammer befindlichen Apparate geerdet sein.

Die Hochspannungskammer enthält in der Regel den Ölschalter, den Stromwandler für die Instrumente und Apparate, eine Blitzschutz-Drosselspule und eventuell noch einen Blitzableiter.

(772) Einrichtungen für Nebenzwecke, Heizung, Beleuchtung, Luftpumpe usw. In Gleichstrom-Niederspannungsfahrzeugen kann der Strom für Nebenzwecke unmittelbar hinter dem Hauptausschalter abgezweigt werden. In Gleichstrom-Hochspannungsfahrzeugen dagegen ist die Aufstellung eines besonderen umlaufenden Spannungswandlers (Dynamomotor), der Gleichstrom-Niederspannung für Nebenzwecke abgibt, empfehlenswert. Auf Wechsel-

stromfahrzeugen kann Niederspannung für Nebenzwecke entweder einem besonderen Hilfstransformator oder einer Anzapfung eines vorhandenen Regelleitungs- oder Leistungstransformators entnommen werden.

C. Speisung und Verteilung.

1. Stromzuführungssysteme.

(773) **Allgemeines.** In den mit Niederspannung arbeitenden Gleichstrombahnen war man mit der Erhöhung des Zuggewichtes und der Leistung zu so großen dem Fahrzeug zuzuführenden Stromstärken gelangt, daß man, wo ein eigener Bahnkörper vorhanden war, von der bei Straßenbahnen gebräuchlichen Form der Oberleitung des notwendigen großen Querschnittes des Fahrdrabtes wegen Abstand nahm und zur dritten Schiene überging. Aber diese von Erde isolierte und unter Spannung stehende Schiene bildet eine stete Gefahr für Menschen und Tiere und erschwert die Unterhaltung des ganzen Bahnkörpers. Bei Entgleisungen kann die dritte Schiene zerstört werden und die Betriebsstörung noch vergrößern, während heftige Schneefälle, Eis- und Reifbildung die Stromabnahme erschweren. Einen schwachen Punkt bilden auch die Kreuzungen und Weichen, an denen Unterbrechungen in der Führung der dritten Schiene bis zu 50 m Länge notwendig werden. Um Steckenbleiben des Zuges zu verhindern, ist man oft gezwungen gewesen, die dritte Schiene an dieser Stelle nach oben zu verlegen (New York Central Ry.). Vom wirtschaftlichen Standpunkt aus kann die dritte Schiene für z. B. kürzere Vorortstrecken mit dichtem Zugverkehr Verwendung finden (Hochbahn in Berlin und Hamburg 750 V; — Berlin-Großlichterfelde; Paris-Orléans usw.). Für Fernbahnen aber macht die für die Schiene zulässige Spannung von etwa 1—1,5 kV einen vollbahnartigen Betrieb mit dieser Art der Stromzuführung unwirtschaftlich (756), auch dann noch, wenn man mit der Spannung der dritten Schiene bis 2,4 kV geht, wie dies neuerdings bei der New York Central und bei der Michigan-Bahn der Fall ist (777). Mit der Entwicklung der Wechselstrombahnmotoren und der Verwendung hoher Spannungen ist daher auch die Ausbildung eines Stromzuführungssystems, der sogenannten *Kettenaufhängung*, Hand in Hand gegangen. Dieses System gestattet nicht nur, Spannungen von 20 kV mit einem verhältnismäßig schwachen Fahrdrabt dem Fahrzeug zuzuführen und selbst die größten Leistungen mit relativ kleinen Stromstärken zu beherrschen, sondern besitzt auch erhebliche Vorteile für die bei Vollbahnen vorkommenden hohen Geschwindigkeiten, gibt den Bahnkörper der dauernden Besichtigung und Unterhaltung frei und vermeidet Komplikationen an Weichen und Kreuzungen. Entwicklung der Stromzuführungseinrichtungen, EKB 1912, S. 673.

(774) **Einfache Form der Oberleitung.** Für Straßenbahnen wird in der Regel die einfache Aufhängung des Fahrdrabtes über Wagenhöhe und in angemeinerer Schienenmitte mit Hilfe von Isolatoren und Querdrähten verwendet.

Der Fahrdrabt besteht aus hartgezogenem Kupferdrabt und wird mit etwa 6—8 kg/mm² gespannt. Auf den geraden Strecken betragen die Abstände zwischen den Aufhängungspunkten in Richtung des Fahrdrabtes etwa 25—35 m. Hierbei ist der Durchhang der Leitungen noch derart begrenzt, daß die Rollen- oder Bügelstromabnehmer bei den mäßigen Geschwindigkeiten der Straßenbahnen den verschiedenen Höhenlagen ohne Nachteil folgen können.

Der Querschnitt des Fahrdrabtes beträgt meist 50 mm² und ist kreisförmig oder er besitzt eine rillen- oder lemniskatenähnliche Form, die eine günstigere Befestigung (klemmen statt löten) und eine breitere Kontaktfläche bei gleicher Masse gewährt. Zickzackverlegung (nur für Bügel) vgl. (775).

Eine einfache Form der Oberleitung kann auch für Voll- und Überlandbahnen noch verwendet werden, solange die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht zu hoch ist (Schwedische Staatsbahnen, Giovi, Mont-Cenis).

Normung des Fahrleitungsmaterials für Straßen- und Kleinbahnen, Verkehrstechnik 1920, S. 449, 1922 S. 273.

(775) Ketten-(Vielfach-)aufhängung. Die bei den Straßenbahnen übliche Einfachaufhängung des Fahrdrahtes ist für große Geschwindigkeit (über etwa 50 km/h) nicht geeignet, weil sich der Stromabnehmer an den Aufhängepunkten des Fahrdrahtes stößt und überdies dem stark durchhängenden Draht nicht immer folgen kann und daher abschlägt. Das kann zu Schwingungen des Stromabnehmers oder zu Drahtbruch Veranlassung geben. Für Vollbahnbetrieb, besonders aber für Schnellbetrieb ist daher eine biegsame und nachgiebige Konstruktion erforderlich, die trotz großer Spannweiten den Fahrdraht in möglichst unveränderlicher Höhe hält.

Man erreichte dies durch Aufhängung des Fahrdrahtes in möglichst vielen Punkten an besonderen Tragsseilen oder Ketten. Eine solche Anordnung wurde zum ersten Male von der AEG für die Spindlersfelder Anlage ausgeführt. Um die durch Temperaturschwankungen verursachten Längenänderungen auszugleichen, wurden die Fahrdrähte von Hand nachgespannt, was eine geringe Schrägstellung der Hängedrähte ergab.

Um die Verzerrung der Hängedrähte zu vermeiden, verwenden SSW außer dem Kettendraht und dem Fahrdraht noch einen Hilfstragdraht. Dieser ist am Kettendraht mittels gelenkiger Hängedrähte befestigt, während der Fahrdraht mittels leicht gleitender Schleifen am Hilfsdraht hängt (Abb. 465). Die in der

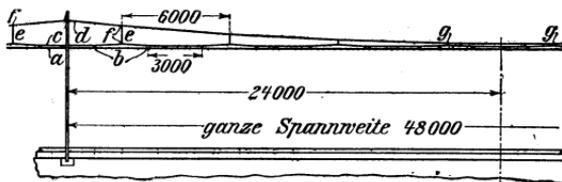


Abb. 465. Kettenaufhängung der SSW.

Längsrichtung verschiebbaren Schleifen gestatten dann ein Nachspannen des Fahrdrahtes bei senkrecht verbleibenden Hängedrähten. Aber auch bei dieser Anordnung entstehen noch Höhenänderungen des Fahrdrahtes, solange die Kette nicht selbst geregelt wird. Die AEG hat daher die Aufhängepunkte der Kette verschiebbar gemacht und über der Kette eine Hilfsleitung angeordnet, die auch die Kette selbst nachspannt. Bei Temperaturverminderung z. B. zieht sich die Kette zusammen, zugleich aber auch der Hilfsdraht, der die Befestigungspunkte der Kette wieder einander nähert. Ein Anheben des Fahrdrahtes findet daher nicht statt. Zum Nachspannen werden in Entfernungen von etwa 800—1000 m an den über Rollen geführten Stahlseilen entsprechende Gewichte angeordnet. Das Gewicht ist der Zugspannung des Drahtes entsprechend zu wählen. Anlage Dessau-Bitterfeld EKB 1911, S. 468; ETZ 1911, S. 609.

Einige Konstruktionen verwenden zwei Ketten statt einer (N. Y. N. H. Rly. — London-Brighton). Das Tragsseil kann auch zugleich als Blitzschutzseil dienen (N. Y. N. H. R.). Amerikanische Ausführungen EKB 1915, S. 37; 1916, S. 169.

Zur Erzielung einer gleichmäßigen Abnutzung des Stromabnehmer-Schleifstückes wird die Leitung derart im Zickzack verlegt, daß die ganze nutzbare Breite der Bügel (774) den Fahrdraht bestreicht; im Mittel etwa 0,5 m größte Abweichung aus der Gleismitte.

Für den Fahrdraht wird in der Regel hartgezogenes Kupfer von 36—38 kg/mm² Zerreißeigigkeit, für das Kettenwerk Siliziumbronze oder Stahlseil verwendet. Das Tragsseil der Bitterfelder Ausrüstung besteht aus verzinktem Stahlseil von 75 kg/mm² Zerreißeigigkeit, die Hängedrähte aus verzinktem Stahldraht von 40 kg/mm² Zerreißeigigkeit.

Fahrdraht *querschnitt* aus konstruktiven Rücksichten meist 100 mm², in der Regel 8-förmig (774). Die Spannweite kann 50—100 m betragen.

Als Tragwerk kommen je nach den örtlichen Verhältnissen Portalbrücken, Gittermasten mit Ausleger oder Queraufhängung und Holzmaste in Betracht. Die Fahrdrahthöhe beträgt $5\frac{1}{2}$ —7 m. Die Isolation wird oft doppelt genommen. Die Isolatoren sind durchweg hintereinander zu schalten und bestehen fast ausschließlich aus homogenem Porzellan, das frei von Spannung sein muß.

Zum Schutz gegen herabfallende Hochspannungsdrähte werden oft *Erdungsbügel* verwendet, welche den Stromzuführungsdraht in Form einer Schleife umgeben und bei Bruch eines Konstruktionsteiles der Aufhängung die ganze Teilstrecke erden.

Fahrdrahtaufhängung und *Obertleitungsnormalien* für 500 V Gleichstrom und für 11 und 22 kV Drehstrom-Fernleitung, *El. Railw. J. 1909, S. 591.* — *Einphasen-Strecken* ausrüstung in Bitterfeld EKB 1911, S. 1418, ETZ 1911, S. 609. — *Dreiphasenstrecke* des Kaskadentunnel Proc. A. J. E. E. 1909, S. 1410. — *Übersicht* über verschiedene Arten der Vielfachaufhängung, *Reishaus, EKB 1920, Heft 18/19.* — *Systeme* von Kettenoberleitungen *E & M 1921, S. 260.* — *Bewegungsvorgänge* an Kettenfahrleitungen ETZ 1921, S. 749. — *Die Fahrleitungsanlage* der Mittenwaldbahn EKB 1922, Heft 4/5. —

(776) Festigkeitsrechnungen. Für den Durchhang eines Drahtes von der Dichte δ kg/cm³, der zwischen zwei Punkten von der Entfernung a m aufgehängt und mit p kg*/cm² gespannt ist, gilt $f = a^2 \delta / 8 p$. Für gewöhnlichen Arbeitsdraht (Kupfer $\delta = 0,0089$) eine Entfernung der Stützpunkte von 40 m und eine Spannung von rd. 7 kg*/cm² ergibt sich demnach der Durchhang zu etwa 0,25 m.

Eine *Temperaturänderung* von Δt° ergibt eine Änderung der Spannungsbeanspruchung des Drahtes von angenähert $= \vartheta E \Delta t$ kg*/mm². Darin kann für hartgezogenes Kupfer der Temperaturkoeffizient $\vartheta = 0,0000165$, der Elastizitätsmodul $E = 13000$ kg*/mm² gesetzt werden. *Unterste Temperaturgrenze* = -20° C. (VDE).

Winddruck. Nach den Normalien des VDE ist eine Belastung von 125 kg*/m² senkrecht getroffener ebener Fläche, bzw. von 87,5 kg*/m² zylindrischer Oberfläche (entsprechend 0,7 des Durchmessers) einzusetzen.

Eislast. Die deutschen Normalien für Freileitungen schreiben 0,015 s kg/m vor, wenn s den Querschnitt in m² bedeutet. — Für die *Bitterfelder Ausrüstung* wurde eine zylindrische Eiskruste, deren äußerer Durchmesser gleich dem doppelten des Fahrdrahtes ist und ein spez. Gewicht des Eises von 0,9 angenommen. Die *höchst zulässige Beanspruchung* darf nach den Vorschriften des VDE 12 kg*/mm² nicht übersteigen.

Die *Vorschriften* des E.V. in Wien verlangen *fünffache Sicherheit* und schreiben als unterste Temperaturgrenze, die der Rechnung zugrunde liegen soll, -25° C sowie die Annahme von 150 kg Winddruck senkrecht getroffener Fläche vor.

Der *Bitterfelder Ausrüstung* (EKB v. 14. 8. 1911) wurde für die folgenden Annahmen eine dreifache Sicherheit zugrunde gelegt:

a) Temperaturänderungen von -20° bis $+40^\circ$, eine gleichzeitige Belastung durch das Konstruktionsgewicht und durch Winddruck.

b) Temperaturänderungen von -5° bis 0° C und eine gleichzeitige Belastung durch das Konstruktionsgewicht, durch Eislast und durch Winddruck von 50 kg*/m².

Durchhang und Spannung in Drähten, v. *Glinkski, ETZ 1903, S. 255.*

(777) Dritte Schiene (773). Über die Lage der dritten Schiene zum Gleis bestehen keine Vorschriften. Man legt sie neuerdings in der Regel neben das Gleis in Entfernungen von $a = 500$ bis 750 mm und $b = 70$ bis 200 mm (Abb. 466).

Die dritte Schiene wiegt etwa 20—75 kg/m (Hamburger Hochbahn 40 kg/m) und wird durch Isolatoren in Abständen von etwa 1,5—5 m getragen. Die Iso-

latoren bestehen aus gebranntem Ton oder Hartgummi, neuerdings Porzellan (N. Y. Central, Hamburger Hochbahn), seltener aus Holz. Die Stromabnehmer werden entweder durch ihr Eigengewicht oder durch Federn gegen die Schiene gedrückt. Die Stromabnahme erfolgt meist von oben, in den neuesten Ausführungen jedoch von unten (N. Y. C., Hamburger Hochbahn). Die Schiene in diesem Falle gegen zufällige Berührung besser geschützt werden, und die Isolatoren werden durch die Stromabnehmerschuhe entlastet. Die Leitfähigkeit des für die dritte Schiene verwendeten Stahles beträgt etwa $\frac{1}{7}$ derjenigen des Kupfers (gewöhnlicher Schienenstahl Leitfähigkeit $\frac{1}{11}$, reines Eisen $\frac{1}{5}$ des Kupfers). Das Material soll weiches Eisen sein von geringem Kohlenstoff- und Mangangehalt und hoher elektrischer Leitfähigkeit. Durch die Verwendung besonders kräftiger Schienen kann die Anordnung kupferner Verstärkungsleitungen erspart werden (New Yorker und Brooklyn Untergrundbahn 74 kg/m). Vorschläge zur Vereinheitlichung ETZ 1908, S. 655. — 2400 V-Anordnungen EKB 1916, S. 171. — Hamburger Hochbahn EKB 1912, S. 324. — Pariser Vorortbahnen EKB 1913, S. 545.

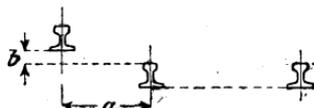


Abb. 466.

Anordnung der dritten Schiene.

(778) Unterirdische Stromzuführung. Von diesen Systemen hat nur das Schlitzkanalsystem Bedeutung erlangt, und zwar für Bahnen in den vornehmen Straßen großer Städte, in denen die Oberleitung untersagt wurde (SSW in Budapest ist darin vorbildlich gewesen).

(779) Schienenverbindungen. Die Oberleitung ist für Gleichstrom- und Wechselstrom auf dem europäischen Festland in der Regel einpolig, in England und in Amerika öfters doppelpolig zur Vermeidung von Erdströmen (z. B. Washington und Pittsburg). Als Rückleitung werden die Schienen mit elektrisch leitend verbundenen Stößen verwendet. Die Laschenverbindung genügt nicht als elektrische Verbindung. Man verwendet Kupferverbindungsstücke, die die Lasche überbrücken. Der nützliche Querschnitt der Verbindung beträgt 50 bis 100 mm², ihre Länge im Mittel 300 mm. Die Schiene wird daher bei einer Länge von 12 m angenähert um 30 % virtuell verlängert (bei 35 kg/m Schienengewicht).

Die Versuche, endlose Schienen durch elektrische Lötung (Goldschmidt'sches Thermitverfahren) oder durch umgeschmolzene Muffen herzustellen, haben gute Resultate in elektrischer Beziehung ergeben. Um der endlosen Schiene aber auch freie Ausdehnung zu gestatten, schweißt man nur etwa 8—10 Schienenlängen zusammen und verlascht die so gewonnenen Längen wie gewöhnlich (vgl. Alumino-thermische Schienenschweißungen, EKB 1909, S. 489).

Widerstand der Schienen und Schienenverbindungen vgl. (782). Typen und Ausführungsbeispiele für Schienenverbindungen vgl. Parshall & Hobart, Railway Engineering, S. 273.

2. Verteilungsnetz.

(780) Allgemeines. Die Verteilungspunkte werden mit Rücksicht auf den zulässigen Spannungsabfall gewählt. Die Stromverteilung wird an Hand des Fahrplanes und der Fahrdiagramme nach den für die Berechnung von Leiternetzen gültigen Regeln ermittelt. (Vgl. [643 bis 675] und Herzog und Feldmann, Berechnung der Leitungsnetze.)

Bei der Anlage des Netzes ist auf die von ihm ausgehenden Schwachstromstörungen Rücksicht zu nehmen, die vom Spannungsabfall durch die Erdrückleitung, von der elektrostatischen und von der elektromagnetischen Induktion herrühren. Wirksamer Schutz ist Verkabelung der Schwachstromleitungen, mindestens aber die Verdopplung der Einfachleitungen und die Verbesserung der Isolation. (ETZ 1920, S. 221. — E & M 1921, S. 93. — Amerikan.

Untersuchung ETZ 1921, S. 1261. — Kuntze, Schwachstromstörungen bei Einphasenbahnen, München 1920.)

Gleichstrombahnen werden entweder mit Leitungen gespeist, die von eigenen Gleichstromwerken unmittelbar zu den Verteilungspunkten führen, oder durch Unterwerke, die längs der Strecke verteilt sind und in der Regel hochgespannten Drehstrom in Gleichstrom umformen.

Drehstrombahnen erfordern in der Regel ruhende Transformatoren zur Herabminderung der Verteilungsspannung, sobald diese etwa 3—6 kV überschreitet. Einphasenbahnen können noch mit 20—25 kV unmittelbar gespeist werden und zwar aus Einphasen- oder auch aus Drehstromkraftwerken. Eine gleichmäßige Belastung aller 3 Phasen wird zwar niemals zu erreichen sein, aber es ist oft möglich, die Belastungsschwankungen der Phasen auszugleichen. Auf der Stubaitalbahn hängt sogar Licht und Bahn an derselben Phase der Drehstromgeneratoren, und es ist trotzdem mit Hilfe eines Reihentransformators gelungen, die Belastungsstöße beim Anfahren im Lichtnetz aufzuheben.

Man kann auch die Bahnstrecke in $3n$ Abschnitte einteilen, die an den 3 Phasen hängen, oder in $2n$ Abschnitte, den Drehstrom mit Hilfe der Scottschen Schaltung (342) in Zweiphasenstrom transformieren¹⁾. In diesen beiden Fällen müssen aber die verschiedenen Phasen angehörenden Fahrdrähte durch tote Strecken voneinander getrennt und isoliert werden. Wenn es sich um die Errichtung eigener Bahnkraftwerke handelt, sollten nur Einphasengeneratoren in Verbindung mit einphasiger Verteilung Verwendung finden.

Die Höhe der gewählten Verteilungsspannung muß an Hand des Belastungsdiagrammes und des Spannungsabfalles auf ihre Richtigkeit nachgeprüft werden.

Für ausgedehnte Netze sind Speiseleitungen mit etwa 30—80 kV Übertragungsspannung nicht mehr ungewöhnlich.

Über die Wahl des Verteilungsnetzes: Gleichmann, Organ f. d. Fortsch. d. Eisenbahnwesens 1922, Wechmann, ETZ 1922, Ossanna, Fernleitungsmöglichkeiten, ETZ 1922, S. 1025, Kadrnoczká, Spannungsreglung im Bayernwerknetz, ETZ 1922, S. 713, W. Kummer, Zur Spannungswahl auf französischen Hauptbahnen, Schweiz. Bauz. 1912, S. 301.

Der Abstand der Speisepunkte ist nach W. Kummer (Wahl der Stromart, Sammlung Vieweg, Braunschweig):

$$\lambda = \frac{E}{\sqrt{\rho}} \cdot \frac{1}{C} \cdot \text{km.}$$

E = Fahrdrachtspannung,

ρ = Verkehrsdichte in $t/h = \frac{P}{l}$,

$P = Q/h$ = Verkehr in tkm/h ,

l = Streckenlänge in km ,

Q = Jahresverkehr in km .

$$C \text{ ein Koeffizient} = \sqrt{\frac{100 \cdot 9,81 \cdot z \cdot e}{2\gamma \cdot 3,6 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}},$$

z = Bahnwiderstand in kg/t (vgl. 790),

e = Fahrleitungswiderstand in Ω/km , (782, 783),

γ = zulässiger Spannungsabfall in %,

η = Wirkungsgrad der Fahrleitungsanlage vom Speisepunkt bis zum Stromabnehmer,

$\cos \varphi$ = Leistungsfaktor der Fahrleitungsanlage vom Speisepunkt bis zum Stromabnehmer.

¹⁾ Rotterdam-Haag, EKB 1910, S. 501 und Z. d. V. D. I. 1910, S. 1750.

Für Überschlagsrechnungen kann gesetzt werden:

Zulässiger Spannungsabfall für Wechselstrom und Gleichstrom $\gamma = 17,5\%$,
Zulässiger Spannungsabfall für Drehstrom 15% ,

$e = 0,21 \Omega/\text{km}$ für Gleichstrom,

0,33 „ „ Wechselstrom,

0,29 „ „ Drehstrom,

$\eta = 82\%$ für Gleichstrom,

72% „ Wechselstrom $\cos \varphi = 0,68$,

73% „ Drehstrom $\cos \varphi = 0,68$.

$C = 5$ für Gleichstrom,

8 „ Wechselstrom und Drehstrom,

$p < 100 \text{ t/h}$ für schwach befahrene Nebenstrecken,

$> 200 \text{ t/h}$ „ größere elektrische Bahnen,

$> 2000 \text{ t/h}$ für stark befahrene Hauptstrecken und Stadtschnellbahnen.

Die Frequenz ist für Drehstrombahnen (Italien) und neuerdings auch für Einphasenbahnen (Preußen, Bayern, Baden, Österreich, Schweiz, Schweden) einheitlich zu $15-16^{2/3} \text{ Per/s}$ angenommen worden. Zahlreiche Einphasenbahnen haben auch mit 25 Per/s (Blankenese-Ohlsdorf, London-Brighton, St. Pölten-Mariazell, New York-New Haven und Hartford) und Kleinbahnen (St. Avoold, ETZ 1911, S. 11, Stubaital) sogar mit $40-50 \text{ Per/s}$ im Anschluß an bestehende Kraftwerke sehr gute Resultate ergeben. Zur Frage der Frequenz s. Eichberg, ETZ 1909, S. 623; Pichelmayr, EKB 1911, S. 127.

(781) Der **Spannungsabfall** ergibt sich aus den Belastungsdiagrammen der Linie und ist für die ungünstigste Verteilung der Wagen auf der Strecke aus den Stromstärken und den Widerständen zu berechnen.

Für Gleichstromstraßenbahnen soll die gesamte Spannungsschwankung an den Motoren nicht mehr als $20-30\%$ betragen. Dabei ist darauf zu achten, daß die Spannung zwischen zwei Punkten der Schienen mit Rücksicht auf die elektrolytischen Wirkungen höchstens 7 V betragen darf. Nur für Gleichstrombahnen mit eigenem Bahnkörper und gut isolierenden Schwellen kann um etwa 50% höher gegangen werden (vgl. Erdstromnormalien ETZ 1910, S. 491; ETZ 1911, S. 511 u. 1032).

Strom und Spannung der Schienen an einem gegebenen Punkte sind Funktionen der Entfernung des Punktes vom Speisepunkte, der Schienenwiderstände und der Übergangswiderstände von Schiene zu Erde (vgl. Isolationswiderstand 785). Über den Verlauf der Erdströme und die Gefahrzone vgl. Herzog und Feldmann, S 425 und Normalien des VDE, §§ 2—5 der Vorschriften zum Schutz der Gas- und Wasserleitungsröhren usw. Bericht des Schweiz. ETV, ETZ 1920, S. 48, 261. Über die Messung von Erdstromdichten vgl. EKB 1909, S. 226. Korrosionsverhältnisse bei Bahnen (Erdströme), Bericht der Schweiz. El. V., E & M 1921, S. 342.

Erreicht der Spannungsabfall in den Schienen streckenweise eine unzulässige Höhe, so kann er vermindert werden durch die Verwendung von isolierten Rückspeisekabeln und **Zusatzzmaschinen** (sogenannte **negative Booster**). Der entfernte Schienenstrang erhält dann das Potential der negativen Sammelschienen im Kraftwerk, und die zu schützenden Rohmassen werden negativ gegen die Schienen, so daß sie bei eintretender Elektrolyse die Kathode bilden. Die Gesichtspunkte für die Anordnung und Berechnung der negativen Rückspeisekabel sind die gleichen wie für die positiven Speiseleitungen (vgl. Herzog und Feldmann II, S. 431).

In Wechselstromkreisen treten an die Stelle der Widerstände die Scheinwiderstände, die geometrisch addiert werden müssen. Sie hängen von der angenommenen Stromverteilung ab und müssen geändert werden, wenn die Stromverteilung nicht zutrifft.

Der Spannungsabfall für Wechselstrombahnen kann für rohe Rechnungen in den Schienen etwa 5mal und in der Oberleitung angenähert 3mal (bei 15 Per/s) größer angenommen werden als für Gleichstrom bei denselben Verhältnissen.

Die größten Spannungsschwankungen am Motor sollen 30% nicht übersteigen. Dagegen kann der Spannungsabfall in den Schienen mit Rücksicht auf die verminderte elektrolytische Wirkung des Wechselstromes 50—100 V und bei gut isolierten Schwellen auch 150 V betragen. Vorschriften dafür gibt es nicht.

Änderungen des Schienenquerschnittes, der Spurweite und der Fahrdrathöhe haben nur geringen Einfluß auf den Spannungsabfall, weil diese Größen unter dem log stehen (783) und für normale Ausführungen auch nur sehr wenig veränderlich sind.

Dagegen wächst der Spannungsabfall bei Einphasen- und Drehstrom mit der Frequenz, und zwar tritt dieses Wachsen bei großen Leiterquerschnitten, wo die induktiven Spannungskomponenten die Ohmschen überwiegen, viel stärker hervor, d. h. bei höheren Frequenzen kann die Verwendung großer Querschnitte den Spannungsabfall nur unbedeutend verringern. Es wird daher bei Einphasen- und Drehstrom besonders bei höheren Frequenzen immer zweckmäßig sein, einen Fahrleitungsdraht vom Mindestquerschnitt (gew. 50 mm²; für Vollbahnen sind 100 mm² gebräuchlich) zu verwenden und den Spannungsabfall durch die Wahl einer entsprechend hohen Spannung und einer genügenden Anzahl von Speisepunkten in zulässigen Grenzen zu halten¹⁾. Der gesamte Spannungsabfall ist also bei gegebener Stromstärke und Frequenz nur durch den Fahrdrathquerschnitt bestimmt und kann für Überschlagsrechnungen an Hand der folgenden Tabellen, die für mittlere Werte, und zwar für 6 m Fahrdrathöhe und 32 kg/m schwere Schienen gelten, berechnet werden. Der Abstand der beiden Fahrdrähte voneinander ist bei Drehstrom zu 1 m angenommen:

Spannungsabfall in V/km für 1 A bei Normalspur ¹⁾								
Frequenz	Einphasenstrom				Drehstrom			
	q = 50	60	80	100 mm ²	50	60	80	100 mm ²
0 Per/s	0,39	0,33	0,26	0,21	0,44	0,37	0,28	0,22
15 „	0,46	0,42	0,36	0,33	0,49	0,42	0,35	0,31
25 „	0,57	0,53	0,48	0,45	0,57	0,50	0,43	0,40
50 „	0,85	0,82	0,79	0,76	0,79	0,74	0,69	0,57

Für eiserne Fahrdrathleitung und Schienenrückleitung von 45 kg/m können folgende überschlägige Werte für den gesamten Spannungsabfall für 1 Ampere angenommen werden:

Frequenz	Fahrdrath		
	50 mm ²	100 mm ²	150 mm ²
0 Per/s	2,62 V/km	1,31 V/km	0,88 V/km
15 „	6,60 „	4,51 „	3,65 „
25 „	7,64 „	5,25 „	4,23 „
50 „	9,40 „	6,60 „	5,42 „

(Kummer, E & M, Wien, 17. 2. 1918.)

Zur Verminderung des Spannungsabfalles in den Schienen können wie bei Gleichstrom Rückspeisekabel verwendet werden, die jedoch an Stelle der Zusatzmaschinen Reihentransformatoren (Saug- oder Boostertransformatoren) erhalten. (Vgl. DRP 179519 und 193369.)

¹⁾ Vgl. Huldshiner, ETZ 1910, S. 1206; Lichtenstein, ETZ 1907, S. 621.

Für Überschlagsrechnungen kann der Spannungsabfall wie folgt angenommen werden (W. K u m e r , Wahl der Stromart, Sammlung Vieweg, Braunschweig):

Für eingeleisige Normalspurbahnen mit 100 m² Fahrdrabt:

Gleichstrom 0,21 V je A und je km,

15 Per/s Wechselstrom 0,33 V je A und je km totaler Abfall, 0,24 V je A und je km Ohmscher Abfall,

15 Per/s Drehstrom 0,29 V je A und je km totaler Abfall, 0,26 V je A und je km Ohmscher Abfall,

Für Grubenbahnen 50 Per/s Wechselstrom: 1 V je A und je km.

(782) Gleichstromwiderstände. Der Gesamt-widerstand des Stromkreises, der in die Berechnung des Spannungsabfalles eingeht, besteht bei Gleichstrom aus den einfachen Ohmschen Widerständen der Fahrdrabtleitung und der Schienenrückleitung, sofern keine besondere Rückleitung vorgesehen ist.

Der Ohmsche Widerstand beträgt

$$\frac{1000}{\chi \cdot q} \Omega/\text{km},$$

wenn q den Querschnitt in mm² bedeutet und χ die Leitfähigkeit für Kupfer = 57 und für Weicheisenschienen = 8 gesetzt wird. Weil das spez. Gewicht des Eisens ebenfalls angenähert = 8 ist, ergibt sich für den Schienenwiderstand angenähert

$$\frac{1}{g} \Omega/\text{km},$$

wenn g das Gewicht der Schiene in kg/m bedeutet.

Für die Schienenverbindungen kann eine mittlere Länge von 30 cm und ein Mindestquerschnitt von 50 mm² angenommen werden. Der Übergangswiderstand hängt von der Sauberkeit der Ausführung ab, steigt in der Regel mit der Zeit an und kann im Mittel zu 0,0001 Ω für den Kontakt eingesetzt werden. Danach beträgt z. B. der Widerstand für 1 km einer einfachen Schiene von 53 kg/m und 12 m Länge¹⁾

reiner Schienenwiderstand $\frac{1}{35}$	= 0,029
1000:12 = 84 Schienenverbindungen von 30 cm Länge	0,0084
2 x 84 Übergangswiderstände zu 0,0001 Ω	0,0168
	0,054 Ω/km .

Die amerikanische Praxis berücksichtigt den gesamten Schienenwiderstand durch einen Zuschlag von im Mittel 40 % zum Widerstand des Fahrdrabtes. Indessen ist in den Fällen, wo der Spannungsabfall in den Schienen einen vorgeschriebenen Wert nicht überschreiten darf, eine mindestens angenäherte Berechnung zu empfehlen.

Meßwagen zur Bestimmung der Schienenstoßwiderstände, EKB 1908, S. 568.

(783) Wechselstromwiderstände. Der Scheinwiderstand der durch die Oberleitung und Schienenrückleitung gebildeten Masche umfaßt den wirksamen Widerstand und die totale Reaktanz der aus Oberleitung und Schienen gebildeten Schleife. Laufen mehrere Fahrdrähte, Speiseleitungen oder Gleise parallel, so sind deren Scheinwiderstände geometrisch zu addieren.

Der wirksame Widerstand R_w ist gleich dem Ohmschen durch Gleichstrommessung ermittelten Wert R_g , vermehrt um den Skin-Effekt A_s , und — in magnetischen Materialien (Stahlschienen). — auch noch um einen den Hystereseverlust A_H entsprechenden Betrag also

$$R_w = \frac{I^2 R_g + A_s + A_H}{I^2},$$

wenn I die Stromstärke bedeutet.

¹⁾ Herzog u. Feldmann, S. 412.

Der wirksame Widerstand ist daher von der Form des Leiters, von den magnetischen Eigenschaften des Materials und von der Höhe der Magnetisierung des Leiters, d. h. von der Stromstärke abhängig.

Für Kupfer- und Aluminiumleiter kann der Skineffekt für die bei Bahnen verwendeten Frequenzen vernachlässigt werden.

In den Schienen schwankt der Wert $K = R_w/R_p$ bei Stromstärken von 50 bis 600 A und 25 Per/s zwischen 2 und 10 für 25 bis 35 kg schwere Schienen. Man kann schätzungsweise mit einem Wert von $K = 7$ für 25 Per/s und $K = 5$ für 15 Per/s rechnen.

Nach Dawson ist für 25 Per/s

$$R_w = \frac{13}{u},$$

wenn u den Umfang des Schienenprofils in cm bedeutet.

Die gesamte Induktanz für eine beliebige Anzahl paralleler Leiter, in denen die Summe der in den Leitern

$$1, 2, 3, \dots, (p-1), p, (p+1), \dots, (n-1), n$$

zugeführten oder positiven Ströme

$$\Sigma(+I) = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_{(p-1)} + I_p + I_{(p+1)} + \dots + I_{(n-1)} + I_n$$

gleich ist der Summe der in den Leitern

$$I, II, III, \dots, (P-1), P, (P+1), \dots, (N-1), N$$

abgeführten oder negativen Ströme

$$\Sigma(-I) = (-I_I) + (-I_{II}) + \dots + (-I_{P-1}) + (-I_P) + (-I_{P+1}) + \dots + (-I_{N-1}) + (-I_N),$$

also für

$$\Sigma(+I) = \Sigma(-I)$$

beträgt allgemein für den einzelnen beliebigen Leiter p

$$L_p = l \cdot 10^{-4} \cdot \left\{ \frac{\mu}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{\Delta_I \cdot \Delta_{II} \cdots \Delta_N}{\varrho \cdot \Delta_1 \cdot \Delta_2 \cdots \Delta_n} \right\}.$$

Im Zähler des zweiten Gliedes stehen die Funktionen Δ_I bis Δ_N , im Nenner Δ_1 bis Δ_n , die folgendermaßen gebildet werden: Es ist

$$\Delta_I = \varrho_{p,I}^{I_I/I_p} \quad \Delta_1 = \varrho_{p,1}^{I_1/I_p},$$

worin $\varrho_{p,I}$ bis $\varrho_{p,N}$ die Abstände ϱ des betrachteten Leiters p von allen Leitern, die entgegengesetzt gerichteten Strom führen, $\varrho_{p,1}$ bis $\varrho_{p,n}$ die Abstände von jenen Leitern, in denen der Strom in derselben Richtung wie im betrachteten Leiter fließt. Der Exponent von ϱ ist gleich dem Verhältnis der Ströme jener Leiter, deren Abstand die Potenzbasis bildet. ϱ_p ist der Halbmesser des Leiters p oder eines mit ihm flächengleichen Kreises in cm, l die Leiterlänge in km, μ die Permeabilität, für Kupfer = 1, für Stahlschienen = 18 (nach Messungen).

Die Reaktanz beträgt dann

$$x_p = \omega L_p$$

und der Scheinwiderstand

$$z_p = \sqrt{R_p^2 + x_p^2}.$$

(784) Besondere Fälle. 1. Fahrdrabt über Einfachgleis mit Schienenrückleitung (Abb. 467a). Fahrdrabtquerschnitt $\varrho_1^2 \pi = 50 \text{ mm}^2$; $\varrho_1 = 0,8 \text{ cm}$. Schienenquerschnitt 5160 mm^2 ; $\varrho_I = \varrho_{II} = 8,1 \text{ cm}$. Leiter mit positiven Strömen: Leiter 1 = Fahrdrabt; $I_1 = +I$. Leiter mit negativen Strömen: Schiene S_I , $I_I = -1/2 I$; Schiene S_{II} , $I_{II} = -1/2 I$. Abstände $\varrho_{1,I} = \varrho_{2,II} \approx H = 600 \text{ cm}$; $\varrho_{1,II} = g = 143,4 \text{ cm}$.

a) Fahrdrabt: Induktanz $L_1 = \left\{ \frac{1}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{H^{1/2}}{\rho_1} \right\} 10^{-4} = 0,00255 H$.

Für 25 Per/s: $k_1 = 2\pi\nu L_1 = 0,4 \cdot \Omega/\text{km}$; der Ohmsche Widerstand:

$$R_1 = \frac{1000}{57 \cdot 50} = 0,35 \Omega/\text{km} \text{ und der Scheinwiderstand: } z_1 = \sqrt{0,35^2 + 0,4^2} = 0,53 \Omega/\text{km}.$$

b) Gleis: Induktanz einer Schiene: $L_I = L_{II} = \left\{ \frac{18}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{H^2}{\rho_1 \cdot g} \right\} 10^{-4} = 0,00266 H$, oder für die beiden parallelgeschalteten Schienen: $\frac{1}{2} L_I = 0,0013 H$. Die Reaktanz ist daher: $\frac{1}{2} x_I = \frac{1}{2} x_{II} = 2\pi\nu L_I = 0,21 \Omega/\text{km}$. Der Gleichstromwiderstand der Schienen von 40 kg/m ist $\frac{1}{40} = 0,025 \Omega/\text{km}$ einer Schiene, der effektive Widerstand daher für $R_w = 7 R_g = 0,175 \Omega/\text{km}$ und für die parallelgeschalteten Schienen: $0,0875 \Omega/\text{km}$. Der Scheinwiderstand der Schienen

$$\frac{1}{2} z_I = \sqrt{0,21^2 + 0,0875^2} = 0,227 \Omega/\text{km} \text{ Gleis.}$$

Der Scheinwiderstand der ganzen Schleife aus Fahrdrabt und Schienenrückleitung sonach

$$\sqrt{\{0,35 + 0,0875\}^2 + \{0,4 + 0,21\}^2} = 0,75 \Omega/\text{km}.$$

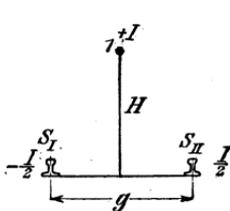


Abb. 467 a. Fahrdrabt über Einfachgleis.

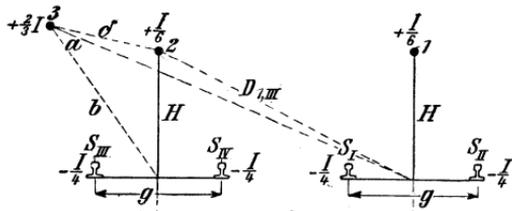


Abb. 467 b. Doppelgleis mit Speiseleitung ($n = 6$).

2. Doppelgleis mit Speiseleitung (Abb. 467 b). Zugeführte positive Ströme: Fahrdrabt 1 und 2 je $\frac{I}{n}$; Speisedrabt 3 führt $\frac{n-2}{n} \cdot I$. Rückströme: 4 Schienen $S_I - S_{IV}$ je $\frac{I}{4}$. Abstände:

$$\begin{aligned} \delta_{1,I} &= \delta_{1,II} = \delta_{2,III} = \delta_{2,IV} = H; \\ \delta_{1,III} &= \delta_{1,IV} = \delta_{2,I} = \delta_{2,II} = D; \\ \delta_{1,3} &= A; \quad \delta_{2,3} = \delta; \\ \delta_{3,I} &= \delta_{3,II} = a; \quad \delta_{3,III} = \delta_{3,IV} = b; \\ \delta_{I,II} &= \delta_{III,IV} = g; \quad \delta_{1,2} = \delta_{I,III} = \delta_{II,IV} = A. \end{aligned}$$

Induktanzen:

$$\text{Speiseleitung: } L_3 = \left\{ \frac{1}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{a \frac{n}{2(n-2)} \cdot b \frac{n}{2(n-2)}}{\rho_3 \cdot \frac{1}{\delta^{n-2}} \cdot \frac{1}{\delta^{n-2}}} \right\} 10^{-4} \text{ Henry.}$$

$$\text{Fahrdrabt: } L_1 = L_2 = \left\{ \frac{1}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{\frac{n}{H^2} \cdot \frac{n}{D^2}}{\rho_1 \cdot A \cdot \delta^{n-2}} \right\} 10^{-4} \text{ Henry.}$$

$$\text{Schiene: } L_I = L_{II} = \left\{ \frac{18}{2} + 2 \log \text{nat} \frac{H^{\frac{4}{n}} \cdot D^{\frac{4}{n}} \cdot a^{\frac{4}{n} (n-2)}}{Q \cdot g \cdot A^2} \right\} 10^{-4} \text{ Henry.}$$

$$\text{Gesamtinduktanz der Strecke: } x = 2\pi\nu \left\{ \frac{L_1 L_3}{2L_3 + L_1} + \frac{L_I}{4} \right\} 10^{-4} \text{ Henry.}$$

$$\text{Gesamtwiderstand: } R = \frac{R_3 R_1}{2R_3 + R_1} + \frac{R_I}{4} \text{ Ohm.}$$

Der gesamte scheinbare Widerstand: $z = \sqrt{x^2 + R^2}$ Ohm.

(785) Der **Isolationswiderstand** beträgt nach Lichtenstein (ETZ 1907, S. 648) für Straßenbahnschienen etwa $0,2 \Omega/\text{km}$ gegen Erde und für Vollbahnschienen auf Schotter und Holzschwellen etwa $0,84 \Omega/\text{km}$ gegen Erde. Der Isolationswiderstand für die Schwelle etwa 1200Ω .

3. Kraftwerke.

(786) **Bahnkraftwerke im allgemeinen.** Für die Errichtung von Bahnkraftwerken gelten im allgemeinen die für die elektrischen Kraftwerke überhaupt maßgebenden Gesichtspunkte. Die Lage des Kraftwerkes soll möglichst nahe den Verbrauchsmittelpunkten des elektrischen Stromes angelegt werden. Aber praktische und wirtschaftliche Rücksichten ergeben oft eine von der theoretisch richtigen weit abweichende Lage.

Auf unbedingte Betriebssicherheit der Anlage ist selbst auf Kosten der Wirtschaftlichkeit Rücksicht zu nehmen. Daher sollen in großen Kraftwerken die Kessel nicht nur in eigenen, von den übrigen Gebäuden vollständig getrennten Kesselhäusern untergebracht, sondern auch in mehreren voneinander vollständig getrennten Gruppen aufgestellt werden. Jede Kesselgruppe soll ihr eigenes Generatoraggregat, ihre eigene Dampfrohrleitung besitzen und eine unabhängige Stromerzeugungsanlage für sich bilden. Diese weitgehende Unabhängigkeit der Einheitsgruppen voneinander reicht jedoch nur bis zu den Sammelschienen. Im Interesse höchster Betriebssicherheit aber haben z. B. die N. Y. Central und die Brooklyn Rapid Transit Co. zwei voneinander unabhängige Kraftwerke errichtet.

Die Spulen der Transformatoren sind gegen mechanische Beanspruchungen aufs sorgfältigste zu sichern, weil die bei etwaigen Kurzschlüssen auf der Strecke zu liefernden Augenblicksleistungen leicht zerstörend wirken können.

Die Bahngeneratoren müssen sorgfältiger isoliert werden als Maschinen für ortsfesten Betrieb, die Wickelköpfe müssen gegen das Gehäuse versteift werden. Die Läufer der Generatoren sollen mit Dämpferwicklungen versehen sein. Wegen der starken Stromstöße empfiehlt sich eine selbsttätige Spannungsregelung (Tirrill, Rice-Danielson'sche Compoundierung; Einphasengeneratoren Altona, v. Glinski, Z. d. V. D. I. 1908, S. 1590). Richtlinien für Wechselstromkraftwerke (Muldenstein-Altona), EKB 1912, S. 670. Das Einphasenkraftwerk Altona (Blankenese-Ohlsdorf) ETZ 1909 und 1911, S. 1152. Allgemeine Angaben und Zusammenstellung amerikanischer elektrischer Bahnkraftwerke EKB 1909, S. 691.

(787) **Unterwerke.** Die Zahl und die Lage der Unterwerke ist durch den zulässigen Spannungsabfall in den Schienen und in der Oberleitung bestimmt. Insbesondere ist die Anlage der Unterwerke an Bahnknotenpunkten als dem natürlichsten Verteilungspunkt der Energie zu empfehlen. Bei Bestimmung der Größe der Unterwerke hat man ähnlich wie bei Kraftwerken vorzugehen und an Hand des Fahrplanes und der Zuggewichte die Zahl, den Stromverbrauch und die Entfernung der Züge von den Unterwerken festzustellen und den gesamten, den höchsten und den mittleren Verbrauch zu berechnen. Der Spannungs-

abfall ist für die ungünstigste Lage der Züge und für den stärksten Betrieb anzunehmen. Dabei ist mit einem mit der Zeit allmählich wachsenden Betriebe zu rechnen. Aus dem Belastungsfaktor ergibt sich ein Anhaltspunkt für die Größe und Zahl der zu wählenden Einheiten. Sie werden passenderweise so angenommen, daß sowohl bei leichtem als auch bei schwerem Betrieb die Einheiten möglichst vollbelastet laufen. Dabei ist es vorteilhaft, für alle Unterwerke die gleichen Einheiten zu wählen. Der Wirkungsgrad der *Drehstrom-Gleichstrom-Unterwerke* kann von den Drehstromsammelschienen des Unterwerks bis zum Stromabnehmer zu etwa 73—77 % angenommen werden. Es entfallen nämlich auf die ruhenden Transformatoren Drehstrom-Hochspannung-Niederspannung etwa 3 %, auf die umlaufenden Umformer etwa 10—12 % und auf die Verluste im Fahrdraht 10—12 %. Hierzu kommen noch etwa 4 % für Speiseleitung-Sammelschienen-Unterwerk bis Sammelschienen-Kraftwerk und etwa 3 % auf die Niederspannung-Hochspannung-Transformatoren im Kraftwerk. Der Wirkungsgrad vom Generator bis zum Stromabnehmer ist daher im Mittel etwa 68 %. Die Leistung des Kraftwerkes ergibt sich durch Überlagerung der Leistungen aller Unterwerke unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Unterwerke und der Übertragungsleitungen.

Die Gesamtleistung aller in Drehstrom-Gleichstrom-Unterwerken aufgestellten Maschinen ergibt mit Rücksicht auf die Notwendigkeit, den höchsten Bedarf des Bezirkes decken zu müssen, im Verein mit dem schlechten Belastungsfaktor und der geringen Überlastungsfähigkeit der umlaufenden Aggregate einen die Leistung der im Kraftwerk aufgestellten Maschinen um 40—60 % übersteigenden Betrag.

Die Unterwerke in Drehstrom-Gleichstromsystemen enthalten neben den umlaufenden Umformern ruhende Hochspannungstransformatoren, wenn die Übertragungsspannung höher als 13 kV ist, ferner vollständige Schaltanlagen für Hoch- und Niederspannung auf der Wechselstromseite und für Niederspannung auf der Gleichstromseite.

In reinen Wechselstromsystemen dagegen kann die Dauerleistung aller ruhenden Transformatoren in den Unterwerken zusammen selbst kleiner sein als die Dauerleistung des Kraftwerkes. Denn die Transformatoren können Belastungsstöße bis zum 6fachen aufnehmen und aussetzend selbst mit der doppelten und dreifachen Last beansprucht werden.

Die umlaufenden Umformer sind entweder Motorgeneratoren, Kaskaden- oder Einankerumformer. Motorgeneratoren gestatten eine weitgehende Spannungsregelung und daher größeren Spannungsabfall auf der Wechselstromseite als Einankerumformer, besitzen aber schlechteren Wirkungsgrad und sind teurer als Einankerumformer. Diese aber müssen wieder für Niederspannung ausgeführt werden, erfordern also in allen Fällen noch ruhende Transformatoren und verlangen besser geschulte Wartung. Durch Verwendung von Zusatzmaschinen oder Potentialreglern kann die Spannung der Einankerumformer in genügenden Grenzen geregelt werden. Wirkungsgrad und Anschaffungskosten des Kaskadenumformers liegen ungefähr in der Mitte zwischen Einankerumformer und Motorgenerator. (569 u. folg.)

Drehstrom-Gleichstromumformwerke für Bahnkraftwerke EKB 1912, S. 302. Amerikanische Umformerpraxis und Unterwerke EKB 1909, S. 208.

(788) Pufferanlagen. In vielen Fällen hat sich die Verwendung einer Akkumulatorbatterie in den Kraft- oder Unterwerken als vorteilhaft erwiesen, insbesondere wenn sie so reichlich gewählt wird, daß sie nicht nur zum Ausgleich der Belastungsschwankungen, sondern auch als Ersatz für mindestens eine Maschineneinheit dient und im Bedarfsfalle kurzzeitig zur Stromlieferung ans Netz unmittelbar herangezogen werden kann; vgl. (670, 671).

Die N. Y. Central hat in ihren Unterwerken Batterien in großem Umfange verwendet. Die größte davon umfaßt 318 Zellen mit einer Entladestromstärke

von etwa 4000 A eine Stunde lang und 12000 A eine Minute lang (Dawson, S. 744).

In Verbindung mit selbsttätig umkehrbaren Batteriezusatzmaschinen (reversible booster) sind Pufferbatterien namentlich in kleineren Werken mit niedrigem Belastungsfaktor zu empfehlen. Sie übernehmen dort selbsttätig die Lieferung der Spitzenleistung zuzeiten des höchsten Strombedarfes und gestatten, kleinere, nur für die mittlere Leistung bemessene Einheiten zu verwenden, während sie andererseits zuzeiten schwachen Strombedarfs von den Generatoren geladen werden, so daß diese auch dann noch vollbelastet laufen können. Die Zusatzmaschine erhält im allgemeinen gemischte Wicklung und liegt in Reihe mit der Batterie, parallel zum Generator. Die Abb. 468 zeigt die Piranische Anordnung. Bei hohen Belastungen überwiegt die Hauptstromerregung über die Nebenschlußerregung. Die Zusatzspannung erhöht dann die Spannung der Batterie, die sich aufs Netz entlädt, und umgekehrt. Mit diesen Anordnungen können die Belastungsschwankungen innerhalb der Grenzen von 10 bis 20% gehalten werden.

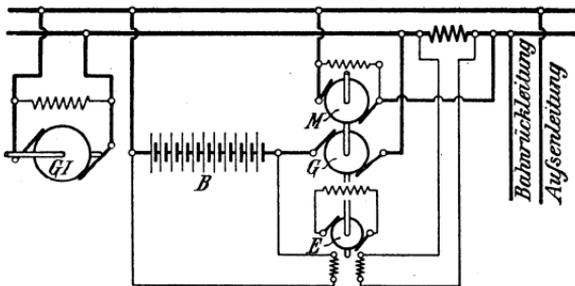


Abb. 468. Piranische Anordnung.

In der Wechselstrompufferanlage der einphasigen Albtalbahn (EKB 1915, S. 181) wurde zur Pufferung der Lastspitze eine Akkumulatorenbatterie von 285 Elementen und 1000 Ah gewählt. Sie liegt am Netz über einen Umformersatz, der sich zusammensetzt aus einem mit 750 U/min betriebenen Einphasengenerator für 8800 V 25 Per/s und einer Gleichstromdynamo von 500 kW für 590/780 V. Die Batterie wird bei Lastschwankungen zum Ansprechen gebracht durch eine Hilferregung der Gleichstrommaschine, die von einem Reihentransformator des Netzes über einen Danielsonschen Umformer gespeist wird.

Literatur: Über diese und ähnliche Schaltungen vgl. Schröder, ETZ 1915, S. 6. — Über Pirani- und Lancashire-Gruppen, EKB 1912, S. 170; 1915, S. 169. — Graphische Ermittlung der Leistung von Pufferbatterien, ETZ 1900, S. 78. — Über Schwungrad-Pufferanlagen mit Scherbius-Regelsatz (Mont-Cenis) EKB 1910, S. 101, 131, 151; 1914, S. 534. — Über andere Puffer-Anordnungen vgl. den in Amerika häufigen Entz-Regulator, Electrician v. 25. 6. 1909 und Woodbridge, Verwendung von Pufferbatterien für die Regelung von Wechselstromnetzen in Verbindung mit Spaltpolumformern, Proceed. A. I. E. E. Juni 1908 und Juli 1909 und ETZ 1909, S. 104.

D. Mechanik der Zugförderung.

(789) Die Leistung des Kraftwerkes ist durch Überlagerung des Energieverbrauches der gleichzeitig in Betrieb befindlichen Züge gegeben. Dabei ist der Verbrauch für die reine Zugförderung zu vermehren um den Verbrauch für Nebenleistungen wie Licht, Heizung, Pumpe, Steuerstrom usw. (793).

Die für reine Zugförderung benötigte Leistung muß an Hand des Streckenprofils, der Zuggewichte und des Fahrplanes berechnet werden. Für Straßenbahnen

kann im allgemeinen der in (790) angedeutete Rechnungsgang verwendet werden. Für Vollbahnbetrieb muß die Rechnung aber um so genauer durchgeführt werden, je schwerer der Betrieb ist, d. h. je größer die Zuggewichte sind und je geringer die Zugdichte ist. Weil im Vollbahnbetrieb der Verkehr genau geregelt ist, ist eine genaue Berechnung der Bewegungsverhältnisse der Züge, und zwar mit Hilfe eigens aufgestellter Fahrdiagramme, auch in allen Fällen möglich.

Der auf diese Weise ermittelte Gesamtverbrauch ergibt die Leistung am Stromabnehmer und ist noch durch den Wirkungsgrad der Übertragung, der Linie und der Unterwerke zu teilen.

(790) Zugkraft und Zugwiderstand. Die für die Beförderung eines Zuges notwendige *Zugkraft* beträgt für ein Zuggewicht von G t: für die Beschleunigungszeit mit einer mittleren Beschleunigung von b m/s²

$$G(w+s+100b) \text{ kg}^*$$

und für die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit

$$G(w+s) \text{ kg}^*$$

Hierin bedeutet w den gesamten Zugwiderstand für 1 t und s die Steigung in ‰.

Die größte Anzugskraft ist entweder durch die größte Beschleunigung in der Ebene gegeben oder durch die größte Steigung, auf welcher der Zug noch mit der geringsten Beschleunigung anfahren können muß.

Der *Zugwiderstand* setzt sich im allgemeinen aus dem Reibungswiderstand und dem Luftwiderstand sowie dem Krümmungswiderstand der Kurven zusammen. Für *Straßenbahnen* kann der Reibungswiderstand im Mittel zu $6 \text{ kg}^*/\text{t}$ angenommen werden, wechselt jedoch so stark mit dem Zustand des Gleises, daß von einer genauen Berechnung des kleineren zusätzlichen und wegen der wechselnden Geschwindigkeit der Straßenbahnen schwer zu bestimmenden Luftwiderstandes Abstand genommen werden kann. Man setzt am besten Reibung und Luftwiderstand zusammen = rd. $8 \text{ kg}^*/\text{t}$.

Steigungen bis 6‰ können im Straßenbahnbetrieb vernachlässigt werden, weil die bei der Bergfahrt mehr aufgewendete Energie bei der Talfahrt wiedergewonnen wird.

Für *Vollbahnen* kann der Zugwiderstand für überschlägige Rechnungen nach der reichlichen Formel

$$w = 2,5 + 0,0005 v^2$$

eingesetzt werden. Darin bedeutet das zweite Glied den mit der Geschwindigkeit v [in km/h] quadratisch wachsenden Luftwiderstand.

Für genaue Berechnungen und für die Aufstellung der Fahrdiagramme ist die auf Grund der Schnellbahnversuche erhaltene Formel zu verwenden:

$$W = 2,5 G + \{0,00015 G + 0,00813 (n-1) + 0,0065 F\} v^2.$$

Darin ist W der Zugwiderstand in kg^* für G t Zuggewicht, $(n-1)$ die Zahl der angehängten Wagen oder n die volle Wagenzahl, F die Stirnfläche des ersten Wagens in m^2 , v die Geschwindigkeit in km/h.

Sehr gute Übereinstimmung mit den wirklichen Verhältnissen geben die Widerstandsformeln von *Strahl*:

$$\text{Für Lokomotiven: } W = 2,5 L + aT + 0,6 F \left(\frac{v}{10}\right)^2.$$

L = Laufgewicht, T = Triebgewicht der Lokomotive in t, F = rd. 10 m^2 .

$$a = 6 \text{ für 2 Achsen,}$$

$$7,5 \text{ für 3 Achsen,}$$

$$8,4 \text{ für 4 Achsen,}$$

$$9,3 \text{ für 5 Achsen.}$$

$$\text{Für den angehängten Zug: } W = 2,5 + \frac{1}{c} \left(\frac{v}{10}\right)^2.$$

$c = 44$	für D-Züge,
33	für Eilzüge,
30	für Personenzüge,
40	für schwere Güterzüge,
20	für gewöhnliche Güterzüge,
25	für Eilgüterzüge.

v. G l i n s k i, Bewegungswiderstände, Glasers Ann. Bd. 83, S. 48, 53, 91.

Nach S a n z i n (Verkehrstechnik, 1921, S. 450) beträgt der Zugwiderstand von Güterzügen mit 80 bis 120 Achsen und 600 bis 800 t Gewicht:

bei 10 km/h	2,3 kg/t,
bei 20 km/h	2,5 kg/t,
bei 30 km/h	3 kg/t,
bei 40 km/h	3,6 kg/t.

Der Bewegungswiderstand elektr. Lokomotiven mit Parallelkurbelantrieb beträgt zu Beginn des Anfahrens nach v. G l i n s k i (Z. d. V.D.I.v.21. 12. 1912) im Mittel 30 kg*/t für eingelaufene und 40 kg*/t für nicht eingelaufene Fahrzeuge.

Der Bahnwiderstand in Tunnels kann gegen die Ventilationsrichtung bedeutend höher sein (Simplon 11,2 kg*/t bei 70 km/h).

In Kurven ist zum Zugwiderstand noch der K r ü m m u n g s w i d e r s t a n d hinzuzuzählen. Er beträgt für Vollspur $650/(r-55)$ kg*/t, wenn der Krümmungshalbmesser $r > 300$ und $500/(r-30)$ wenn $r < 300 \cdot r$ in m.

(791) Anfahrbeschleunigung, Bremsverzögerung. Für die Festsetzung der notwendigen höchsten Zugkraft ist neben dem Steigungs- und Zugwiderstand die angenommene höchste Anfahrbeschleunigung maßgebend (790).

Stadtbahnen weisen A n f a h r b e s c h l e u n i g e n von 0,2—0,7 m/s² auf. Die auf die ganze Anfahrzeit bezogene mittlere Beschleunigung beträgt selten mehr als 0,5 m/s². Für Vollbahnen mit großen Stationsabständen können Anfahrbeschleunigungen von 0,1—0,2 m/s² gewählt werden. Für 1 t Zuggewicht ist etwa 1 kg Zugkraft für jedes cm/s²-erforderlich. Für Beschleunigungsbetriebe kann mit 50—70 kg/t höchster Zugkraft in der Ebene gerechnet werden.

Die Beschleunigung ist jedoch, sofern genügende Zugkraft vorhanden ist, durch das A d h ä s i o n s g e w i c h t der angetriebenen Achsen begrenzt. Die größte mögliche Zugkraft beträgt im Mittel $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{6}$ des Adhäsionsgewichtes, steigt bei Verwendung kräftiger Sandstreuer bis auf $\frac{1}{3}$ und sinkt bei schlechtem Gleiszustand (feuchtem Wetter und Reifbildung) bis auf $\frac{1}{13}$. (B r e c h t, Ausnützung des Adhäsionsgewichtes, EKB 1914, S. 277.)

In Spiez-Frutigen wurden die nachstehenden Höchstwerte der Reibungsziffer bei der Anfahrt auf trockenen Schienen festgestellt:

bis 25 km/h	0,2,
bis 30 km/h	0,17,
bis 60 km/h	0,145,
bis 72 km/h	0,136,
bis 80 km/h	0,112,
bis 100 km/h	0,10.

Bei der Wahl der B r e m s v e r z ö g e r u n g ist in ähnlicher Weise darauf zu achten, daß die Zahl der abgebremsten Achsen für die Bremskraft ausreicht. Die zulässige Verzögerung ist abhängig von der Wirkung auf die Fahrgäste und auf den Wagenkörper und kann im Mittel zu 0,5 m/s², für Stadtbahnen zu 0,7 bis 0,8 m/s² angenommen werden (Luftdruckbremsen). Verzögerungen von 1 m/s² sollen nicht überschritten werden. Im Notfall sind 2 m/s² zulässig. Für leichten Straßenbahnbetrieb und mäßige Geschwindigkeit genügt die Handbremse, besonders wenn Gegenstrom- oder Kurzschlußbremse als Gefahrbremse vorgesehen ist. Vergleichende Bremsversuche und Betriebskostenberechnungen mit Luftdruckbremsen, elektrischen Kurzschluß- und Solenoidbremsen usw. EKB 1909, S. 111.

(792) Beschleunigung der umlaufenden Massen. Für die Masse des Zuges ist nicht der wahre Betrag, sondern ein für überschlägige Rechnungen um etwa 7 bis 12 % erhöhter Betrag einzusetzen, um die Beschleunigung der umlaufenden Massen zu berücksichtigen.

Man drückt am besten den Schwungradeneffekt $\frac{1}{2}m\omega^2\rho^2$, wenn m die Masse der umlaufenden Körper, ω die Winkelgeschwindigkeit und ρ den Trägheitsradius bezeichnet, als einen Teil der lebendigen Kraft des Zuges aus, indem man sich dessen Masse M um ΔM erhöht denkt und die Winkelgeschwindigkeit ω durch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs und das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} des Vorgeleges ausdrückt. Dann ist:

$$v = \omega r \text{ bzw. } \omega = \frac{v}{r}, \quad r \text{ ist der Laufradhalbmesser}$$

und

$$\frac{m}{2} \omega^2 \rho^2 = \frac{m}{2} v^2 \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \text{ bzw. } \frac{m}{2} v^2 \left(\frac{\rho \cdot \ddot{u}}{r}\right)^2.$$

Die gesamte lebendige Kraft des Wagens ist also

$$M \frac{v^2}{2} + \frac{m v^2}{2} \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \text{ oder } M \frac{v^2}{2} \left\{ 1 + \frac{m}{M} \cdot \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \right\}$$

oder der Betrag
$$\Delta M = \frac{m}{M} \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \text{ bzw. } \frac{m}{M} \left(\frac{\rho \cdot \ddot{u}}{r}\right)^2.$$

Für elektrische Vollbahnlokomotiven mit Parallelkurbelantrieb beträgt der Massenzuschlag 40 bis 60 %, vgl. M a r k t, Rollwiderstand und Massenwirkung usw. E & M 1921, S. 209.

(793) Arbeitsbedarf für Nebenleistungen. Zugheizung. Der Arbeitsverbrauch beträgt rd. 0,2 bis 0,3 kW für 1° C Temperaturunterschied für Aufrechterhaltung der Innentemperatur eines Drehgestellwagens.

Die erste Erwärmung erfordert etwa

$$\left(0,3 + \frac{40}{t}\right) \mathfrak{J} \text{ Kilowatt.}$$

t = Erwärmungszeit in Minuten, \mathfrak{J} = die zu erreichende Temperaturerhöhung in °C.

Man kann auch mit etwa 200 W/m³ für höchstens -15° C Außentemperatur rechnen. Für den Führerstand einer Lokomotive rechnet man am besten etwa 2 kW, für einen normalen Straßenbahnwagen etwa 3 kW. H r u s c h k a rechnet für österreichische Verhältnisse 110 W/m³ am Stromabnehmer (EKB 1910, S. 599).

Zugbeleuchtung. Für jedes t km personenbefördernder Züge können nach H r u s c h k a etwa 0,34 Wh an den Stromabnehmern gesetzt werden.

Steuerung. Für mittlere Verhältnisse sind für die Zugeinheit etwa 2 kW dauernd erforderlich. Für Strecken mit Steigungen unter 20‰ und für mittlere Geschwindigkeiten (50 km/h) können etwa 0,2 Wh/t km gesetzt werden.

Bremmung. Für Schnellzüge etwa 0,2 Wh/t km Luftpumpenverbrauch.
Für Personenzüge etwa 0,4 „ „
Für Güterzüge etwa 0,32 „ „ (vgl. 794).

(794) Stromverbrauch, Fahrdiagramme. Der Stromverbrauch für Zugförderung ist gleich dem Verbrauch für die Fahrt auf den einzelnen Strecken mit konstanter Geschwindigkeit, vermehrt um die Bremsarbeit. Dagegen ist die für die Beschleunigung notwendige Energie nicht mit zu berechnen, weil ein Teil davon beim Auslaufen nützlich wiedergewonnen wird, während der Rest eben in Bremsarbeit vernichtet wird.

$$\text{Verbrauch für 1 t km} = \frac{\text{mittlere Zugkraft für die Tonne} \times 9,81}{3600 \times \eta} \text{ kWh, } \eta \text{ ist}$$

der Wirkungsgrad der Anlage.

Die Bremsarbeit ist gleich der gesamten lebendigen Kraft $\frac{1}{2} m v^2$ des Zuges beim Bremsbeginn. Bei Straßenbahnen liegt die Zahl der Haltestellen zwischen 2 und 5 auf 1 km. Der Bremsbeginn erfolgt bei Straßenbahnen bei annähernd 75 % der höchsten Geschwindigkeit. Für Schnellzüge kann man eine Bremsung auf 25 km, für Personenzüge auf 5 bis 10 km bei $\frac{2}{3}$ Geschwindigkeit, für Güterzüge eine Bremsung auf 4 km bei halber Geschwindigkeit setzen.

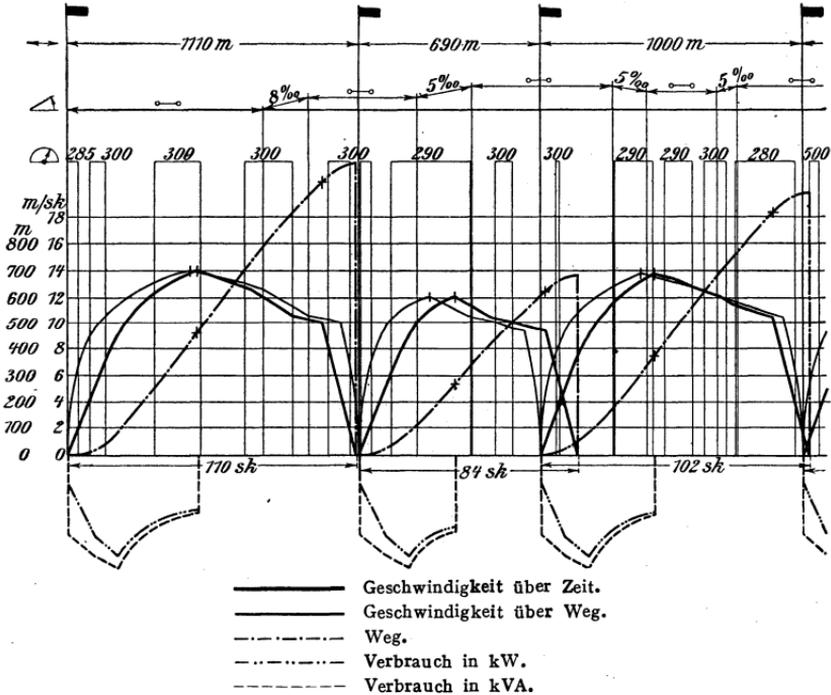


Abb. 469. Fahrtdiagramm.

Die mittlere Leistung der Motoren kann in überschlägiger Weise aus der mittleren Zugkraft Z_m in kg und der mittleren Fahrgeschwindigkeit in km/h berechnet werden:

$$N_m = \frac{Z_m \cdot v_m}{370} \text{ Kilowatt.}$$

Für Anfahrten ist ein Zuschlag zu machen, der von der Zahl der Haltestellen und der mittleren Stationsentfernung abhängig ist und im Mittel etwa 25 % beträgt. Die der Leistung nach bemessenen Motoren sind noch auf ihre höchste Zugkraft nachzuprüfen.

Der Verbrauch für vollbahnartige Betriebe wird an Hand der Fahrtdiagramme berechnet. Dazu müssen die Kennlinien der verwendeten Motoren, insbesondere aber die Geschwindigkeits-Zugkraftkurve bekannt sein oder ange-

nommen werden. Mit ihrer Hilfe können die Zeit-Geschwindigkeit, die Zeit-Weg- und die Weg-Geschwindigkeitskurve, ferner die Zeitleistungskurven für jeden Zug und für jede Strecke aufgestellt werden.

Für Voruntersuchungen genügt jedoch die Aufstellung eines sogenannten mittleren Fahrdiagrammes. Man erhält dieses durch die Annahme eines mittleren Stationsabstandes mit mittleren Steigungsverhältnissen und einer dem Fahrplan entsprechenden mittleren Geschwindigkeit.

Im Fahrdiagramm unterscheidet man im allgemeinen die Beschleunigungszeit und die Bremszeit (vgl. die Fahrdiagramme, Abb. 469).

Bei der Aufstellung der Fahrdiagramme geht man unter Annahme einer feststehenden Art des Anfahrens von der Geschwindigkeits-Zugkraftkurve des Motors aus und trägt für die jeweiligen Geschwindigkeiten die Fahrtwiderstände ein. Dann ergibt der Unterschied zwischen Zugkraft und Fahrtwiderstand bereits den für die Beschleunigung zur Verfügung stehenden Zugkraftüberschuß. Für die Auslaufzeit ergeben sich in ähnlicher Weise Zeit und Weg aus der durch den Fahrtwiderstand bewirkten Verzögerung, während die Bremsverzögerung angenommen werden muß, um Bremszeit und Bremsweg zu berechnen.

Mit Hilfe dieser Gleichungen, welche auch in Form von Kurven dargestellt werden können, kann für jede Geschwindigkeit Zeit und Weg des Wagens berechnet und die Zeit-Wegkurve erhalten werden. Aus den übrigen Kennlinien des Motors können Stromstärke und Spannung, $\cos \varphi$ und Wirkungsgrad entnommen und alle gewünschten Kurven erhalten werden. Durch Planimetrieren der kVA-, kW- und kW-Zeitkurve ergibt sich der gesamte Verbrauch für die Zuförderung während der ganzen Fahrt, während für den Energieverbrauch für Licht, Pumpe, Heizung usw. Zuschläge zu machen sind. Zur bequemen und schnellen Aufstellung der Fahrdiagramme sind eine Reihe graphischer Methoden ausgearbeitet worden (vgl. Hruschka, Ermittlung sämtlicher Zuförderungsgrößen im Bahnbetrieb, EKB v. 14. 1. 1910. Pforr, Zügbewegungen, Oldenbourg, München 1919).

Für die genaue Berechnung des Stromverbrauches genügt jedoch nicht die Aufstellung eines mittleren Fahrdiagrammes. Es sind vielmehr die Fahrdiagramme für die ganze Strecke, und zwar für die Hin- und Rückfahrt getrennt zu berechnen.

(795) Nachrechnung der Motoren wegen der Erwärmung. Im Anschluß an die für einen mittleren Stationsabstand oder für die ganze Strecke aufgestellten Fahrdiagramme ist zu untersuchen, ob der Motor für den gedachten Betrieb ausreicht, und die Erwärmung in zulässigen Grenzen bleibt. Zu diesem Zweck genügt es bei Gleichstrom über der Zeit als Abszisse die zugehörigen I^2 -Werte aufzutragen. Dann ergibt sich aus der planimetrierten Fläche der I^2dt -Kurve und aus der ganzen Fahrzeit T der quadratische Mittelwert der Strombelastung $\sqrt{\Sigma(I^2dt)/T}$, der unterhalb des im Prüffeld festgestellten dauernd zulässigen Wertes liegen muß. Dabei ist darauf zu achten, daß der Dauerlauf des Motors im Prüffeld mit der Dauerstromstärke auch mit jener Spannung und Geschwindigkeit vorgenommen werde, die den mittleren Eisenverlusten im Betriebe entsprechen.

Für Wechselstrom empfiehlt es sich, die Verluste für die ganze Strecke unmittelbar aufzustellen. Dazu kann die Kurve der aufgenommenen Energie im Fahrdiagramm benutzt werden, wenn der Unterschied zwischen ihr und der Kurve der abgegebenen Energie planimetriert und durch die ganze Fahrzeit dividiert wird. Dieser Wert entspricht bereits den vom Motor dauernd abzuführenden Verlusten.

Die Erwärmungsrechnung kann sich auch auf die einzelnen Teile wie Kollektor, Eisen und Kupfer erstrecken. Zu diesem Zwecke sind die Verluste an Hand der Motorkennlinien zu trennen. Für gut gelüftete Motoren, bei denen sich ein Temperaturausgleich in allen Teilen rasch vollzieht, ist eine so weitgehende Nachrechnung überflüssig.

E. Verschiedenartige Bahnen.

Industrie- und Grubenbahnen.

(796) **Verschiebelokomotiven.** Die Vorteile den Dampflokomotiven gegenüber sind die stete Betriebsbereitschaft und die geringeren Betriebskosten. Zur Anwendung gelangen Oberleitungs- und Akkumulatorenlokomotiven. Diese sind jenen nur dann überlegen, wenn ausgedehnte Gleisanlagen mit starkem Verkehr in Frage kommen. Das größere Gewicht der Akkumulatorenlokomotiven ist bei häufigem Anfahren mit großen Zugkräften oft erwünscht. Das Dienstgewicht der Vollspur-Akkumulatorenlokomotiven liegt in der Regel zwischen 20 und 30 t, ihre motorische Leistung zwischen 30 und 80 kW.

Verschiebelokomotive der Preuß. Werkstätten-Insp. Tempelhof, ETZ 1908, S. 627. — Akk.-Lok., ETZ 1912, S. 761. Riep, Oberleitungslok. für Werkbahnen, ETZ 1913, S. 463. — Lok. für Anschlußbahnen, ETZ 1913, S. 501.

(797) **Abraumlokomotiven.** Zur Beförderung des Abraumes wird der Dampfbetrieb der Feuersgefahr und hohen Betriebskosten wegen in steigendem Maße durch elektrischen Betrieb ersetzt. Die Leistung gebräuchlicher zweiachsiger Lokomotiven beträgt bei 600 mm Spur 20—50 kW und bei 900 mm Spur bis 150 kW. Neuerdings gelangen für 900 mm Spur Drehgestelllokomotiven von rd. 45 t mit 4 angetriebenen Achsen und 300 kW Stundenleistung zur Verwendung (ETZ 1910, S. 1135). — Abraumlok. der SSW. ETZ 1913, S. 503. — AEG-Abraumlok. EAG-Mit. 1921, Heft 10.

(798) **Grubenlokomotiven.** Für den elektrischen Betrieb der Grubenbahnen ist die Verwendung von 250 V Gleichstrom und Oberleitung bisher allgemein gebräuchlich gewesen. Der Fahrdraht wird an der Decke befestigt. Die Verwendung höherer Spannungen ist bei der niedrigen Fahrdrahtaufhängung unzulässig und von den Bergbehörden verboten. In neuerer Zeit wurden Grubenbahnen auch mit 150 V Einphasenwechselstrom mit Erfolg betrieben (Zeche Wilhelmine Viktoria der Gew. Hibernia). Der Wechselstrombetrieb ist zu empfehlen, wo lange ausbaufähige Strecken in Frage kommen. Da die Zechen in der Regel große Drehstromkraftwerke besitzen, kann die Bahn an eine Phase des Netzes gehängt und die Aufstellung besonderer Umformer vermieden werden. In letzter Zeit haben auch Akkumulatorenlokomotiven Verbreitung gefunden.

Die Ausrüstung der Lokomotive ist auf das Notwendigste beschränkt und besteht in der Regel aus 2 Zahnradmotoren zu 10 bis 15 kW, Schaltwalze und Widerständen, bzw. Wechselstromtransformator. Spurweite 450 bis 500 mm, Geschwindigkeit 6 bis 10 km/h, Dienstgewicht 5 bis 8 t. Lokomotivförderung im Kohlenbergbau ETZ 1912, S. 1197. — Akkumulatorenlok. EKB 1910, S. 46. — Elektr. Grubenlok.-Förderung im Ruhrbezirk E & M 1921, S. 429. — Neuerungen an Grubenlok. ETZ 1922, S. 1266.

Gleislose Bahnen.

(799) Das unter dem Namen der gleislosen Bahnen bekannte Betriebssystem kann vorteilhaft nur für Straßen in Frage kommen, wo der Zustand der Straßen- decke für den Betrieb eines schienenlosen Verkehrsmittels überhaupt geeignet ist, wo aber zugleich die Verkehrsdichte so gering ist, daß die Anlage einer gewöhnlichen Straßen- oder Kleinbahn wirtschaftlich nicht gerechtfertigt wäre. Der „elektrische Omnibus mit direkter Stromzuführung“ durch Oberleitung wird daher besonders für die Vorortlinien großer Städte als die natürliche Fortsetzung der elektrischen Straßenbahnlinien am Platze sein; er wird aus wirtschaftlichen Gründen mit dem Betriebsstrom der Straßenbahn gespeist werden und vom Endpunkt der Straßenbahn noch einige Kilometer weiter ins Land führen, in Gegenden, in denen eine Verlängerung der Straßenbahn nicht mehr wirtschaftlich wäre.

Die bekannten Eigenschaften des Elektromotors und sein großes Anzugsmoment befähigen die elektrischen Omnibusse ohne wesentliche Beeinträchtigung der

Geschwindigkeit zur Mitnahme von Anhängewagen. Diese für wechselnden Verkehr wichtige Anpassung ist mit Benzinmotoren nicht erreichbar.

Die Anlagekosten sind für einen Motorwagenbetrieb mit Oberleitung allerdings höher als bei Verwendung der unabhängigen Benzinwagen. Die elektrischen Fahrzeuge sind zwar billiger, es kommen aber die Kosten für die Oberleitung hinzu. Dieser Kapitalaufwand fällt aber nur bei sehr langen Linien ins Gewicht und auch diese können noch wirtschaftlich sein, wenn durch Güterverkehr gute Ausnützung möglich ist.

Die Oberleitung wird wie bei gewöhnlichen Straßenbahnen (aber doppelte polig), mit Profildrähten ausgeführt.

Während die meisten Systeme z. B. Schiemann als Stromabnehmer Kontaktstangen verwenden, erfolgt die Stromzufuhr im Mercedes-Stollischen System durch ein auf der Oberleitung laufendes vierrädriges Wägelchen, welches mit dem Fahrzeug durch ein biegsames, sich selbst spannendes Seil verbunden ist.

Zur Fortbewegung einer Tonne Last auf Rädern sind auf schienenlosen Wegen folgende Zugkräfte erforderlich:

auf Asphalt		20 kg*
„ Steinpflaster	je nach dem Zustand	20 bis 35 „
„ Schotterstraße	„ „ „ „	25 „ 45 „
„ Landwegen	„ „ „ „	50 „ 100 „

Literatur: El. Kraftbetr. u. Bahnen 1907, S. 311. — Archiv f. Post u. Telegraphie 1911, S. 593. — Gleislose elektr. Bahnen in England, ETZ 1911, S. 249. — Gleislose Bahnen, Bauart Schiemann, ETZ 1911, S. 351. — Heller, Gleislose elektr. Bahnen, Z. d. V. D. I. 1910, S. 703. — Mercedes-Stoll, Automobillinien der Daimler Fabrik Wr.-Neustadt. E & M 1909, S. 1155. — Wirtschaftlichkeit gleisloser Bahnen, E & M 1910, S. 754. — Railless Traction, Electrician v. 8. 7. 10. — Elektr. Omnibusbetrieb in Bremen. ETZ 1911, S. 177. — Schiemann, ETZ 1913, S. 479.

Fahrzeuge mit Speicherbatterien oder mit Verbrennungsmotoren und elektrischer Kraftübertragung.

(800) Triebwagen. Der Triebwagenbetrieb bietet wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem Betrieb mittels Dampflokomotiven gewöhnlicher Bauart in Fällen, in denen kleinere Zugeinheiten von 60 bis 100 Personen mit mittlerer (rd. 30 km/h) Reisegeschwindigkeit zu befördern sind. Insbesondere sind Triebwagen auf Hauptstrecken von Nutzen, um den Orten, die zwischen den Haltepunkten der Schnellzüge liegen, eine bequemere Verbindung mit diesen zu verschaffen oder um in der Nähe großer Städte einen gewissen Vorortverkehr zu ermöglichen.

Neben den Dampftriebwagen haben bisher Akkumulatorenwagen und Triebwagen mit Verbrennungsmotoren Bedeutung erlangt.

(801) Die Akkumulatorentriebwagen der preussischen Staatsbahnen besitzen 168 bis 180 Zellen für 310 bis 350 V mittlere Entladenspannung und weisen bei 50 bis 60 km/h höchster Geschwindigkeit zwischen 100 und 180 km schwankende Fahrbereiche auf. Die motorische Leistung beträgt im Mittel rd. 2,3 kW/t Wagen-gewicht, die mittlere Kapazität der Batterie 0,8 kWh für 1 kW Motorleistung, das Gewicht der Batterie 0,15 kg für 1 Wh Kapazität, der mittlere Arbeitsverbrauch 15 Wh/t km, ausschließlich 25 bis 30% Batterieverluste.

Der Akkumulator-Doppelwagen (EKB 1909, S. 265) faßt 100 Personen, wiegt 54 t, 2 Motoren zu 62 kW Stundenleistung, 0,75 kWh/Wagen-km.

Dreiaxelige Triebwagen (EKB 1909, S. 341) 33,2 t unbesetzt, Batterie 10 t, elektrische Ausrüstung 3,5 t, mech. Teil 19,7 t, 60 Personen, 2 Hauptstrommotoren zu 38 kW Stundenleistung.

Drehgestelltriebwagen (EKB 1909, S. 348) 59 t unbesetzt, Batterie 16 t, elektrische Ausrüstung 9 t, mech. Teil 34 t, 100 Personen, 4 Nebenschlußmotoren zu 38 kW Stundenleistung.

Speichertriebwagenzug der österr. B. B., E & M 1921, S. 319.

(802) Triebwagen mit Verbrennungsmotoren sind gegenüber den Akkumulatortriebwagen von der Ladestation unabhängig und können daher größere Strecken durchlaufen.

Im benzolelektrischen Triebwagen der preußischen Staatsbahnen (EKB 1909, S. 241) ist der Verbrennungsmotor in einem besonderen, vom Wagenkasten unabhängigen Gestell gelagert, um die vom Benzolmotor hervorgerufenen mech. Schwingungen vom Wagenkasten fern zu halten. Der Benzolmotor (6 Zylinder, 66 kW Dauerleistung, 700 U/min, 1600 kg) ist durch eine elastische Kupplung mit der Dynamo (38 kW Dauerleistung, 80 kW Stundenleistung, 0 bis 650 V), die den Strom für die Gleichstromwagen-Antriebsmotoren (2 Motoren zu 40 kW Stundenleistung, 575 V) liefert, gekuppelt. Erregung der Dynamo durch besondere Erregermaschine (25 kW, 70 V). Die Antriebsmotoren werden durch Änderung der Erregung der Dynamo geregelt. Höchste Wangengeschwindigkeit 50 km/h, Benzolvorrat 200 l für 400 km. Wagendienstgewicht 37,9 t, 89 Personen, 425 kg für den Platz oder 1070 kg auf 1 m² der für Reisende und Gepäck verfügbaren Grundfläche. Für Vorausberechnung können 12 g Benzol für 1 tkm in wagrechter Bahn angenommen werden.

L i t e r a t u r: Triebwagenverkehr auf d. preuß. Staatsb., EKB 1909, S. 261. — Triebwagen d. preuß. Staatsb., EKB 1913, S. 249. — Triebwagen auf amerikan. Eisenbahnen, EKB 1914, S. 21. — Benzolelekt. Triebwagen d. preuß. Staatsb., EKB 1909, S. 241; 1910, S. 265; 1912, S. 621. — AEG Benzolelekt. Triebwag. EKB 1914, S. 296. — 96 PS-Öl-Triebwagen. EKB 1917, S. 145. — Dieselelekt. Triebw. d. Sächs. Staatsb., EKB 1915, S. 301. — Dieselelekt. Fahrzeuge d. Schwed. Staatsb. E & M 1921, S. 565, Benzoltriebwagen, AEG-Mit. 1921, S. 247.

(803) Elektromobile. Die Motoren werden als Hauptstrommotoren ausgeführt und zwar entweder für Übertragung mit Zahnradvorgelege, oder für unmittelbaren Antrieb als Radnaben- bzw. Innenpolmotoren.

Die Motoren mit Zahnradvorgelege sind für leichte Fahrzeuge (Droschken) bestimmt. Die Kraft wird in der Regel mittels Zahnräder auf die Laufräder der Hinterachse übertragen, der Motor wird auf der hinteren Laufachse federnd oder starr aufgehängt. Die Motoren sollen wie Straßenbahnmotoren vollkommen gekapselt und durch Klappen leicht zu revidieren sein.

Bei den Radnabenmotoren wird das Drehmoment unmittelbar auf die Laufräder übertragen. Diese Motoren sind sowohl für leichtere Fahrzeuge als auch für Lastfuhrwerke geeignet.

E l e k t r o l a s t w a g e n verwenden am häufigsten zwei 4- oder 6polige Hauptstrommotoren von je 5 bis 8,5 kW Dauerleistung, die die hintere Achse durch Zahnräder antreiben. Auch der einmotorige Antrieb der Hinterräder mittels Vorgelege und Kette hat sich bewährt. Die Motoren können vorübergehend aufs Doppelte überlastet werden.

Die Fahrschalter werden in der Regel als Schaltwalzen mit Kontaktfingern ausgeführt und besitzen sehr oft Einrichtungen für Kurzschlußbremsung, sowie zum sofortigen Ausschalten des Motorstromes durch eine besondere im Fahrschalter enthaltene Unterbrecherwalze, die mit der Fußbremse in Verbindung gebracht werden kann. Außerdem befindet sich in der Regel noch ein Schaltkasten mit allen erforderlichen Nebenapparaten sowie die Meßinstrumente auf dem Wagen.

E i n h e i t s w a g e n, **E l e k t r i s c h e s P f e r d.** Gewicht rd. 700 bis 850 kg.—Nutzlast 2500 kg, Fahrbereich 50—60 km, Geschwindigkeit 10—20 km/h. Batterie 40 Zellen — 80 V — 250 bis 30 Ah.

V e r s c h i e b e s c h l e p p e r, 2 Motoren je 2,3 kW, Schneckengetriebe 1 : 16,5, Fahrbereich 7 km, 40 Zellen rund 150 Ah, Kontrollen mit 4 Stufen. — 3—6 km/h. Elektrotechn. Anzeiger 1922, S. 1264. — Akkum. Fahrzeuge VDI 1922, S. 109, Elektrokarren AEG-Mit. 1922, Heft 2. — Elektromobile ETZ 1908, S. 1238, EKB 1909, S. 531.

Achter Abschnitt.

Elektrische Beleuchtung.

Das Licht und seine Messung.

Physiologisches.

(804) **Auge und Sehen.** Der menschliche Körper besitzt ein Organ, das durch aufgestrahlte Energie bestimmter Wellenlänge, nämlich von etwa 0,4 bis 0,75 μ in besonderer Weise physiologisch gereizt wird und diese Reize zur Empfindung in das Gehirn weiterleitet. Dieses Organ, das Auge, ist einer photographischen Camera vergleichbar; es besteht aus der Dunkelkammer, die nach vorn durch Linse und Blende, die Pupille, nach hinten durch die aufnehmende Platte, die Netzhaut, abgeschlossen ist, von der aus ein Nervenstrang zum Gehirn führt. Die Netzhaut ist mit sogenannten Stäbchen und Zapfen bekleidet, die ähnlich wie die Fäden im Samtstoff senkrecht zur Flächenrichtung stehen. Die Stäbchen, die sich nicht in der Netzhautgrube befinden, sind die empfindlicheren Organe, vermögen aber nur Hell und Dunkel, dagegen keine Farben zu unterscheiden. Die weniger empfindlichen Zapfen sind farbenempfindend; sie befinden sich gehäuft in der Netzhautgrube und nehmen nach der Peripherie hin an Dichte schnell ab.

Auf der Netzhaut werden genau wie auf der photographischen Platte die Gegenstände der Umwelt Punkt für Punkt abgebildet. Die Linse stellt ihre Krümmung unwillkürlich auf Schärfe des Bildes ein (Akkommodation). Bei schwachen Reizen treten nur die Stäbchen, bei stärkeren auch die Zapfen in Tätigkeit; bei weiterer Zunahme des Reizes arbeiten nur noch die Zapfen. Das Auge sucht sich von selbst der Größe des Reizes anzupassen, insbesondere durch größere oder kleinere Öffnung der Pupille, aber auch durch gewisse, noch nicht abschließend erforschte Änderungen auf der Netzhaut, die vor allen Dingen die Überleitung der Seh-tätigkeit von den Stäbchen auf die Zapfen betreffen (Adaptation). Ein hell adaptiertes Auge adaptiert auf dunkel nur sehr langsam, es erreicht seine höchste Empfindlichkeit erst nach einer Viertel- bis einer ganzen Stunde; die umgekehrte Adaptation vollzieht sich schnell, nämlich in Sekunden, allenfalls in Minuten. Ein im Dunkel befindliches Auge adaptiert auf hell, wenn die Netzhaut an einem Punkte stark gereizt wird; es verliert dann die Fähigkeit, die schwächeren Reize an den anderen Stellen zu empfinden (Blendung).

Zum Wahrnehmen und Erkennen ist Voraussetzung, daß die Reize auf der Netzhaut an verschiedenen Stellen von verschiedener Stärke oder verschiedener Art (Farbe) sind, daß also Kontraste vorhanden sind. Die Stärke bestimmt die Empfindung hell und dunkel, die Art des Reizes, nämlich der Reiz durch verschiedene Wellenlängen die Empfindung der Farbe. Die Kontraste in der Stärke des Reizes sind für das Wahrnehmen und Erkennen im allgemeinen von erheblicher größerer Bedeutung als die Farbenkontraste.

Photometrische Grundlagen.

(805) Photometrische Grundgrößen. Als Lichtmenge (Q) wird die von einem Körper in Form von Licht abgestrahlte Arbeit (Lichtabgabe) oder die von einem Körper in Form von Licht aufgenommene Arbeit (Lichtaufnahme) bezeichnet. Die zugehörige Leistung, das Verhältnis von Lichtmenge zur Zeitdauer des Vorganges, wird Lichtstrom (Φ) genannt.

Geht der Lichtstrom von einem Punkte aus und bildet man den Quotienten aus der Stärke dieses Lichtstroms und dem Raumwinkel, den er durchströmt, so wird diese Raumwinkel-Lichtstromdichte Lichtstärke (J) genannt. Auch ausgedehnte Leuchtkörper können, wenn sie sich in genügender Entfernung befinden, als punktförmige Lichtquellen angesehen und dementsprechend auf ihre Lichtstärken photometriert werden. Fällt der Lichtstrom auf eine Fläche und bildet man den Quotienten aus Lichtstrom und bestrahlter Fläche, so heißt diese Flächen-Lichtstromdichte Beleuchtungsstärke (E).

Bei einer leuchtenden Fläche, die man als punktförmig ansehen kann, wird das Verhältnis der Lichtstärke in einer bestimmten Richtung zu der in dieser Richtung gesehenen (auf der Netzhaut abgebildeten) Fläche Leuchtdichte (e) genannt; der ältere Name ist Flächenhelle.

Die Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut heißt, als physiologischer Reiz empfunden, Helligkeit.

Eine Zusammenstellung dieser Größen nebst ihren Zeichen und den Namen und Zeichen für ihre Einheiten gibt (10), S. 15.

(806) Die Lichtstärkeinheit. Für die Photometrie ist die Lichtstärke die wichtigste Grundgröße, ihre Einheit die wichtigste photometrische Einheit. Sie wird dargestellt durch eine von v. Hefner-Alteneck angegebene Lampe und folgendermaßen definiert:

Die Einheit der Lichtstärke liefert die frei, in reiner und ruhiger Luft brennende Flamme, welche sich aus dem horizontalen Querschnitt eines massiven, mit Amylacetat gesättigten Dochtes erhebt, und zwar in ihrer horizontalen Lichtstärke. Der Docht erfüllt vollständig ein kreisrundes Neusilberöhrchen, dessen lichte Weite 8 mm, dessen äußerer Durchmesser 8,3 mm beträgt, und welches eine freistehende Länge von 25 mm besitzt. Die Höhe der Flamme soll, vom Rande der Röhre bis zur Spitze gemessen, 40 mm betragen. Die Messungen sollen erst 10 Minuten nach der Entzündung der Flamme beginnen.

Die Einheit heißt Kerze oder, wo sie mit anderen, früher oder anderswo üblichen Einheiten verwechselt werden könnte, Hefnerkerze, K. Über den Einfluß, den die Abweichungen von den angegebenen Zahlen ausüben, hat Liebhenthal genaue Untersuchungen angestellt und in seinem Buche „Praktische Photometrie“ (Braunschweig 1907, S. 115) veröffentlicht. Vorschriftsmäßig ausgeführte Lampen werden von der Phys.-Techn. Reichsanstalt beglaubigt.

Die Vereinigten Staaten, Frankreich und England haben sich im Jahre 1909 auf eine Lichtstärkeinheit geeinigt, die um 11% größer ist als die Hefnerkerze; sie hat den Namen Standardkerze erhalten, wird aber häufig unrichtigerweise Internationale Kerze genannt. Durch diese Festsetzung sind die älteren Einheiten jener Länder, die Platineinheit von Violle (Lichtstärke, die von einem Quadratcentimeter geschmolzenen Platins im Augenblick des Erstarrens in senkrechter Richtung ausgestrahlt wird) und deren 20. Teil (bougie décimale), die französische Carcellinheit (horizontale Lichtstärke einer von Carcell konstruierten Öllampe), die Lichtstärke der Harcourtschen Pentanlampe und die englische Normalkerze (London spermaceti candle) außer Kraft gesetzt; der deutschen Hefnerkerze ging die deutsche Vereinskerze, eine Paraffinkerze von 20 mm Durchmesser und 50 mm Flammenhöhe voraus.

(807) Vergleich der wichtigsten Einheiten. Die in der Literatur gebräuchlichsten Einheiten der Lichtstärke, Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte sind in den folgenden Tafeln zusammengestellt. Über die Einheit 1 Lambert siehe (810).

Vergleich der Lichtstärke-Einheiten.

	HK	Standard-candle	Carcel
Hefnerkerze	1	0,9	0,093
Standard candle	1,11	1	0,1035
Carcel	10,75	9,65	1

Vergleich der Beleuchtungsstärke-Einheiten.

	Hefner-Lux	Standard-Lux	Candlefoot (Footcandle)	Carcel-mètre
Hefner-Lux	1	0,9	0,834	0,093
Standard-Lux	1,11	1	0,0926	0,1035
Candlefoot	11,98	10,79	1	1,12
Carcelmètre	10,75	9,65	0,894	1

Vergleich der Leuchtdichte-Einheiten.

	HK/cm ²	Hefner-Lambert	Standard-Lambert	Candle/inch ²
HK/cm ²	1	3,14	2,84	5,81
Hefner-Lambert	0,318	1	0,9	1,85
Standard-Lambert	0,353	1,11	1	2,054
Candle/sq. inch	0,172	0,541	0,487	1

(808) Einheitslampe, Vergleichslampe, Normallampe, Zwischenlichtquelle. Die die Lichtstärkeeinheit verwirklichende Lampe, in Deutschland also die beschriebene Hefnerlampe, heißt Einheitslampe. Mit ihr sind also die Lichtstärken der zu photometrierenden Lampen messend zu vergleichen. Die Einheitslampe zeigt bei der Messung verschiedene Nachteile: die Flamme ist leicht unruhig; Luftdruck, Wasserdampf- und Kohlensäuregehalt der Verbrennungsluft müssen sorgfältig beobachtet werden; die Lichtfarbe weicht von der zu untersuchenden Lampe oft erheblich ab, und die Einheit ist im Vergleich zu der Lichtstärke, die gemessen werden soll, meist sehr klein. Man stellt sich deshalb am besten einen Satz von anderen „Vergleichslampen“ her, und zwar verwendet man dazu neuerdings meistens elektrische Metallfadenlampen, z. B. von 1, 5, 10, 20, 30, 50 HK. Solche Lampen, besonders dann, wenn sie von der PTR geeicht sind, heißen Normallampen. Insofern sie zwischen der zu untersuchenden und der Einheitslampe stehen, nennt man sie Zwischenlichtquellen. Als solche kann man aber auch irgendwelche Lampen, z. B. ruhig brennende Petroleumlampen oder auch Gaslampen verwenden. Die von der PTR. geeichten Lampen haben vor der Eichung schon etwa 100 Stunden gebrannt, also eine gewisse Alterung durchgemacht; sie brennen mit einer Spannung, die unterhalb der normalen liegt. Durch diese beiden Umstände ist eine Gewähr für lange Konstanz gegeben.

(809) Grundtatsachen und Grundgesetze. a) Im homogenen Medium pflanzt sich das Licht gradlinig fort. Das Medium kann eine schwächende Wirkung ausüben, indem es das Licht teilweise absorbiert. In der Luft spielt diese Absorption erst bei sehr großen Entfernungen, wie sie bei Scheinwerferphotometrierungen vorkommen, eine Rolle. Aus der gradlinigen Fortpflanzung folgen die Gesetze b bis f.

b) In einem von parallelen Lichtstrahlen durchsetzten Gebiete ist die Beleuchtungsstärke einer parallel zu sich selbst verschobenen Fläche konstant.

c) Für die von einer punktförmigen Lichtquelle gelieferte Beleuchtungsstärke gilt die Beziehung $E = (J/r^2) \cos i$; sie ergibt sich aus der in Abb. 470 enthaltenen Erklärung. Es ist darin $F' = F \cdot \cos i$ und $F' = \omega \cdot r^2$. Die beleuchtete Fläche muß dabei im Vergleich zum Abstand vernachlässigbare lineare Abmessungen haben; sie erscheint als ein beleuchteter Punkt auf einer Ebene. Die Formel $E = (J/r^2) \cos i$ heißt Punktbeleuchtungsformel, die Formel $E = \Phi/F$ Flächenbeleuchtungsformel. Die Tatsache, daß die Beleuchtungsstärke mit dem Quadrate des Abstandes abnimmt, wird das (Lambertsche) Entfernungsgesetz, die Tatsache, daß die Be-

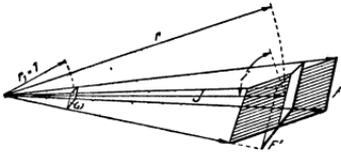
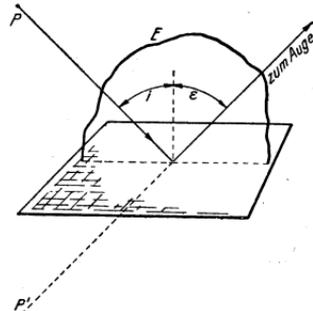
Abb. 470. Zum Cosinus i -Gesetz.

Abb. 471. Reflexionsgesetz.

leuchtungsstärke dem Cosinus des Einfallswinkels proportional ist, das (Lambertsche) Cosinus i -Gesetz genannt.

d) Ist die Leuchtdichte einer Fläche nach allen Richtungen hin dieselbe, also unabhängig von ϵ , so ist

$$J_{\epsilon} = f \cdot \epsilon \cdot \cos \epsilon = J_{\max} \cdot \cos \epsilon.$$

Dieses Gesetz nennt man das (Lambertsche) Cosinus ϵ -Gesetz; es gilt nur für gewisse Körper (810).

e) Trifft ein Lichtstrahl auf eine absolut ebene Fläche, so wird er so reflektiert, daß der reflektierte Strahl in der durch Einfallsstrahl und Einfallslot bestimmten Ebene liegt und der Emissionswinkel ϵ gleich dem Inzidenzwinkel i ist (Abb. 471).

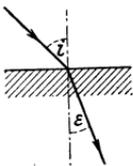


Abb. 472. Brechungsgesetz.

f) Tritt ein Lichtstrahl von einem Medium in ein anderes von anderer optischer Dichte über, so verbleibt der Lichtstrahl in der aus dem Eintrittsstrahl und dem Einfallslot gebildeten Ebene, wird aber in einem optisch dichteren Medium zum Lote hin, in einem optisch dünneren vom Lote weggebrochen; es ist dabei $\sin i : \sin \epsilon = n$, wo n der Brechungsexponent ist (Brechungsgesetz von Snellius (Abb. 472)).

g) Als punktförmig ist jede endliche Lichtquelle aufzufassen, die in einer so großen Entfernung betrachtet oder photometriert wird, daß die Richtungsunterschiede von irgendeinem Punkte der leuchtenden Körperoberfläche bis zum beleuchteten Punkte (dem Auge oder dem Photometerschirm) vernachlässigbar klein sind. Das ist der Fall, wenn von dieser Entfernung ab das quadratische Entfernungsgesetz gilt. Bei mäßigen Ansprüchen an Genauigkeit genügt eine Entfernung, die zehnmal so groß ist als die größte lineare Abmessung des Leuchtkörpers senkrecht zur Strahlungsrichtung.

h) Die Helligkeit, d. h. der von dem gesehenen, also auf der Netzhaut abgebildeten Gegenstände auf dieser hervorgerufene physiologische Reiz ist abgesehen von der Weite der Pupillenöffnung allein abhängig von der Leuchtdichte dieses Gegenstandes (oder seiner Oberflächenteile) und nicht etwa abhängig von der Entfernung des gesehenen Gegenstandes. Von einem als punktförmige Lichtquelle auffaßbaren kleinen Teile des gesehenen Gegenstandes tritt nämlich der durch

die Pupille abgegrenzte Teil des ausgestrahlten Lichtstroms auf die Linse und von ihr konvergierend zur Abbildung auf die Netzhaut; bei gleichbleibender Pupillenöffnung ist dieser Lichtstrom offenbar umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung zwischen Gegenstand und Pupille. Da aber auch die Abbildung derselben Abhängigkeit unterliegt, so bleibt die Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut und deshalb natürlich auch der physiologische Reiz derselbe.

i) Bringt man vor eine gleichmäßig leuchtende Fläche eine Blende, so findet die Strahlung durch die Blendenöffnung so statt, als ob an Stelle der Blendenöffnung eine von ihrem Rande begrenzte Fläche mit der Leuchtdichte der tatsächlichen Fläche vorhanden wäre, allerdings nur bis zu solchen Emissionswinkeln, daß die Blendenöffnung von der dahinter stehenden Fläche vollkommen ausgefüllt erscheint.

(810) Reflexion, Transmission und Absorption. Der auf einen Körper aufströmende Lichtstrom wird entweder reflektiert (zurückgeworfen) oder transmittiert (durchgelassen) oder absorbiert (verschluckt). Bei den Vorgängen unterscheidet man die regelmäßige und die diffuse Reflexion und Transmission. Für die regelmäßige Reflexion (Spiegelung) gilt das Reflexionsgesetz (809,e und Abb. 471). Für die regelmäßige Durchlässigkeit gilt das Snelliussche Brechungsgesetz [s. (809, f) und Abb. 472]. Bei der diffusen Reflexion wird der vom Strahl getroffene Punkt Selbstleuchter und strahlt das Licht nach allen Seiten zurück. Findet die Strah-

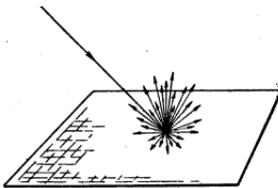


Abb. 473. Diffuse Reflexion.

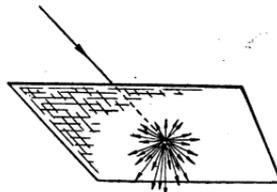


Abb. 474. Diffuse Durchlässigkeit.

lung nach dem Lambertschen Cosinus ϵ -Gesetz statt, so nennt man sie vollkommen diffus und spricht auch von vollkommen diffuser Reflexion (Abb. 473). In gleicher Weise kennt man eine diffuse Durchlässigkeit (Abb. 474).

Auf die Erscheinung der vollkommen diffusen Reflexion oder Transmission gründet sich die in Amerika übliche Einheit des Lambert (807). Im Gegensatz zu der in (805) erklärten Leuchtdichte, die als Leuchtstärkedichte schärfer bezeichnet werden kann, ist das Lambert die Einheit einer Leuchtstromdichte und dann vorhanden, wenn der Quotient aus diffus reflektiertem oder transmittiertem Lichtstrom ausgedrückt in Lumen je Quadratcentimeter gleich eins ist; dabei ist jedoch vorausgesetzt, daß die Reflexion oder Transmission vollkommen diffus ist. Es ist ferner zu berücksichtigen, daß die amerikanische Lichtstärke- also auch Lichtstromeinheit um 11 % größer ist als die deutsche. Wo also das Lambert nicht ausdrücklich als Hefner-Lambert bezeichnet wird, ist ein Lambert vorhanden, wo die Leuchtdichte $\frac{1,11}{\pi} = 0,353 \text{ HK/cm}^2$ ist.

Nennt man das Verhältnis des reflektierten Lichtstromes zum aufgestrahlten das Reflexionsvermögen, wobei man den obigen Ausführungen entsprechend ein regelmäßiges (R) und diffuses (M) Reflexionsvermögen unterscheidet, und führt man ebenso zwei Durchlässigkeitsvermögen, das regelmäßige (D) und das diffuse (T), und schließlich das Absorptionsvermögen (A) ein, so ergibt sich die Gleichung $(R + M) + (D + T) + A = 1$, wodurch ausgedrückt ist, daß es ein Sechstes für den auftreffenden Lichtstrom nicht gibt. Nimmt eines oder einige dieser Vermögen den Wert 0 oder eines den Wert 1 an, so sind dadurch gewisse Eigenschaften des Körpers gekennzeichnet. Ist z. B. $A = 1$, so heißt

der Körper absolut schwarz. Ist $M = 1$, so heißt er weiß. Auch für $D = 1$ und $T = 1$ haben wir es mit einem weißen Körper zu tun; der erste ist klar, der zweite trübe (Milchglas). Ist $M < 1$, so heißt der Körper grau, wenn M für alle Wellenlängen dasselbe ist, dagegen farbig (selektiv reflektierend), wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist. Auch wenn $D < 1$ und für alle Wellenlängen dasselbe ist, ist der Körper grau, und zwar durchsichtig grau (Rauchglas); ähnlich ist der

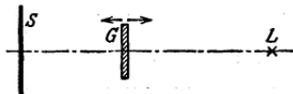


Abb. 475. Lichtschwächende Scheibe zwischen Lichtquelle und Schirm.

durchscheinende graue Körper zu definieren. Durchsichtige Körper (T und A angenähert gleich 0) lassen den dahinter aufgestellten Gegenstand scharf erkennen, durchscheinende dagegen gar nicht, erscheinen vielmehr als Selbstleuchter. Diese Tatsache ist für die Photometrie von großer Bedeutung. Verschiebt man nämlich (Abb. 475) zwischen Lichtquelle L und Auffangschirm S ein Rauchglas G , so hat die Verschiebung auf die Beleuchtungsstärke des Schirmes keinen Einfluß; verschiebt man dagegen ein Milchglas, so ist der Einfluß groß, und die Beleuchtungsstärke auf G , also auch dessen Leuchtdichte auf der dem Schirme S zugekehrten Seite, folgt dem sogenannten quadratischen Entfernungsgesetz.

(811) **Subjektive und objektive Photometrie.** Das Auge, das Organ, für das die Beleuchtung geschaffen ist oder wird, ist doch nicht imstande, eine Lichtstärke oder eine Leuchtdichte ihrem Werte nach einigermaßen richtig zu beurteilen. Viel urteilsfähiger wird das Auge bei der Beurteilung der Kontrastempfindungen. Diese Fähigkeit wird zur Photometrierung herangezogen. Man beleuchtet von zwei verschiedenen Lichtquellen her je eine möglichst gut, jedenfalls der Stärke (für alle Wellenlängen) nach ganz gleich reflektierende Scheibe und ändert die Verhältnisse, z. B. den Abstand der einen Lichtquelle so lange, bis die Kontrastempfindung verschwindet. Die Leuchtdichten der beiden bestrahlten Flächen sind dann gleich. Aus der Gleichheit der Reflexionsvermögen ist danach auf Gleichheit der Beleuchtungsstärken zu schließen und aus diesen, wenn die Lichtquellen punktförmig sind (809, g) auf das Verhältnis der Lichtstärken nach der Formel

$$J_x = \left(\frac{r_x}{r_v}\right)^2 \cdot J_v,$$

worin sich x auf die unbekannte und v auf die Vergleichslichtquelle bezieht.

Man hat die auf dieser subjektiven, d. h. auf der Empfindlichkeit des Auges des Beobachters beruhende Unsicherheit der Photometrierung durch Schaffung von Instrumenten zu vermeiden gesucht, mit denen die Größe einer Lichtstärke oder Beleuchtungsstärke in ähnlicher Weise angezeigt wurde, wie etwa die Größe eines Gewichtes durch die Zunge der Wage oder die Größe einer elektrischen Stromstärke durch den Zeiger des Strommessers (objektive Photometrie; *E l s t e r* und *G e i t e l*, *V o e g e*, *M o l l*, *R i c h t m e y e r*, *I v e s*, *C o b l e n t z* u. a.). Die Erfolge in dieser Richtung sind noch nicht zufriedenstellend, und es ist schwer anzunehmen, daß die physiologischen Reize des Auges durch physikalische, chemische oder thermische Wirkungen des Lichtes jemals vollkommen ersetzt werden könnten. In gewissen Fällen, z. B. zur Feststellung der relativen Verschiedenheit der Lichtstärken gleicher Größenordnung (Aufnahme von Lichtverteilungskurven) kann die objektive Photometrie gute Dienste leisten (*V o e g e*, *ETZ* 1908, S. 49).

Photometer.

(812) **Das Fettfleckphotometer (Bunsen).** Von älteren Photometern ist das von Bunsen im Jahre 1844 angegebene Fettfleckphotometer von grundlegender Bedeutung geworden: ein Papierblatt wird an einer Stelle durch Einfettung durchscheinend gemacht. Diese durchscheinende Stelle ist von einer reflektierenden umgeben. Wir setzen voraus, daß das Transmissionsvermögen der ersteren gleich

dem Reflexionsvermögen der letzteren sei, und zwar für alle Wellenlängen, und daß außerdem der Fettfleck gar kein Licht reflektiere, das umgebende Papier gar kein Licht durchlasse. Stellen wir dann das Papierblatt zwischen die zwei zu vergleichenden Lichtquellen, und zwar so, daß es senkrecht zu der Verbindungsgeraden der Lichtquellen steht, so läßt sich, wenn man das Blatt von einer Seite betrachtet, eine Stelle für das Papierblatt finden, an der der Fettfleck und damit der Kontrast zwischen der durchscheinenden und reflektierenden Stelle des Papiers verschwindet. Diese Tatsache läßt auf gleiche Leuchtdichte und unter den gemachten Voraussetzungen auf gleiche Beleuchtungsstärke, und diese Gleichheit auf das in (811) durch die Formel ausgedrückte Verhältnis der Lichtstärken der zu messenden und der Vergleichslichtquelle schließen.

In Wirklichkeit ist das Reflexionsvermögen des ungetetteten Papiers nicht gleich dem Transmissionsvermögen der getetteten Stelle. Deshalb werden an der Stelle, wo die beiden Beleuchtungsstärken einander gleich sind, die Leuchtdichten nicht gleich sein, der Fettfleck also nicht verschwinden. Diese für die Photometrierung wichtige Stelle des Papierblattes zwischen den beiden Lichtquellen zu finden, ist aber trotzdem möglich, nämlich dadurch, daß man beide Seiten des Papierblattes durch schräg gestellte Spiegel gleichzeitig betrachtet. Stellt man dann auf Gleichheit des Kontrastes zwischen Fettfleck und ungetettetem Papier auf beiden Seiten ein, so ist damit die gesuchte Stelle gefunden, für die die angegebene Formel richtig ist. Auch die Tatsache, daß das ungetettete Papier etwas Licht durchläßt, die getettete Stelle etwas reflektiert, spielt dann nur noch insofern eine Rolle, als die Empfindlichkeit der Einrichtung dadurch etwas beeinträchtigt wird.

Der künstliche Fettfleck von Lummer und Brodhun¹⁾. Die im vorigen Abschnitt anfangs gemachten Voraussetzungen der Gleichheit des Reflexions- und Transmissionsvermögens, und daß der Fettfleck nicht reflektiere, das umgebende Papier nicht durchlasse, ist vollkommen erfüllt bei dem Photometer (Photometerkopf) von Lummer und Brodhun; dieses Photometer besteht im wesentlichen aus zwei rechtwinkligen Glasprismen *A* und *B* (Abb. 476), die an ihren Hypothenusenflächen eng aufeinandergepreßt sind. Diese innige Berührung findet jedoch nur an einer Kreisfläche *rs* statt, denn von dem einen Prisma ist die Hypothenusenfläche bis auf den kleinen Teil *rs* abgeschliffen und eine Kugelfläche *pq* als Begrenzung übriggeblieben. Die beiden miteinander zu vergleichenden Lichtquellen beleuchten die beiden Seiten des weißen und undurchsichtigen Schirmes *ik*; *f* und *e* sind zwei Spiegel, welche das von *l* und *λ* diffus zurückgeworfene Licht senkrecht auf die Kathetenflächen *dp* und *bc* leiten. Das durch *dp* eingetretene Licht wird durch die Fläche *rs* vollkommen durchgelassen, von der Kugelfläche dagegen vollkommen reflektiert; ebenso wird das durch *bc* kommende Licht bei *rs* vollkommen durchgelassen, von der übrigen Hypothenusenfläche vollkommen reflektiert. Die Verhältnisse sind also der Art nach gerade so wie beim Fettfleckschirm, dem Grade nach aber viel vollkommener. Betrachtet man den so gebildeten „Lummer-Brodhunschen Würfel“ in der Richtung senkrecht zur Kathetenfläche *ac*, wozu eine Lupe *w* angebracht ist, so bietet sich dem Auge ein durch die Verkürzung zur Ellipse verzerrter Kreis, der von der Lichtquelle über *l* und *f* Licht erhält in einem Felde, das von der rechten Lichtquelle über

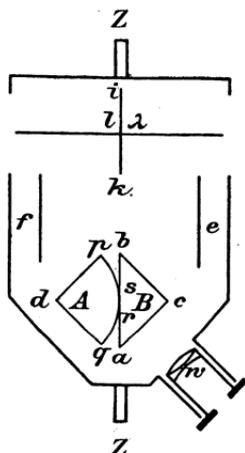


Abb. 476. Photometer von Lummer und Brodhun.

¹⁾ Zeitschrift f. Instrumentenkunde Bd. 9, S. 41 (1889).

λ und e beleuchtet wird (Abb. 477). Sind die zu vergleichenden Lichter gleichfarbig, so verschwindet bei der richtigen Einstellung die das innere vom äußeren Felde trennende Ellipse vollständig. Man stellt also auf Gleichheit der Leuchtdichten ein und hat somit in diesem Photometerkopf das eigentliche Gleichheitsphotometer. Von etwaigen Ungleichmäßigkeiten der beiden Seiten des Photometerkopfes, also insbesondere des Reflexionsvermögens von l und f einerseits und λ und e andererseits macht man die Messung dadurch unabhängig, daß man den Photometerkopf zu einer zweiten Messung um die Achse ZZ um 180° dreht und den Mittelwert aus beiden Messungen nimmt; die neueren Photometerköpfe sind so eingerichtet, daß man in der Richtung der Achse ZZ blickt. Die

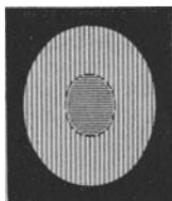


Abb. 477. Gesichtsfeld im Lummer-Brodhunschen Gleichheitsphotometer.

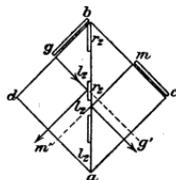


Abb. 478. Prismen des Kontrastphotometers.

Empfindlichkeit des Gleichheitsphotometers geben L u m m e r und B r o d h u n zu 1 bis $\frac{1}{2}\%$ an.

(813) Das Kontrastphotometer von Lummer und Brodhun¹⁾. Es sind wie beim vorigen Würfel zwei rechteckige Prismen mit ihren Hypotenusenflächen eng aufeinandergepresst (Abb. 478), dabei aber durchlässige und reflektierende Flächen-

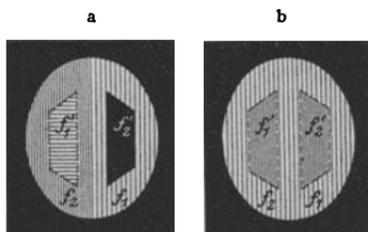


Abb. 479. Gesichtsfeld im Lummer-Brodhunschen Kontrastphotometer.

teile dadurch geschaffen, daß aus der Hypotenusenfläche des linken Prismas gewisse Flächenteile herausgezät sind; außerdem ist je ein Teil, das die Hälfte der beiden die Lichtströme aufnehmenden Kathetenflächen durch durchsichtige Glasplatten abgedeckt, die etwa 8% des durchgehenden Lichtes absorbieren. Bei ungleicher Beleuchtung der Schirmseiten l und λ erscheint dann dem Auge ein Bild, wie es Abb. 479a zeigt: die von der Lichtquelle 1 (links) beeinflussten Felder f_1 und f_1' erscheinen hell, aber f_1' etwas dunkler als f_1 ; die von der Lichtquelle 2 (rechts) beeinflussten Felder f_2 und f_2' erscheinen dunkler und dabei f_2' noch etwas dunkler als f_2 . Bei der richtigen Einstellung und gleicher Lichtfarbe verschwindet der trennende Strich zwischen f_2 und f_1 ; und auf diesen gleichhellen Feldern erscheinen f_1' und f_2' gleich dunkel (Abb. 479b). Dieses Kontrastphotometer hat sein Urbild in dem Bunsenschen Fettfleckphotometer, in dem die beiden Seiten des Schirmes durch schräggestellte Spiegel gleichzeitig beobachtet werden. f_1 und f_2' entspricht der einen Seite des Papiers, f_2 und f_1' der andern; dabei sind f_1' und f_2' dem Fettfleck, f_1 und f_2 dem umgebenden Papier vergleichbar. L u m m e r und B r o d h u n geben die Empfindlichkeit mit diesem Instrument zu $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{4}\%$ an.

(814) Mittel zur Abgleichung²⁾. a) Änderung der Abstände. Die in (811) angegebene Formel, die die Grundlage für die Anwendung der beschriebenen Photometer bildet, setzt die Veränderung von r_v und r_x oder wenigstens einer dieser beiden Längen voraus. Um diese Veränderung bequem vornehmen zu können,

¹⁾ Zeitschrift f. Instrumenkunde Bd. 12, S. 41 (1892).

²⁾ Lie b e n t h a l, Praktische Photometrie (Braunschweig 1907), S. 199 — U p p e n b o r n - M o n a s c h, Lehrbuch der Photometrie (München 1912), S. 220.

benützt man eine sogenannte Photometerbank, d. h. ein Schienengestell, auf dem die beiden Lichtquellen und der Photometerkopf leicht verschoben und deren Stellung an einer Längsskala leicht abgelesen werden kann. Welche Verschiebung man dabei vornimmt, ist zwar grundsätzlich, nicht aber praktisch gleichgültig; es empfiehlt sich nämlich, die Beleuchtungsstärke der Photometerschirme auf einer Höhe zwischen 10 und 30 Lux konstant zu halten. Um das zu erreichen, muß man den Abstand der Vergleichslampe vom Photometerkopf konstant halten, also entweder die zu vergleichende Lampe oder Vergleichslampe und Schirm in starrer Verbindung gegen die zu vergleichende Lampe verschieben.

b) Rotierende Sektorscheiben mit veränderlicher Sektoröffnung. Sie werden in den Strahlengang einer der beiden Lichtquellen geschaltet, und dort mit einer solchen Geschwindigkeit in Umdrehung versetzt, daß das Auge keine Ungleichmäßigkeiten (Flimmern) der Beleuchtung mehr wahrnimmt. Ihre Anwendung beruht auf dem Talbot'schen¹⁾ Gesetz, das in der von Helmholtz²⁾ ausgesprochenen Fassung lautet: „Wenn eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem und regelmäßig in derselben Weise wiederkehrendem Lichte getroffen wird, und die Dauer der Periode hinreichend kurz ist, so entsteht ein kontinuierlicher Lichteindruck, der dem gleich ist, welcher entstehen würde, wenn das während einer jeden Periode eintreffende Licht gleichmäßig über die ganze Dauer der Periode verteilt würde.“ Man braucht somit die Sektorscheiben nur mit genügender Drehzahl umlaufen zu lassen und kann dann durch Veränderung der Sektoröffnung den auf den Photometerschirm gestrahlten Lichtstrom, also auch die Lichtstärke in weitem Umfange beliebig verändern. Die Veränderung der Sektorenöffnung während des Umlaufs ist bei einer gewöhnlichen Sektorscheibe nicht möglich. Es bedarf dazu besonderer Vorrichtungen; eine der besten ist die in dem sogenannten Straßenphotometer von Brodhuus verwendete (817).

c) Stufenweise gestatten Rauchglasscheiben (810) das Licht der Vergleichslampe oder der unbekanntem Lichtquelle zu schwächen. Deshalb verwendet man diese Scheiben nur, um den Meßbereich des Photometers zu erweitern. Die Rauchgläser sollen nach Möglichkeit absolut grau (nicht farbig) durchlassen.

d) Auch Milchglasscheiben lassen sich zur stufenweisen Lichtschwächung verwenden. Der grundsätzliche Unterschied zwischen Milchgläsern und Rauchgläsern, wie er in (810) hervorgehoben ist, spielt bei der Verwendung natürlich eine wichtige Rolle.

e) In Verbindung mit Milchglasscheiben können verstellbare Blenden, wie Iris- oder Spaltblenden oder auch Siebblenden (durchlöchernte Bleche), verwendet werden, die vor eine Milchglasscheibe in den Strahlengang geschaltet sind.

(815) Winke für die Photometrierung. Die Bilder des Photometerfeldes müssen auf ihre Gleichheit rasch beurteilt werden; längeres Hinschauen und Prüfen erhöht die Genauigkeit nicht, sondern ermüdet nur das Auge. — Größere Genauigkeit erreicht man durch Wiederholung der Beobachtung; von Vorteil kann dabei eine Vertauschung der zu vergleichenden Lichtquellen oder eine Drehung des Photometerkopfes um 180° sein.

Zur Aufstellung der Photometerbank eignet sich ein vollkommen dunkler mattschwarz oder rotbraun angestrichener und am besten an der Seite, wo die Photometerbank steht, in der Höhe dieser mit einem Streifen mattschwarzen Stoffes ausgeschlagener Raum. In manchen Fällen hilft man sich dadurch, daß man das Photometer geschlossen baut, entweder mit festem Holz- oder Blechmantel oder mit Tuchvorhängen. Auf alle Fälle soll durch Schirme aus mattschwarzem Stoff mit Ausschnitten in der Mitte, welche auf die Photometerbank senkrecht zur Strahlenrichtung gestellt werden, fremdes Licht abgeblendet werden; man

¹⁾ Pogg. Ann., Bd. 35, S. 457 (1835); Phil. Mag., Bd. 5, S. 327 (1834).

²⁾ Physiologische Optik, 2. Auflage, S. 483.

darf vom Orte des Photometerkopfes nur das Licht sehen, welches von den zu vergleichenden Lichtquellen kommt. Das Auge des Beobachters darf nur Licht aus dem Photometerkopf empfangen. Zum Ablesen der Teilung der Photometerbank diene eine kleine schwach leuchtende und gegen das Auge vollkommen abgeblendete Glühlampe. Die Niederschrift der Meßergebnisse überlasse man wenn möglich einem zweiten Beobachter, der auch für die Einstellung der Normallampe zu sorgen, bzw. die Meßinstrumente abzulesen hat.

(816) **Das Webersche Photometer**¹⁾. Das im Jahre 1883 von **Leonhard Weber** angegebene Photometer ähnelt den oben beschriebenen insofern, als wie bei jenen mit einem wirklichen oder künstlichen Fettfleck verglichen wird. Der Lummer-Brodhunsche Würfel kann dabei nach der ersten Art auf Gleichheit

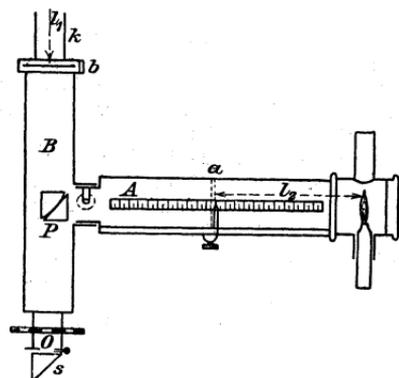


Abb. 480. Photometer von Leonhard Weber.

oder nach der zweiten auf Kontrast gebaut sein. Verschieden ist das Webersche Photometer von dem vorigen dadurch, daß die Vergleichslampe mit dem Photometerkopf in einem Apparat zusammengebaut ist und vor allen Dingen dadurch, daß das von der Vergleichslampe kommende Licht in seiner Wirkung auf das Photometerfeld nicht durch Veränderung des Abstandes zwischen Lampe und Feld, sondern durch Verschiebung einer dazwischen geschalteten Milchglasplatte verändert wird. Nach dem in (809) unter h angegebenen Gesetze hat die Veränderung des Abstandes der Milchglasplatte vom Würfel, also auch vom Auge, keinen Einfluß auf die Helligkeit.

Die Konstruktion des Weberphotometers ist folgende: In dem Kreuzungspunkte zweier senkrecht aufeinanderstehenden innen geschwärzten Rohre *A* und *B* (Abb. 480) befindet sich ein Lummer-Brodhunscher Würfel, am Ende des horizontal liegenden Rohres *A* die Vergleichslampe — früher eine Benzinlampe, heute in der Regel ein Glühlämpchen — und in *A* verschiebbar die erwähnte Milchglasplatte *a*. Der Abstand der Milchglasplatte von der Vergleichslichtquelle ist auf einer Skala außen am Rohre ablesbar. Am Ende des Rohres *B*, das um die Achse von *A* gedreht werden kann, befindet sich ein Kästchen zur Aufnahme einer Milchglasplatte *b*, zu der weitere Milchgläser oder Rauchgläser hinzugefügt werden können; *b* wird von der zu untersuchenden Lichtquelle beleuchtet. Mit dem Okular *O* werden also durch den Photometerwürfel hindurch die Leuchtdichten von *a* und *b* miteinander verglichen.

Man kann auch die Platte *b* entfernen und dann auf eine diffus reflektierende Fläche einstellen. Das geschieht, wenn man die Beleuchtungsstärke dieser Fläche messen will. Natürlich kann man gegebenenfalls auch auf die Lichtstärke der diese Fläche beleuchtenden künstlichen Lichtquelle schließen. Für die Vergleichung von Lichtstärken nach dem ersten Verfahren gilt die Formel

$$J = C_1 \cdot \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2.$$

Für die Messung von Beleuchtungsstärken

$$E = C_2 \cdot \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2.$$

¹⁾ Wied. Ann., Bd. 20, S. 326 (1883); Zeitschr. f. Instrumentenkunde, Bd. 11, S. 6 (1891).

Die Konstanten enthalten die Lichtstärke der Vergleichslampe, die Transmissionsvermögen der Milchglasscheiben und im zweiten Falle das Reflexionsvermögen der beleuchteten Wand. Diese Größen aber brauchen nicht etwa bekannt zu sein, vielmehr werden die Konstanten C_1 und C_2 bestimmt, indem man im ersten Falle eine bekannte Lichtstärke die Platte b bestrahlen läßt und im zweiten Falle ebenfalls durch eine bekannte Lampe in bestimmtem Abstände von der beleuchteten Wand auf dieser eine bekannte Beleuchtungsstärke hervorruft. Selbstverständlich müssen bei Benutzung anderer Platten b oder Benutzung mehrerer Platten an ihrer Stelle die Konstanten neu bestimmt werden.

Das Tubusphotometer. Die Firma Schmidt & Haensch hat das Webersche Photometer weiter ausgebildet, und zwar hauptsächlich in zwei Richtungen: Das Rohr B ist etwa da, wo in Abb. 480 das Zeichen B steht, rechtwinklig nach links abgesetzt, so daß nunmehr die den zu untersuchenden Lichtstrom auffangende Platte b senkrecht zur Achse von A steht, das Licht wird durch ein Prisma auf den Lummer-Brodhunschen Würfel geleitet. Die andere Abänderung besteht darin, daß die Veränderung des Meßbereichs nicht durch Einschieben von losen lichtschwächenden Platten in den Plattenkasten erreicht wird, sondern daß in einem staubdicht verschlossenen Plattenkasten eine Milchglasscheibe zur Platte b in zwei verschiedenen Abständen in den Strahlengang eingeschaltet werden kann, außerdem können zwischen diese zwei Milchglasscheiben zwei Siebblenden (814) verschiedener Abblendung eingeschaltet werden; alle diese Einschaltungen werden durch einfache Drehung an äußeren Handhaben des Plattenkastens vorgenommen. Die vorschlagbare Milchglasscheibe und die Siebblenden sind so bemessen, daß durch sie eine dezimale Erweiterung des Meßbereiches in den Stufen 1 : 10 : 100 : 1000 : 10000 erreicht wird. — Der Plattenkasten mit dem auffangenden Milchglasfenster b kann in jede beliebige Richtung geschwenkt werden, so daß durch b ein Lichtstrom aus beliebiger Richtung aufgenommen werden kann, also beispielsweise Beleuchtungsstärken in beliebig geneigten Ebenen bei entsprechender Einstellung von b gemessen werden können.

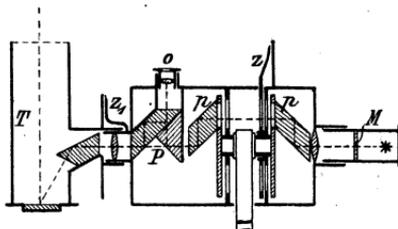


Abb. 481. Straßenphotometer von Brodhun.

(817) Das Straßenphotometer von Brodhun¹⁾. Es ist durch seine Schwächungsvorrichtung, die auf dem Prinzip der Sektorscheiben beruht, bemerkenswert. In seiner ursprünglichen Form ist es in Abb. 481 wiedergegeben. Ein einseitig offenes Rohr T , auf dessen Grund eine Gipsplatte angebracht ist, wird der zu untersuchenden Lichtquelle zugewandt. Das Licht der Gipsplatte wird durch ein total reflektierendes Prisma einer Prismenkombination P zugeführt, die den Lummer-Brodhunschen Würfel enthält, und gelangt durch diesen zum Okular o . Von der anderen Seite kommt das Licht, welches die von einer Vergleichslampe beleuchtete Milchglasplatte M aussendet, gleichfalls nach P . Die beiden Prismen p sitzen auf Scheiben, die mit einer rasch umlaufenden Achse fest verbunden sind; der Teil der Lichtstrahlen zwischen p und p beschreibt also einen Zylindermantel. Die in den Zeiger z auslaufende und mit der Hand drehbare Scheibe trägt zwei Sektorenausschnitte von 90° , welche gegen gleich große Ausschnitte der feststehenden Scheiben verstellt werden können, so daß das von rechts kommende Licht sowohl ganz abgelenkt, als auch während zweier Vierteldrehungen frei hindurchtreten kann. Durch Einstellen des Zeigers z auf dem Teilkreis kann man beliebige Schwächung

¹⁾ Zeitschrift f. Instrumentenkunde, Bd. 14, S. 310 (1894) und Bd 15, S. 337 (1895).

des Lichts erzielen. Das Photometer ist die Grundlage für ein anderes von B e c h s t e i n konstruiertes Instrument geworden, das gleichsam eine Vereinigung des Tubusphotometers (in bezug auf den Plattenkasten für dezimale Erweiterung des Meßbereichs) und des soeben beschriebenen Brodhunschen Instrumentes (in bezug auf die Sektorschwächung) darstellt.

(818) Das Blochsche Photometer¹⁾. Dieses Photometer ist in mehrererlei Weise benutzbar. Am besten kann seine Eigenart erklärt werden, wenn zunächst angenommen wird, daß es zur Bestimmung des Reflexionsvermögens grauer Körper verwendet werde.

Zwei weiß reflektierende Flächen, z. B. Gipsplatten *U* und *T* (Abb. 482) befinden sich in gleichem Abstände von einer vollkommen gleichmäßig diffus leuchtenden Scheibe, von der sie durch zwei rechteckige Öffnungen, eine von unveränderlicher Größe *F*, die andere von veränderlicher Größe *V*, bestrahlt werden, und zwar wird *U* nur durch *F*, *T* nur durch *V* hindurch bestrahlt. (In Wirklichkeit tritt an Stelle der leuchtenden Scheibe eine Ulbrichtsche Kugel *K* (826) mit einer gegen *F* und *V* gerichteten Öffnung). Durch eine Prismenkombination *cc* werden die beiden Gipscheiben scharfkantig aneinanderstoßend in das Gesichtsfeld gebracht. Unter den beschriebenen Umständen müssen die beiden Vergleichsfelder in gleicher Helligkeit erscheinen. Nun möge aber an Stelle der Scheibe *U* der auf sein Reflexionsvermögen, seine Graueit zu prüfende graue Stoff gelegt werden. Die dann eintretende Verschiedenheit der Vergleichsfelder

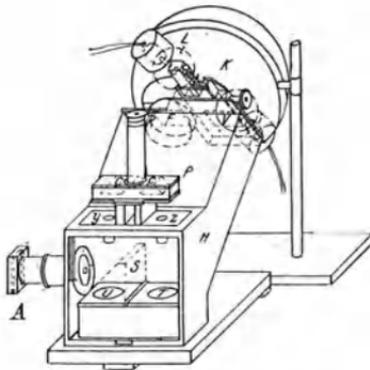


Abb. 482. Blochsches Photometer.

kann dadurch ausgeglichen werden, daß der Lichtstrom, der von der gleichmäßig leuchtenden Scheibe auf die stärker reflektierende Platte *T* strahlt, vermindert wird. Dies ist dadurch leicht zu machen, daß die rechtwinklige Öffnung durch Drehung einer Rändelschraube auf ein leicht ablesbares Maß verringert wird. Der die Platte *T* bestrahlende Lichtstrom, also auch der von *T* abgestrahlte, ist proportional der Öffnung von *V*, und zwar ist er (wenn die beiden Photometerfelder auf gleiche Helligkeit abgeglichen sind) gleich dem von *U* abgestrahlten. Die Verringerung rechtsseitig, durch Verkleinerung von *V* gemessen, ist gleich der linksseitig durch die Verminderung des Reflexionsvermögens hervorgerufenen. Das Reflexionsvermögen von *U* zu dem von *T* ist also gleich der Öffnung von *V* zu der von *F*.

Zur Messung der Beleuchtungsstärke einer vertikalen Fläche stellt man an die Stelle der Platte *U* einen prismatischen Keil *S*, auf dessen unter 45° geneigter Hypotenusenfläche sich ein Spiegel befindet. Auf diesen strahlt das von der Milchglasplatte *A* aufgefangene und durchgelassene Licht. Die Einstellung auf gleiche Helligkeit erfolgt in derselben Weise wie oben. Man eicht durch Herstellung einer bekannten Beleuchtungsstärke auf *A* durch Bestrahlung der Scheibe mit einer bekannten Lampe in bekanntem Abstand. — Zur Messung von Beleuchtungsstärken in beliebigen Ebenen kann bei *A* ein drehbarer Winkeltubus mit Prisma angebracht werden, der zur Aufnahme des Lichtstromes nach außen durch eine Milchglasplatte abgeschlossen ist. Durch Drehung des Winkeltubus kann die Milchglas-

¹⁾ Journal f. Gasbeleuchtung 1919, Heft 26.

scheibe in die Stellung gebracht werden, für die die Beleuchtungsstärke ermittelt werden soll.

Die Lichtstärke wird in derselben Weise gemessen, indem man nämlich die unbekannte Lampe auf die Milchglasscheibe *A* oder auf die diffus reflektierende Hypotenusenfläche von *S* strahlen läßt.

Über andere Anwendungen dieses Photometers siehe Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, 1919, Heft 26.

(819) Einfache Beleuchtungsmesser. a) Der sogenannte Foot-Candle-Meter der Nela. Die National Electric Light Association (Nela) in Cleveland ist dem Bedürfnis nach einem sehr einfach zu handhabenden, wenn auch nur roh anzeigenden Instrumente für Beleuchtungsmessungen durch den sogenannten Foot-Candle Meter gerecht geworden. Er besteht (Abb. 483) im wesentlichen in einer Reihe von 33 eng nebeneinanderliegenden „Fettflecken“, die dadurch hergestellt sind, daß ein fast lichtundurchlässiges Papier mit 33 Löchern von etwa je 3 mm Durchmesser versehen ist. Dieses Blatt bildet die eine Seite eines langgedehnten abgeschlossenen Kästchens, an dessen einem, dem rechten Ende ein Glühlämpchen so angebracht ist, daß die Fettflecke von unten her mit ungleichmäßiger Stärke beleuchtet werden. Wird die Fettfleckreihe, also auch das undurchsichtige Papier, von oben her, also etwa durch das Tageslicht, beleuchtet, und zwar, wie es auch bei künstlicher Beleuchtung fast ausnahmslos genügend genau zutrifft, an allen Stellen gleichmäßig, so werden bei mittleren Beleuchtungsstärken die an der linken Seite liegenden Fettflecke dunkler als das Papier erscheinen, die an der rechten Seite liegenden heller; dazwischen liegt ein Fettfleck, der so gut wie ganz verschwindet. An ihm ist also die Beleuchtungsstärke von beiden Seiten ungefähr dieselbe. Man kann die Fettfleckreihe durch Bestrahlung in bekannten Beleuchtungsstärken leicht graduieren, darnach also unbekannte Beleuchtungsstärken bestimmen. Selbstverständlich muß dafür gesorgt werden, daß die Spannung an den Klemmen der Glühlampe immer dieselbe ist. Hierzu dient ein kleiner Regulierwiderstand *W*, der so einzustellen ist, daß der Zeiger eines kleinen Spannungsmessers *V* sich auf eine bestimmte Marke einstellt. Alle drei genannten Teile und als vierter eine Trockenbatterie sind in einem kleinen handlichen Kasten zusammengebaut.

Das Instrument zeigt nur mit einer Sicherheit von höchstens 10%, aber die außerordentlich leichte Handhabung, mit der es in einem scharfen Kontraste zu den bisher beschriebenen Photometern steht, und infolge deren es von jedem Laien benutzt werden kann, hat ihm eine sehr große Verbreitung, wenigstens in den Vereinigten Staaten verschafft (im Frühjahr 1924 etwa 5000 Stück).

b) Der Bechsteinsche Beleuchtungsmesser¹⁾. Das Aufsehen, das das oben beschriebene amerikanische Instrument in Deutschland machte, regte viele zur Konstruktion eines ähnlichen Instrumentes an. Dabei war allgemein die Ansicht maßgebend, daß man sich mit der geringen Zuverlässigkeit jenes Instrumentes nicht begnügen dürfe. Am erfolgreichsten war der Konstrukteur der Firma Franz Schmidt & Haensch, Bechstein, mit folgendem im Jahre 1923 herausgegebenen Instrumente:

Ein kleine zylindrische innen weiß ausgekleidete Kammer *C*₁ (Abb. 484) enthält ein elektrisches Glühlämpchen und ist an der einen Stirnfläche durch eine sechs kreisrunde Löcher σ enthaltende Kreisscheibe abgeschlossen. Dieser Scheibe

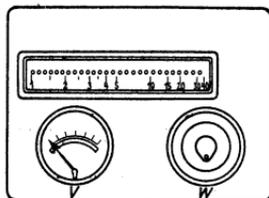


Abb. 483. Beleuchtungsmesser der National Electric Light Association (Nela).

¹⁾ Licht und Lampe 1923, S. 207.

steht eine gleiche zweite gegenüber, die eine ähnliche zylindrische, innen weiß gestrichene Kammer C_2 an der einen Seite abschließt. Die andere Seite von C_2 wird durch eine Doppelscheibe, bestehend aus einem Blauglase m' und einem Milchglase m , begrenzt. Die letztere Kammer kann gegen die erstere feststehende verdreht werden. Bei dieser Verdrehung verschieben sich die sechs Löcher der beweglichen gegen die sechs Löcher der feststehenden Kammer, wodurch dem Lichte in größerem oder geringerem Maße Zutritt zu der Milchglasscheibe gewährt wird. Die Einrichtung stellt also eine veränderliche Siebblende dar. Das Maß der Umdrehung, die mit dem Knopfe K vorgenommen und erst durch mehrfache mechanische Übersetzung auf C_2 übertragen wird, kann an einer mit Skala versehenen Trommel S abgelesen werden. Die von innen beleuchtete Milchglasscheibe m wird durch eine halbkreisförmige Öffnung II beobachtet und erscheint in dieser

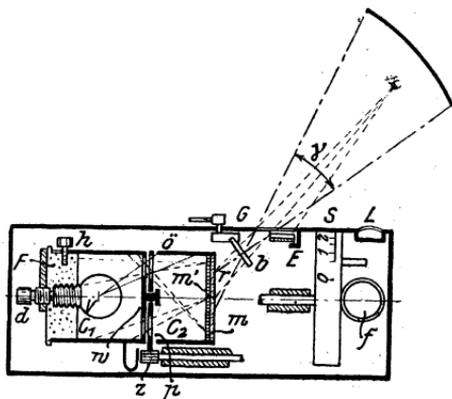


Abb. 484. Bechsteinscher Beleuchtungsmesser.

Gestalt als das eine Vergleichsfeld neben dem mit I bezeichneten, das in weißem oder grauem Papier (bei E) besteht. Durch Wahl der Graueit nach der Ostwaldschen Skala kann der Meßbereich in drei Stufen erweitert werden. Außerdem ist eine Erweiterung des Meßbereiches durch Verminderung der Glühlampenspannung möglich. Um in diesem Falle die ursprüngliche dem Tageslicht ähnliche Lichtfarbe auf dem Vergleichsfeld II wiederherzustellen, wird ein Blaufilter bei b vorgeschlagen. Wichtig ist, daß das Auge die Vergleichsfelder immer in möglichst derselben Richtung betrachtet. Dazu ist die Regel zu befolgen, daß beim Auf-

blicken eine Marke eine bestimmte Stellung im Gesichtsfeld II einnehmen muß. Man vergleicht mit dem Instrumente also die Leuchtdichte des grauen Blattes bei I mit der Leuchtdichte der Milchglasscheibe m in der Richtung auf II , welche letztere man durch Drehung von C_2 gleich der ersteren macht. Bei allen Beleuchtungsmessern ist zu beachten, daß der Beobachter, unter Umständen auch das Instrument, einen Teil des Lichtes abschattet. Der Beobachter hat vor allem dafür zu sorgen, daß er bei der Messung nicht Lichtquellen abschattet, die zur Herstellung der zu messenden Beleuchtungsstärke merklich beitragen; außerdem muß das Instrument so gebaut sein, daß dieser Fehler die Messung nur unwesentlich beeinflusst. (Von älteren Beleuchtungsmessern muß gesagt werden, daß dieser Forderung oft nicht gebührend Rechnung getragen ist.) — Andererseits sollen die Photometer so gebaut sein, daß jedes der beiden Vergleichsfelder nur die eine der beiden zu beobachtenden Beleuchtungsstärken empfängt und ins Auge weitergibt. Das ist nicht der Fall bei dem amerikanischen Instrumente, denn bei ihm empfangen die Fettflecke nicht nur von der innen angebrachten Glühlampe Licht, sondern auch von den die zu messende Beleuchtung hervorrufenden Lichtquellen. Hieraus erklärt sich zum großen Teil die geringe Empfindlichkeit des Instrumentes. Bei dem Bechsteinschen Instrumente sichert die tiefe abgeschlossene Lage der Milchglasscheibe m , daß diese vom äußeren Lichtstrom fast nichts erhält. Nur innerhalb des kleinen Raumwinkels γ , der noch durch den Kopf des Beobachters verkleinert wird, kann auch solches Licht auf die Milchglasscheibe fallen.

Photometrie verschiedenfarbigen Lichtes¹⁾.

(820) Allgemeines. Die verschiedenfarbige (heterochrome) Photometrie hat die Möglichkeit zur Voraussetzung, daß man von verschiedenfarbig leuchtenden Lichtquellen aussagen kann, sie seien gleich hell, sie übten also dem Grade nach denselben physiologischen Reiz auf das Auge aus. Man nimmt an, daß das der Fall sei, wenn Gesehenes, z. B. Schrift oder die von *Leonhard Weber* gezeichneten Sehzeichen (schwarze und weiße konzentrische Kreise von gleicher radialer Dicke der beiderlei Ringe bei demselben, aber ungleicher bei verschiedenen Sehzeichen) mit gleicher Deutlichkeit gesehen werden²⁾.

Sind die Farben der miteinander zu vergleichenden Lichtquellen nicht stark verschieden voneinander, so erscheinen zwar die beiden Photometerfelder im Lumen-Brodhunschen Würfel nicht gleich und die Trennlinien verschwinden nicht, aber ein geübter Beobachter wird doch, in der Absicht auf gleiche Helligkeit einzustellen, auch bei verschiedenen Ablesungen immer annähernd dieselbe Einstellung erhalten; bei ihr werden die Trennlinien unscharf.

Bei der heterochromen Photometrie hat man zu unterscheiden die Messung der Lichtstärke des farbigen Lichtes und die Bestimmung der spektralen Zusammensetzung. Unter der ersteren versteht man die Bestimmung derjenigen Lichtstärke, in deren Beleuchtung die Sehzeichen geradeso scharf erkannt werden, wie in der Beleuchtung des weißen Vergleichslichtes.

(821) Verfahren von Leonhard Weber. Nach dem Vorangegangenen kann man eine Lichtquelle mit farbigem Licht mit einer Vergleichslampe mit sogenanntem weißem Licht immer auf die Weise messend vergleichen, daß man beide Lampen nacheinander auf dieselben oder besser gleichzeitig auf ganz gleiche Sehzeichen strahlen läßt. Man verändert dann die Abstände der beiden Lichtquellen so, daß beide Sehzeichen in derselben Sehschärfe erscheinen. Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke sind dann auf beiden Sehzeichentafeln einander gleich und die Lichtstärken proportional dem Quadrate der Abstände zwischen Lampe und Sehzeichentafel.

Um sich von der schwierigen Beurteilung der Sehschärfen unabhängig zu machen und die Messung auf einfache photometrische Vergleichen zurückzuführen, vergleicht man die unbekannt mit der bekannten Lichtquelle durch ein vor das Okular des Photometers gelegtes Farbfilter, und zwar hat *L. Weber* ein Verfahren vorgeschlagen, das sich folgendermaßen erklären läßt: Haben unbekannt und Vergleichslampe dieselbe spektrale Verteilung, so kann man die beiden Lichtquellen durch Einschaltung eines Farbfilters in das Okularrohr des Photometers in irgendeiner Farbe miteinander vergleichen und wird immer dasselbe Verhältnis der Lichtstärken erhalten. Eine solche Photometrierung durch Farbfilter wäre aber zwecklos, denn wir haben es ja mit gleichfarbigen Lichtquellen zu tun. Ist nun die spektrale Zusammensetzung verschieden, so wird der Grad der Verschiedenheit bei Temperaturstrahlern im allgemeinen genügend scharf durch das Verhältnis zweier weitabliegender Farben, z. B. Rot und Grün, gekennzeichnet. Hierauf gründet *L. Weber* sein Verfahren: Er hat durch umfangreiche Messungen einen Faktor k ermittelt, mit dem man die im roten Filter gemessenen Lichtstärken multiplizieren muß, um die Lichtstärke der farbigen Lichtquelle in HK zu erhalten, d. h. die Lichtstärke der farbigen Lichtquelle, die unter gewissen Be-

¹⁾ *Heilmoltz*, Handbuch d. physiol. Optik, 3. Auflage, Bd. 2, S. 347. — *Nagel*, Handbuch d. Physiologie, Bd. 3, S. 258. — *Liebethal*, Praktische Photometrie, S. 229. — *Uppenborn-Monach*, Lehrbuch d. Photometrie. — *A. Kohlrusch*, Zur Photometrie verschiedenfarbiger Lichtquellen; Licht u. Lampe 1923, S. 555. — *v. Kries*, Über einige Aufgaben aus der Farbenlehre; Zeitschr. f. techn. Physik, Bd. 5, S. 327, 1924.

²⁾ Dies ist die eine Definition der Gleichheit der Beleuchtungsstärken in verschiedenfarbigem Lichte. Ob die auf diese Weise festgestellte Gleichheit mit der nach andern Verfahren — siehe insbesondere (822) u. (825) — festgestellten übereinstimmt, ist noch nicht abschließend erforscht.

dingungen dieselbe Sehschärfe hervorruft wie die Lichtstärke einer gleichen Zahl von Hefnerkerzen in der Farbe der Hefnerlampe unter denselben Bedingungen. Der Faktor k ist von dem Verhältnis der im roten und in einem grünen Filter gemessenen Lichtstärken abhängig. Weber hat den Faktor k für verschiedene Werte Grün : Rot bei Anwendung einer Benzinlampe als Vergleichslampe bestimmt; für die Photometrierung mit einer anderen Vergleichslampe ist er noch nicht angegeben. Unter Grün : Rot ist das Verhältnis der mit dem grünen Filter zu der mit dem roten Filter gemessenen Lichtstärken gemeint. Das hier nicht näher zu beschreibende Verfahren zur Bestimmung von k gründet sich auf den oben angedeuteten Vergleich der verschiedenfarbigen Lichtquellen auf der Grundlage gleicher Sehschärfen¹⁾.

(822) Die Methode des Flimmerphotometers. Wenn man eine Fläche anblickt, die abwechselnd von verschiedenen starker Beleuchtung getroffen wird, so beobachtet man Flimmern, das bei um so geringerer Frequenz aufhört, je weniger die beiden Beleuchtungsstärken voneinander abweichen; bei Gleichheit der Beleuchtungsstärken ist sie am geringsten. Statt dieselbe reflektierende Fläche periodisch von der einen oder anderen Lichtquelle beleuchten zu lassen (wozu man eine Blende in schwingende oder rotierende Bewegung versetzen müßte) kann man auch einen Körper mit zwei schrägen völlig gleichartigen Flächen so rotieren lassen, daß sie sich dem Auge abwechselnd darbieten und dabei stets die eine von der einen (links auf der Photometerbank aufgestellten) Lichtquelle, die andere von der anderen (rechts aufgestellten) beleuchtet ist. Man kann hierauf ein Verfahren der Photometrie gründen, indem man das Minimum der Frequenz oder das Minimum der Geschwindigkeit des Körpers aufsucht, bei der das Flimmern verschwindet, dann gilt das bekannte Gesetz $J_1 : J_2 = r_1^2 : r_2^2$.

Diese Art der Photometrierung ist geeignet für die Photometrierung verschiedenfarbiger Lichtquellen. Steigert man in diesem Falle die Frequenz des Lichtwechsels, so unterscheidet man zunächst noch die verschiedenen Farben, dann stellt sich eine Mischfarbe ein, bei der das Flimmern beobachtet wird, und schließlich verschwindet das Flimmern. Wird bei Veränderung der Beleuchtungsstärke der beiden Felder (etwa durch Verschieben der Lichtquellen auf der Photometerbank) die Frequenz, bei der das Flimmern verschwindet, ein Minimum, so nennt man die beiden Beleuchtungen gleich stark; die Lichtstärken ergeben sich daher wiederum aus dem bekannten Entfernungsgesetz²⁾.

(823) Verfahren von v. Voß³⁾. v. Voß leitet das Licht der Vergleichslampe so auf eine Mattscheibe, daß diese gleichmäßig beleuchtet ist und bringt vor dieser Scheibe einen verschiebbaren Rahmen an, der zur einen Hälfte ein grün-blaues, zur andern Hälfte ein rot-gelbes Lichtfilter enthält. Diese Lichtfilter sind so gewählt, daß sie das Spektrum ziemlich scharf in der Nähe der Wellenlänge von $570 \mu\mu$ in zwei Teile teilen und daß sie außerdem dasselbe Durchlässigkeitsvermögen, ausgedrückt durch das Verhältnis des durchgelassenen farbigen zum aufgestrahlten weißen Lichtstrom, haben. Wird das zusammengesetzte Farbfilter vor der Mattscheibe verschoben, so bleibt der Größe nach der durchgelassene Lichtstrom immer

¹⁾ L. Weber, Wied. Ann., Bd. 20, S. 326; 1883. — ETZ. 1884, S. 166. — Schumann, ETZ 1884, S. 220. — E. Liebenenthal, Praktische Photometrie, Braunschweig 1907, S. 242. — Uppenborn-Monasch, Lehrbuch d. Photometrie, München 1912, S. 296. — Fr. Schmidt u. Haensch, Berlin, Beschreibung des Photometers nach Prof. L. Weber.

²⁾ J. Simmance, Proc. Phys. Soc. Bd. 19, S. 37, 1904; Phil. Mag. Bd. 7, S. 344, 1904. — Simmance-Abady-Photometer, Electr. (London) Bd. 52, S. 380, 1905. — O. N. Road, Amer. Journ. of Science Bd. 46, S. 173, 1893. — M. F. Whitman, Phys. Rev. Bd. 3, S. 241, 1896. — W. Bechstein, Ein neues Flimmerphotometer, Zschr. f. Instr. 1906, S. 249. — Krüß, J. f. Gasbel. u. Wasservers. Bd. 47, S. 129, 1904. — Zschr. f. Instr. Bd. 25, S. 98, 1905. — E. Liebenenthal, Praktische Photometrie, Braunschweig 1907, S. 244. — Uppenborn-Monasch, Lehrbuch der Photometrie, München 1912, S. 195, 200, 203. — A. Kohlrusch, Zur Photometrie verschiedenfarbiger Lichtquellen. Licht und Lampe 1923, S. 555.

³⁾ Zeitschrift für Beleuchtungswesen 1919, S. 53.

derselbe, dagegen ändert sich seine Farbe, und damit die Farbe des aus dem Filter auf eine entferntere Mattscheibe gestrahlten Mischlichtes. Die Erfahrung hat gezeigt, daß man in dieser Mischung alle Farben der in der Praxis üblichen Lichtquellen mit großer Annäherung herstellen kann.

Man wendet das Lichtfilter in der Weise an, daß man die Vergleichslampe mit dem veränderlichen Lichtfilter und der entfernteren Mattscheibe als eine Einheit behandelt. Diese photometriert man mit der Normallampe und eicht sie auf diese Weise.

(824). Färbung des einen Lichtstroms. Häufig, z. B. in Fabriklaboratorien, wo gleichartige Lampen in sehr großer Zahl photometriert werden, kommt es vor, daß die Lichtfarbe der zu photometrierenden Lampen in bestimmter Weise und bestimmtem Grade von der Farbe der Vergleichslampe abweicht. So geben Spiraldraht-Gasfüllungslampen ein weißeres Licht als die Vergleichslampe, die als eine absichtlich niedrig beanspruchte Metalldraht-Vakuumlampe ein röteres Licht liefert. In solchem Falle schaltet man vor die Vergleichslampe ein passendes Blaufilter, und zwar hat man für jede Klasse der zu photometrierenden Lampen ein besonders ausgewähltes Filter. Die Vergleichslampe ist mit dem Blaufilter als Einheit geeicht, d. h. etwa mit Hilfe des Flimmerphotometers mit der Hefnerkerze verglichen.

(825) Das Pulfrichsche Stereophotometer (Pustepho). Pulfrich entdeckte, daß ein vor dem Auge in frontaler Ebene hin- und herbewegter Stab aus dieser Ebene nach vorn und hinten herauszutreten und somit eine kreisförmige oder elliptische Bewegung auszuführen scheint, wenn das eine Auge von dem vom Stabe ausgehenden Lichtstrom schwächer gereizt wird als das andere. Deckt man also z. B. das rechte Auge mit einem Rauchglase ab, so wird diese Erscheinung deutlich, und zwar tritt der Stab bei der Bewegung von rechts nach links in diesem Falle scheinbar nach hinten. Bei Abdeckung des linken Auges ist die Drehbewegung entgegengesetzt gerichtet. Die Erscheinung beruht darauf, daß erstens von dem Reiz bis zur Empfindung eine gewisse Zeit verstreicht, zweitens diese Zeit um so größer ist, je kleiner der Reiz ist. Bei der geschilderten Bewegung bleibt also der Eindruck für das unabgedeckte Auge etwas, für das abgedeckte noch mehr hinter dem Reiz zeitlich zurück, so daß der Stab mit den beiden Augen an verschiedenen Stellen gesehen wird. Dies führt natürlicherweise zu einem stereoskopischen Eindruck, aus dem sich dann der Eindruck einer drehenden Bewegung ergibt¹⁾.

Genau dieselbe Erscheinung kann man hervorrufen, wenn man jedem Auge eine bewegliche Marke darbietet, die, wie in dem Stereoskop die beiden Bilder, zu einem Bilde vereinigt werden. Um die eben geschilderte stereoskopische Drehbewegung hervorzurufen, kann man jetzt dasselbe Mittel, ein Auge abzudecken, einschlagen; es steht aber noch ein anderes zur Verfügung, nämlich die Beleuchtungsstärke auf der mit dem einen Auge gesehenen Marke zu verringern. Umgekehrt ist aus der drehenden Bewegung, die beobachtet wird, auf ungleiche Beleuchtungsstärke zu schließen. Dasselbe gilt für die Beleuchtung mit verschiedenfarbigem Licht, und wir definieren die verschiedenfarbige Beleuchtung dann als gleich stark, wenn in dem so beschriebenen Pulfrichschen Stereophotometer²⁾ die Marken nur in der frontalen Ebene hin- und hergehende Bewegungen auszuführen scheinen.

Messung des Lichtstroms. Bestimmung der Lichtverteilung.

In der Photometrie schließt man, wie gezeigt wurde, aus der Gleichheit zweier Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken auf das Verhältnis der Lichtstärken der verglichenen Lampen. Nur hierdurch hat die Lichtstärke als photometrischer

¹⁾ „Naturwissenschaften“ 1922, S. 558.

²⁾ „Naturwissenschaften“ 1922, S. 714.

Begriff eine so große, überragende Bedeutung vor den anderen photometrischen Größen erlangt, eine Bedeutung, die ihr ihrer Natur nach nicht zukommt. Viel wichtiger ist der Begriff des Lichtstroms, und zwar sowohl des Lichtstroms, der im ganzen von einer Lichtquelle ausgeht, insofern dieser die Leistung der Lichtquelle bestimmt, als auch eines beschränkten Lichtstroms, der auf eine gegebene Fläche auftrifft, insofern das Verhältnis dieses Lichtstroms zur getroffenen Fläche die (mittlere) Beleuchtungsstärke bestimmt.

(826) Ulbrichtsche Kugel. Der wichtigste Apparat zur Messung des gesamten Lichtstromes einer Lichtquelle ist die von Ulbricht angegebene Kugel¹⁾. Eine an der Innenfläche vollkommen diffus reflektierende Hohlkugel hat, wie Ulbricht nachgewiesen hat, die Eigentümlichkeit, daß ein bestimmter kleiner Teil ihrer Innenwand alle Punkte der Hohlkugel mit gleicher Beleuchtungsstärke bestrahlt; also wird auch die von der Gesamtheit aller Einzelflächen (d. h. der gesamten Innenoberfläche der Hohlkugel) herrührende Beleuchtung irgendeines Punktes oder Flächenstücks der Hohlkugel dieselbe sein, und diese Beleuchtung ist ein Maß für den gesamten auf die Hohlkugel aufgestrahlten Lichtstrom, — natürlich unter der Voraussetzung, daß das Reflexionsvermögen an allen Stellen dasselbe ist. Man versieht eine kleine Öffnung, sogenanntes Fenster, der Kugel mit einer Mattglasscheibe, verhindert durch eine Blende, daß diese Scheibe von direktem Lichte der in der Hohlkugel angebrachten Lichtquelle bestrahlt wird und photometriert die Mattglasscheibe von außen. Zur Eichung genügt eine solche Photometrierung nach Einbringung einer Lampe von bekanntem [etwa nach (830) ermitteltem] Lichtstrom in die Kugel.

Die Darlegungen lassen erkennen, daß streng genommen noch folgende Bedingungen erfüllt sein sollten: die Blende darf kein reflektiertes Licht abblenden, die Fremdkörper in der Hohlkugel (wozu etwaige Gegenstände zur Anbringung der Lampe und auch Teile der Lampe selbst, z. B. die Fassung der Glühlampe gehören) dürfen direkt aufgestrahltes Licht nicht gegen das Fenster direkt reflektieren, sie dürfen ferner von der Hohlwand reflektiertes Licht nicht abblenden. Im allgemeinen ruft der Umstand, daß diese Forderungen nicht streng erfüllt werden können, keine merklichen oder empfindlichen Fehler hervor. Durch gewisse praktische Kunstgriffe können die Fehler noch vermindert werden, z. B. durch Eichung unter Einschluß von bei der späteren Photometrierung vorhandenen Fremdkörpern und durch den Anstrich der Fremdkörper mit diffus stark reflektierendem Stoff, wodurch das abgeschirmte Reflexionslicht zu einem beträchtlichen Teil ersetzt wird.

Die Fehler werden unter sonst gleichen Umständen um so kleiner, je größer die Kugel ist. Die Kugel muß vor allem bei großen Lichtquellen, also Lampen mit großen Milchglaslocken, groß sein.

Die Ulbrichtsche Kugel ist unter dem Namen des Kugelphotometers zu einer Zeit aufgekommen, als der Lichtstrombegriff noch sehr wenig gebräuchlich war und man statt dessen der sogenannten mittleren sphärischen Lichtstärke J_0 großes Gewicht beilegte, wobei der gesamte Lichtstrom $\Phi = 4\pi \cdot J_0$ ist. Nach der älteren Erklärung soll man deshalb die Kugel auf diesen Wert J_0 eichen.

(827) Räumliche Lichtverteilung. Eine Lichtquelle ist nicht nur (wie etwa eine Maschine) durch die Leistung, also den gesamten Lichtstrom, den sie liefert, charakterisiert, sondern es kommt auch auf die Stärke an, in der dieser Lichtstrom nach den verschiedenen Richtungen des Raumes ausgestrahlt wird. Man muß also die Lichtquelle nach allen Richtungen hin photometrieren. Tut man das und trägt auf den Lichtstrahlen jedesmal die gemessene Lichtstärke in einem bestimmten Maßstabe ab, so erhält man in der die Endpunkte der so begrenzten Strahlen verbindenden Fläche die Begrenzung des Lichtverteilungskörpers

¹⁾ ETZ. 1900, S. 595; 1907, S. 777 — Ulbricht, Das Kugelphotometer, R. Oldenbourg, München-Berlin 1920.

(Abb. 485). Die Form dieses Körpers kann sehr verschieden sein; in sehr vielen Fällen, z. B. bei einer Langfadenglühlampe, der Flamme eines Rundbrenners, einem Gasglühlicht, ist er axialsymmetrisch. Solche Lichtverteilungskörper sind durch die Schnittkurve in einer Meridianebene, der Lichtverteilungskurve, genau gekennzeichnet.

Bei der Aufnahme der Lichtverteilungskurve ist es üblich, vom Nadir anfangend in Winkelabständen von 10° zu 10° zu photometrieren und bei der Aufnahme des Lichtverteilungskörpers in dieser Weise die Messungen in den 18 Meridianebenen vorzunehmen, die beim Voranschreiten von einer Ebene zur anderen in Stufen von ebenfalls 10° zu zählen sind. An diesem Verfahren ist zu tadeln, daß in der Nähe des Nadirs die Messungen viel zu zahlreich sind, während ihre Zahl in der Nähe des Äquators vielleicht nicht genügt (830).

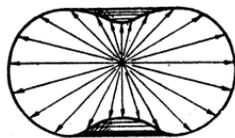


Abb. 485.
Lichtverteilungskörper.

(828) Direkte Aufnahme der Lichtverteilungskurve. Die Aufnahme der Lichtverteilungskurve erfordert eine Drehung des Photometers um die Lichtquelle herum. Die wörtliche Befriedigung dieser Forderung würde die Apparatur sehr umständlich machen. Statt dessen zieht man die Lampen in senkrechter Richtung nach oben und nach unten und photometriert dann auf der Photometerbank, indem man den Photometerschirm in die den Winkel zwischen dem zu photometrierenden Lichtstrahl und dem Licht-

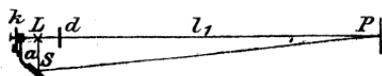


Abb. 486. Spiegel nach v. Hefner-Alteneck.

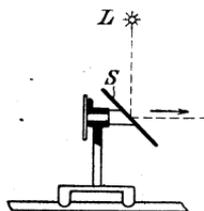


Abb. 487. Winkelspiegel
von Ayrton und Perry.

strahl der Vergleichslampe halbierende Ebene einstellt. Verwendet man ein Webersches Photometer, so richtet man den durch die Milchglasplatte abgeschlossenen Tubus in die Richtung des zu photometrierenden Lichtstrahls.

Gewisse Lampen gestatten, daß man sie selbst dreht, so z. B. Langfadenglühlampen. Für solche haben die Photometerbänke in der Regel ein Stativ, das für Drehung der Lampe um ihre eigene Achse und um eine Achse senkrecht dazu eingerichtet ist.

(829) Aufnahme der Lichtverteilungskurve durch Drehspiegel. v. Hefner-Alteneck umgab die feststehende Lampe L , wie es in Abb. 486 gezeigt ist, mit einem Spiegel S , der um die Verbindungslinie zwischen Photometer P und Lampe drehbar ist. Das direkte Licht wird durch eine Blende d abgeschattet. Der Spiegel hat den Nachteil, daß die Strahlen nicht senkrecht auf den Photometerschirm auf treffen. — Einwandfrei in dieser Beziehung ist der von Ayrton vorgeschlagene Spiegel, der gemäß Abb. 487 angeordnet ist. Die Lichtquelle muß hierbei unter Beibehaltung ihrer Richtung im Raum mit dem Spiegel gleichzeitig gedreht werden, wozu eine besondere, hier nicht gezeichnete mechanische Vorrichtung dient. — Heute wird der Drehspiegel gewöhnlich nach der in Abb. 488 gezeichneten Weise, also mit drei Spiegeln, ausgeführt. Der Nachteil der dreifachen Spiegelung und damit größerer Verluste wird durch die Bequemlichkeit der Handhabung aufgehoben. Dieser Drehspiegel wird in Verbindung mit der Photometerbank oder einem Photometer der Weberschen Art benutzt.

(830) Bedeutung und Auswertung des Lichtverteilungskörpers und der Lichtverteilungskurve. Die Lichtstärke nach allen Richtungen hin muß man kennen,

wenn man die mit einer Lampe erzielbare Beleuchtungsstärke nach der Formel $E = (J/r^2) \cdot \cos i$ Punkt für Punkt berechnen will. Außerdem aber muß man die Lichtverteilung kennen, um den gesamten oder auch einen Teillichtstrom einer Lichtquelle unabhängig von der Ulbrichtschen Kugel zu bestimmen. Das tun zu können ist nötig, zum mindesten für die Lampe, mit der die Ulbrichtsche Kugel geeicht wird, abgesehen davon, daß die Ulbrichtsche Kugel nicht dafür geeignet ist, den in einen willkürlich gewählten Teil des vollen Raumwinkels strahlenden Lichtstrom zu messen.

Die Berechnung des Lichtstroms aus Lichtstärke und Raumwinkel, also aus der Formel $\Phi = \int J_{\omega} \cdot d\omega$, setzt eine Kenntnis der Funktion $J_{\omega} = f(\omega)$ voraus. Ist der Lichtverteilungskörper ein Rotationskörper, so liefert die Lichtverteilungs-

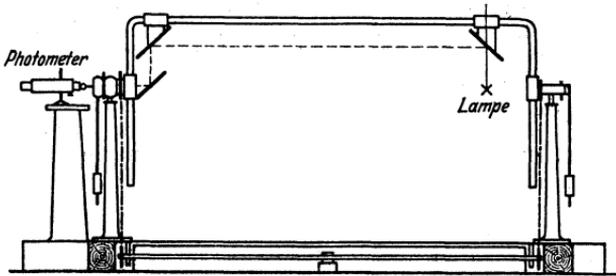


Abb. 488. Dreifacher Drehspiegel.

kurve diese Kenntnis: jede ihr entnommene Lichtstärke ist maßgeblich für einen gewissen Raumwinkel, der von zwei Breitenkreisen eingegrenzt wird. Die Größe eines solchen Raumwinkels ist gleich $2\pi \cdot \Delta \cos \alpha$, wenn der Winkel α vom Nadir ab gemessen ist. Diese $\Delta \cos \alpha$, also auch $\cos \alpha$ erscheinen auf der senkrechten Geraden in Abb. 489. Trägt man auf der Senkrechten zu dieser Geraden die zu einem bestimmten α gehörige Lichtstärke ab, so grenzt die Verbindungslinie der Endpunkte dieser Strecken mit der senkrechten Geraden eine Fläche vom Inhalt F_0 ab, für welche der Erklärung gemäß

$$F_0 = \int J_{\alpha} \cdot d \cos \alpha = \frac{1}{2\pi} \int J_{\omega} d\omega.$$

Es ist somit $\Phi_0 = 2\pi \cdot F_0$. In gleicher Weise ergibt sich für den unteren und oberen hemisphärischen Lichtstrom

$$\Phi_{\ominus} = \pi \cdot F_{\ominus}; \quad \Phi_{\Delta} = \pi \cdot F_{\Delta}.$$

Dieses graphische Verfahren zur Bestimmung des gesamten Lichtstroms stammt von R o u s s e a u. Es kann (nach B l o c h) durch ein Annäherungsverfahren ersetzt werden, nach welchem man den senkrechten Durchmesser des Kreises in 20 gleiche Teile teilt und hierdurch 20 $\Delta \cos \alpha$ von gleicher Größe herstellt. Halbiert man diese Teile und addiert die Lichtstärken, die in den zu den Halbierungsgraden gehörigen Winkeln ausgestrahlt werden, so hat man in der Summe das Zwanzigfache der mittleren sphärischen Lichtstärke. Die Summe der unteren Lichtstärken gibt das Zehnfache von J_{\ominus} .

Nicht also die etwa von der Lichtverteilungskurve eingeschlossene Fläche noch der Inhalt oder die Oberfläche des Lichtverteilungskörpers geben in irgendeiner Weise ein Maß oder einen Anhalt für die Größe des Lichtstroms, sondern erst die Flächen F , die sogenannten Rousseauschen Flächen. H a l b e r t s m a hat gezeigt, wie diese Flächen zur Analyse der Lichtverteilung verwertet werden können¹⁾.

¹⁾ H a l b e r t s m a, Lichttechnische Studien, Dissertation 1916. Leipzig, Hachmeister & Thal.

Abb. 489 zeigt, daß bestimmten Flächenwinkeln in der Nähe des Nadirs ein sehr kleiner, in der Nähe des Äquators ein sehr großer Raumwinkel entspricht; es hat also keinen Sinn, in der Nähe des Nadirs von 10° zu 10° in der Meridianebene messend voranzuschreiten, wenn dieser Winkelabstand in der Nähe des Äquators genügt; vgl. (827).

(831) Die **Verbandsvorschriften** für die Bewertung und Kennzeichnung der elektrischen Lampen vom Jahre 1922 fußen auf dem Vorangegangenen. Sie sind unter der Überschrift „Licht, Lampen, Beleuchtung“ als zweiter Abschnitt „Lampen“ veröffentlicht. Sie werden im folgenden wiedergegeben und mit einigen in eckigen Klammern zugefügten Bemerkungen erläutert.

1. Elektrische Lampen sind bezüglich ihrer Lichtleistung nach ihrem Lichtstrom zu bewerten. Er ist die für die Bewertung wichtigste Größe. [Damit wird die bis dahin bevorzugte Bewertung der Lampen nach ihrer Lichtstärke aufgegeben. Diese letztere Bewertung setzte ausdrückliches oder stillschweigendes Einverständnis darüber voraus, welche Lichtstärke, d. h. die Lichtstärke in welcher Richtung, als „Lichtstärke“ der Lampe gemeint sein sollte.]

2. Jede Lampe ist in betriebsmäßiger Ausrüstung zu messen. Die Art der Ausrüstung ist zu kennzeichnen. [Die Bestimmungen des VDE haben also offenkundig ein praktisches Ziel. Als betriebsmäßig wird man im allgemeinen die Ausrüstung bezeichnen, die zur Lampe ihrer Konstruktion nach als wesentlicher Bestandteil gehört; besonders wichtig ist die Ausrüstung bei Bogenlampen.]

3. Zur einfachsten Kennzeichnung der Lichtverteilung einer Lampe wird der nach oben und der nach unten gehende Lichtstrom in Hundertsteln des gesamten Lichtstromes dieser Lampe nach Art eines Bruches mit wagerechtem Bruchstrich angegeben. Die beiden Zahlen ergänzen einander also zu 100. Beispielsweise bedeutet 40/60, daß 40% des gesamten Lichtstromes in den oberen, 60% in den unteren Halbraum gestrahlt werden. [Dem Begriffe der einfachsten Kennzeichnung steht die im folgenden Punkte 4 gemeinte genaue Kennzeichnung gegenüber.]

4. Der Lichtstrom einer Lampe wird im allgemeinen in den verschiedenen Richtungen mit verschiedener Lichtstärke ausgestrahlt. Zur Kennzeichnung der Lichtausstrahlung einer Lampe (punktförmigen Lichtquelle) dient die Oberfläche eines Körpers, der entsteht, wenn man in räumlicher Darstellung auf jedem Strahl als Strecke die Lichtstärke in einem festgesetzten Maßstabe aufträgt und die Endpunkte verbindet. Bei Lampen mit axialsymmetrischer Verteilung genügt zu ihrer Kennzeichnung die Darstellung der Lichtverteilung in einer Meridianebene, die sogenannte **Lichtverteilungskurve** [siehe (826) bis (830)].

5. Die Lichtausbeute einer Lampe ist das Verhältnis des von ihr ausgestrahlten Gesamtlichtstromes in Lumen zur zugeführten Leistung in Watt (Lm/W). [Die Lichtausbeute wird hier an Stelle des früher allgemein gebrauchten Kehrwertes des spezifischen Verbrauches, gemessen in W/HK, gebraucht.]

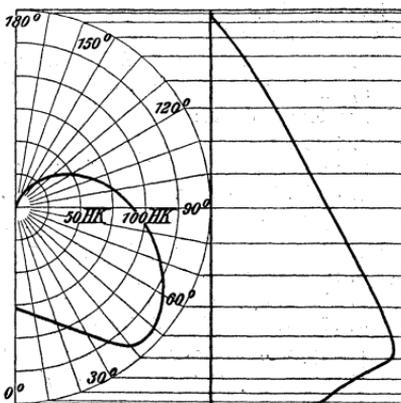


Abb. 489. Lichtverteilungskurve und Rousseausches Diagramm.

6. Unter Wirkungsgrad einer betriebsmäßigen Lampenausrüstung versteht man das Verhältnis zwischen den Lichtströmen der Lampe mit und ohne Ausrüstung. Die Angabe des Wirkungsgrades ist nur berechtigt, wenn über den Zweck, dem die Ausrüstung dienen soll, und über das Maß, in dem dieser Zweck erreicht ist, gleichzeitig ausreichende Angaben gemacht werden. Hierzu gehören mindestens die Kennzeichnung der Lichtverteilung (wenigstens gemäß 3) und die Angabe der Leuchtdichte, wie sie durch die Ausrüstung herabgemindert ist. [Werden keine Angaben über das Maß, in dem der Zweck der Ausrüstung erreicht ist, gemacht, so ist der Wirkungsgrad nicht nur wertlos, sondern irreführend; z. B. kann ein sehr schlechter Reflektor einen sehr hohen Wirkungsgrad haben (860).]

7. Kennzeichnung und Stempelung der Glühlampen.

a) Eine Glühlampe wird vom technisch-wissenschaftlichen Standpunkte aus gekennzeichnet durch:

1. ihre Spannung,
2. und 3. zwei der Größen Leistungsaufnahme, Lichtstrom und Lichtausbeute,
4. die Lebens- bzw. Nutzbrenndauer.

b) Auf der Lampe sind folgende Bezeichnungen fest anzubringen.

1. die Bestellspannung in V ,
2. ihr Verbrauch in W ,
3. ein Ursprungszeichen,
4. ein Zeichen, das die Lampenart nach 7a eindeutig kennzeichnet.

[Die Leistungsaufnahme N einer Glühlampe mit dem Widerstand R ist nach dem Gesetze $N = U^2/R$ von der Spannung U abhängig; sie kann (im Gegensatz zur Bogenlampe) mit der Spannung in sehr weiten Grenzen geändert werden. Bei zunehmender Spannung steigt in starkem Grade der Lichtstrom und die Lichtausbeute, während sowohl die Lebensdauer (bis zum Bruche des Fadens) als auch die Nutzbrenndauer (die Zeit bis zur Abnahme des Lichtstromes um 20%) stark abnimmt. Diese Beziehungen machen die geforderten vier Angaben nötig, wenn man eine Glühlampe kennzeichnen will. — Die Lampe wird für eine bestimmte Spannung, die Spannung des Elektrizitätswerkes, und eine bestimmte Leistungsaufnahme bestellt. Diese Leistungsaufnahme ist zunächst das Maßgebliche. Sie wird bei einer Spannung erreicht, die von der Bestellung um einige Prozent (je nach Vereinbarung) abweichen darf. — Das Ursprungszeichen und das letzte geforderte Zeichen sollen zum mindesten mit Hilfe der Preisverzeichnisse eine genaue Kennzeichnung gemäß 7a ermöglichen.]

8. Besonderheiten bei Bogenlampen.

a) Bogenlampen werden unterschieden als

Offene	Bogenlampen mit	über
Geschlossene	neben	einanderstehenden
Rein-	Kohlen für	Gleichstrom
Effekt-	Wechselstrom.	

b) Bei der Angabe des Leistungsverbrauches oder der Lichtausbeute ist die in den Vorschaltwiderständen, Drosselspulen, Transformatoren umgesetzte Leistung in der Weise mitzurechnen, daß der Gesamtverbrauch des Lampenstromkreises durch die Zahl der in ihm liegenden Lampen dividiert wird. Die Netzspannung ist mit anzugeben. [Auch in dieser Vorschrift drückt sich das praktische Ziel der Vorschriften des VDE aus.]

c) Angaben für Wechselstromlampen sind, wenn nichts anderes bemerkt ist, für sinusförmige Kurve der Betriebsspannung und eine Frequenz von 50 Per/S zu verstehen. In jedem Falle ist anzugeben, in welcher Schaltung die Lampe photometriert, und ob induktionsfreier oder induktiver Vorschaltwiderstand angenommen worden ist.

9. Besonderheiten bei Röhrenlampen.

Von Röhrenlampen solcher Länge, daß sie bei der Aufnahme der Lichtverteilungskurven nicht mehr als punktförmige Lichtquellen angesehen, oder in der Ulbrichtschen Kugel gemessen werden können, wird der von 1 cm ihrer Länge ausgesandte Lichtstrom angegeben. Zur Messung wird die Röhre so abgeblendet, daß ein Zylinder von höchstens 3 cm Länge freibleibt. [Vgl. Norden, ETZ. 1912.]

Literatur: Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik, 3. Auflage. — Nagel, Handbuch der Physiologie Bd. 3. — Liebenthal, Praktische Photometrie, Braunschweig 1907. — Uppenborn-Monasch, Lehrbuch der Photometrie, München 1912. — Lummer, Grundlagen, Grenzen und Ziele der Leuchttechnik, München 1918, S. 1...19 und 49...71. — Bloch, Lichttechnik. München 1921.

Die elektrischen Lampen.

(832) Die Erzeugung des elektrischen Lichtes. Bei der Erzeugung des Lichtes unterscheiden wir zwei Arten, das Temperaturleuchten und das Lumineszenzleuchten. Das Temperaturleuchten beruht auf der Erhitzung möglichst schwer schmelzbarer Stoffe, für die wir als Idealkörper den schwarzen Körper betrachten. Dieser ist nach dem Kirchhoffschen Gesetz dadurch gekennzeichnet, daß er bei allen Temperaturen für jede Wellenlänge den Höchstwert der Strahlung abgibt im Vergleich zu der Strahlung irgendeines anderen Körpers von der gleichen Temperatur und bei der gleichen Wellenlänge. Ein solcher Idealkörper besitzt das Absorptionsvermögen = 1 und sein Emissionsvermögen ist gleich dem Absorptionsvermögen.

Die Gesamtstrahlung setzt sich aus der unsichtbaren und sichtbaren Strahlung zusammen und ist ihrer Größe nach durch das Stefan-Boltzmannsche Gesetz und die Wien-Plancksche Strahlungsformel gegeben. Nach dem ersten ändert sich die Gesamtstrahlung mit der 4. Potenz der absoluten Temperatur, nach der zweiten ist die höchste Strahlungsenergie von der 5. Potenz der absoluten Temperatur abhängig. Besonders durch die Arbeiten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt sind die Strahlungsgesetze weiter entwickelt worden und die Energieverteilungskurven zeigen, wie der Höchstwert der Strahlung ein und desselben Körpers mit wachsender Temperatur steigt, während er gleichzeitig von größeren Wellenlängen im Bereiche der Wärmestrahlung nach den geringeren Wellenlängen im Bereiche der Lichtstrahlen, von $0,8 \mu$ für rot nach $0,4 \mu$ für violett hinstrebt.

Für unsere praktischen Lichtquellen fällt der Höchstwert der sichtbaren Strahlung allenfalls bis etwa auf $0,7 \mu$, ist also gerade in den Anfang der sichtbaren Strahlungsreihe eingedrungen. Da nun das menschliche Auge für eine Wellenlänge von $0,55 \mu$ (gelbgrün) die größte Empfindlichkeit besitzt, müßte demgemäß der Versuch gemacht werden, möglichst eine Lichtquelle für dieses Emissionsvermögen zu schaffen, wie es z. B. annähernd in dem früheren Bremerlicht für Bogenlampen mit Kohlen, die einen reichlichen Zusatz von Kalziumfluorid besaßen, geschehen ist.

Man unterscheidet den optischen Nutzeffekt der Gesamtstrahlung als das Verhältnis der in dem Bereich der sichtbaren Strahlung liegenden Energie zu der gesamten Energie gegenüber dem visuellen Nutzeffekt als dem Verhältnis der durch das menschliche Auge als Licht bewerteten Strahlung zur sichtbaren Strahlung oder zur Gesamtstrahlung. Den optischen Nutzeffekt bezeichnet man auch als energetische Ökonomie, den visuellen Nutzeffekt als photometrische Ökonomie. Nähere Zahlenangaben hierüber findet man in Blochs Lichttechnik in dem von Dr. A. R. Meyer bearbeiteten Abschnitt über wissenschaftliche Grundlagen der Lichterzeugung.

Aus weiteren Betrachtungen ergibt sich, daß die Lichttechnik in ihren Lichtquellen einerseits nach stetig höheren Temperaturen streben muß, um die Wirt-

schaftlichkeit der Energieumsetzung zu erhöhen, andererseits die Erzeugung unsichtbarer Strahlung soweit als irgendmöglich zu vermeiden suchen muß, da sie für ihre Zwecke unbrauchbar ist.

Glühlampen.

1. Glühlampen mit Kohlenfaden-Glühkörper.

(833) Konstruktion. Der Glühkörper wird aus reiner, künstlich hergestellter, strukturloser Zellulose gewonnen, indem die Lösung durch entsprechend feine Düsen gespritzt und als langer, feiner Faden hergestellt wird. Die entsprechenden Längen von gleichem Querschnitt werden über einem erwärmten Dorn in Bügel- oder Spiralförmig gebogen und in Kohlenretorten unter Luftabschluß bei hoher Weißglut in leitenden Zustand gebracht. Zum Ausgleich etwaiger Mängel in der Oberfläche und im Querschnitt werden sie weiter in Kohlenwasserstoffen zum Glühen gebracht (egalisiert). Das Einkitten der Fäden an der Stromzuführungs- und -ableitungsstelle macht große Schwierigkeiten, auch wegen des Kittes selbst. Der Glühkörper wird je nach seiner Länge auch noch im Innern der Glashülle verankert.

(834) Verhalten im Betrieb. Für die in der Praxis zugelassenen Spannungsschwankungen von $\pm 2\%$ zeigt die in wagerechter Richtung gemessene Lichtstärke einer 16 kerzigen Kohlenfadenglühlampe für normal 110 Volt eine Änderung von 14,5 auf 18 HK bei einer Änderung der Stromstärke von 0,50 auf 0,52 A, während eine entsprechende Lampe bei normal 220 Volt eine Stromstärke von 0,263 bis 0,278 A aufnimmt. Kohlenfadenlampen über 32 HK haben nur beschränkte Aufnahme gefunden.

2. Glühlampen mit Wolfram-Glühkörpern.

(835) Arten. Nachdem man erkannt hatte, wie die sichtbare Strahlung mit steigender Temperatur anwuchs und Mittel und Wege gefunden worden waren, sehr schwer schmelzbare Metalle wie Osmium, Tantal, Wolfram u. a. teils in fein verteiltem Zustande auf chemischem Wege, teils als feine Drähte auf elektrischem und mechanischem Wege zu gewinnen und zu Glühkörpern zu formen, hat die Einführung der Metallfaden- bzw. Drahtlampe einen gewaltigen Aufschwung in allen Ländern der Welt genommen.

A u e r v. W e l s b a c h spritzte aus einer knetbaren Masse von fein verteiltem Osmium und Kohle Fäden, aus denen er in Bügelform für etwa 30 V Metallbügel aus reinem Osmium herstellen konnte. Ihm folgte das Glühlampenwerk von S i e m e n s & H a l s k e und zog aus elektrisch niedergeschmolzenem, reinem Tantal lange feine Fäden und fand gleichzeitig eine Methode, um den langen Faden für 110 V und mehr in der kleinen Glühbirne auf einem Wickelgestell in einheitlicher Form unterzubringen. Diese Methode wird jetzt allgemein benutzt, um den später nach einem Ziehverfahren hergestellten Wolframfaden oder -draht zu einem Glühkörper zu formen.

(836) Wolframlampe. Der Glühkörper kann nach folgenden Verfahren hergestellt werden:

a) **Pasteverfahren.** Zunächst wird das fein gepulverte Wolframmetall durch ein zähflüssiges organisches Bindemittel, z. B. Gummi, Stärke, Zucker oder dgl., zu einer zähen Paste verrührt. Diese wird durch Pressen aus Düsen zu äußerst feinen Fäden geformt, die Fäden werden getrocknet und bei mäßiger Temperatur im Vakuum geglüht, wobei das Bindemittel verkohlt. Hierauf werden die Fäden in einer Atmosphäre, die große Mengen reduzierender Gase, z. B. Wasserstoff, neben geringen Mengen oxydierender Gase, z. B. Wasserdampf, enthält, mittels elektrischen Stromes unter allmählich gesteigerter Erwärmung, schließlich längere Zeit bei Weißglut erhitzt und hierdurch der reine Metallfaden erhalten.

b) **Kolloidverfahren.** Das Wolframmetall wird zunächst in den kolloidalen Zustand übergeführt, z. B. indem ein Lichtbogen zwischen Elektroden aus Wolframmetall unter Wasser gebildet wird (Bredig, Zeitschr. f. Elektrochem. 1898, S. 514). Das hierbei nach Ausdrücken des Wassers erhaltene homogene und plastische Wolfram-Kolloid wird durch feine Düsen zu Fäden gepreßt. Die Fäden werden in einer gegen Oxydation schützenden Atmosphäre, z. B. Wasserstoff, mittels elektrischen Stromes allmählich auf Weißglut gebracht, wobei sie sintern und zum metallischen Leiter in Form eines feinen elastischen Fadens werden.

c) **Ziehverfahren.** Pulverförmiges Wolframmetall oder ein Wolframmat, insbesondere Nickelwolframmat, wird mit einem Zusatz eines leichter schmelzbaren Stoffes, z. B. Nickel in etwa 5 bis 20%, innig gemischt und gewalzt und läßt sich nun zu feinem Draht ziehen. Hierauf wird der Zusatz z. B. durch elektrische Erhitzung im Vakuum ausgetrieben und hierdurch der reine gezogene Faden aus Wolframmetall erhalten.

d) Das Ziehen des Wolframdrahtes kann auch ohne Beimengung anderer Stoffe erfolgen, indem man Wolframtrioxyd zu feinem Wolframpulver reduziert, dieses unter sehr hohem Druck zu Stäben preßt, in einem Formiergas unter starkem Schwinden glüht und aus dem sehr harten Wolframstab feine Fäden zieht (engl. Patent 23499/1909).

e) Die Pintsch A.-G. läßt einen gespritzten Wolframfaden in einer entsprechenden Atmosphäre so schnell und bei solcher Erhitzung ablaufen, daß die Kristallbildung als sechskantige Säule fortlaufend stattfindet und der Faden als eine Art endloser Kristall entsteht.

Andere als Glückkörper vorgeschlagene, besonders schwer schmelzbare Metalle haben bisher keine Einführung gefunden.

Für eine Spannung von 110 V lassen sich Wolframlampen bis herab auf etwa 6 HK herstellen, während die Lichtstärke aufwärts bis etwa 4000 HK geht. Bei der Herstellung der Wolframlampen für hohe Lichtstärken ist man dazu übergegangen, den langen, geradlinig ausgespannten Draht in sehr feine, enge Spiralen zu wickeln, die gut verankert sind. Dies ergibt die sogenannten Spiraldrahtlampen; und weiter braucht man die Glaslocken der Lampen nicht luftleer zu pumpen, sondern füllt sie mit indifferenten Gasen wie Stickstoff bei etwas unter Atmosphärendruck und erhält alsdann gasgefüllte Lampen. Somit unterscheidet man die einfache Drahtlampe als Vakuumlampe mit lang ausgespanntem Metallfaden, die Spiraldrahtlampe als Vakuumlampe mit Spiraldraht, die Gasfüllungslampe als Spiraldrahtlampe in indifferentem Gas. Die Zerstäubung des Fadens bei hohen Temperaturen wird durch den höheren Druck in der Lampenglocke verhindert, dadurch aber werden zugleich die Wärmekonvektion und die Energieverluste vermehrt. Der Wärmeverlust durch Konvektion steigt rund mit der 1,5. Potenz der Fadentemperatur; dagegen steigt der Lichtstrom etwa mit der 4,7. Potenz; aber der einfache gerade Faden brennt schnell durch. Da nun der Wärmeverlust durch Konvektion bei dünnen Drähten und hohen Temperaturen fast ebenso hoch wie bei dicken Drähten ist, wirken die Gase bei dünnen Drähten viel stärker kühlend als bei dickeren Drähten. Deshalb stellt man scheinbar dicke Glückkörper durch Aufwickeln dünner Drähte zu engen Spiralen her und erhält so die Halbwattlampen. Die Spiraldraht- und gasgefüllten Lampen haben einen überhitzten Faden und dementsprechend einen geringeren spezifischen Verbrauch, aber auch eine geringere Lebensdauer als die gewöhnlichen Drahtlampen.

Bei der Herstellung der Lampen ist sorgfältig darauf zu achten, daß jede Spur von Wasserdampf beseitigt wird. Dieser würde bei der hohen Temperatur des Glückkörpers in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt werden, der Sauerstoff oxydiert sofort das Wolfram, die Verbindung von Wolframoxyd schlägt sich an der inneren Wandung der Lampenglocke nieder, wird durch den freien Wasserstoff zu reinem Wolfram desoxydiert und der wieder erzeugte Wasserdampf beginnt in diesem sich

stetig wiederholenden Wassergasprozeß seine Zerstörungen von neuem und beeinträchtigt die Lebensdauer der Lampe.

Der spezifische Verbrauch der gewöhnlichen Wolframlampen liegt bei 1,0 bis 1,35 W/HK und kann rund mit 1,25 W/HK angenommen werden; derjenige der sogenannten Halbwattlampen liegt bei 0,6 bis 0,7 W/HK. Die Lebensdauer der ersteren beträgt etwa 1000 h, die der zweiten etwa 500 h.

Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse und spezifischen Verbrauch der gewöhnlichen Wolframlampe bei veränderlicher Spannung zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1. Wolframlampe.

Lampen- sorte	V	A	HK	W/HK
Normal 50 HK 220 V	160	0,262	14	3,0
	180	0,281	23	2,2
	200	0,315	37	1,7
	210	0,317	47	1,4
	220	0,319	54	1,3
	230	0,321	67	1,1
	240	0,325	78	1,0
	260	0,392	113	0,9
	280	0,477	167	0,8

Da die Wolframlampe im Gegensatz zu der Kohlenfadenlampe keinen negativen, sondern einen positiven Temperaturkoeffizienten hat, ist die Stromstärke bei dem Einschalten der Lampe größer als die Betriebsstromstärke bei normaler Glühtemperatur. Der Anlaufstrom beträgt rund zehnmal so viel. Aber wegen der geringen Wärmekapazität des Glühkörpers stellt sich die Betriebsstromstärke bereits im Laufe von etwa 0,1 s her, so daß die Stromstöße im Netz den Betrieb nicht stören.

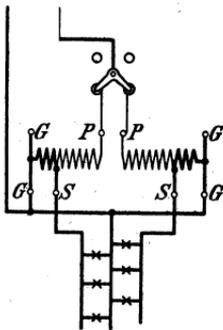


Abb 490. Kleintransformatorschaltung.

(837) Metallfadenlampen mit Spartransformatoren.

In Wechselstromnetzen lassen sich Lampen von geringer Lichtstärke und Spannung mit Vorteil verwenden, da solche Lampen mit dem kürzeren und festeren Faden eine größere mechanische Festigkeit besitzen als die Lampen von geringer Lichtstärke und hoher Spannung. Die Lampen werden je nach der geforderten Spannung parallel an einen Teil einer an die volle Netzspannung gelegten, entsprechend gebauten Drosselspule (Reduktor, Divisor, Kleintransformator) gelegt. Der Leerlauf solcher Transformatoren wird dadurch ver-

mieden, daß sie im primären Stromkreis ein- und ausgeschaltet werden, wie dies aus der Abb. 490 zu ersehen ist. *PP* stellt den Anschluß primär, *SS* den Anschluß sekundär und *GG* den gemeinsamen Anschluß an das Netz dar.

4. Vergleich der verschiedenen Glühlampen.

(838) Abhängigkeit der Lichtstärke und des spezifischen Verbrauches von der Brennzeit. Die Kurven in Abb. 491 und 492 zeigen den Verlauf für Kohlenfaden- und Wolframlampen. Die Nutzbrenndauer für den Kohlenfaden ist wesentlich geringer als für den Wolframfaden, während der spezifische Verbrauch und

damit der Gesamtverbrauch bei gleicher Lichtstärke über dreimal so hoch liegt und im Laufe der Zeit stärker wächst.

Auch die Beziehungen zwischen Lichtstärke und Effektverbrauch, Lichtstärke und Spannung, sowie Spannung und Effektverbrauch sind untersucht worden (M o n a s c h, Elektrische Beleuchtung 1910, II. Teil, S. 74 und 75).

(839) Prüfung der Glühlampen.

Zur Prüfung einer Glühlampensorte wird man etwa 20% der Lieferung untersuchen und diese Untersuchung auf die elektrischen, photometrischen und mechanischen Eigenschaften erstrecken. Bei der vorgeschriebenen Spannung wird die Stromstärke, der Energieverbrauch und die Lichtstärke und daraus der spezifische Verbrauch oder besser nach Einführung des Lichtstromes der spezifische Lichtstrom, also die Lm/W bestimmt. Zur Messung der Lichtstärke wird je nach den Umständen entweder die mittlere horizontale Lichtstärke rechtwinklig zur Hauptachse der Lampe oder die sphärische Lichtstärke mittels der Ulbricht schen Kugel gemessen. Für einen Teil der Lampen wird eine Dauerprüfung für die Lebensdauer ausgeführt.

Die Fäden der Lampen sind auf Gleichmäßigkeit in der Oberfläche und im Querschnitt zu prüfen. Eine schlechte Luftleere gibt sich bei Kohlenfadlampen durch die Trägheit der Schwingungen zu erkennen, wenn man die Lampe erschüttert.

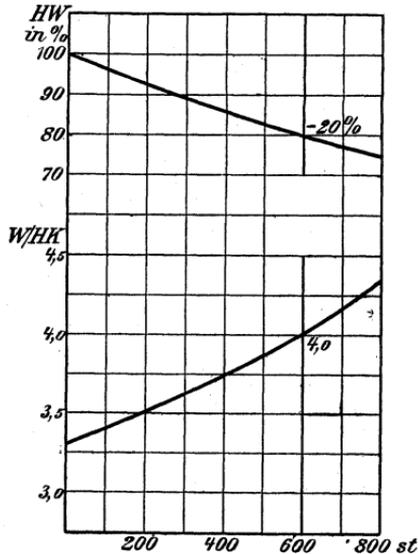


Abb. 491. Lichtstärke und spezifischer Verbrauch der Kohlenfadlampe.

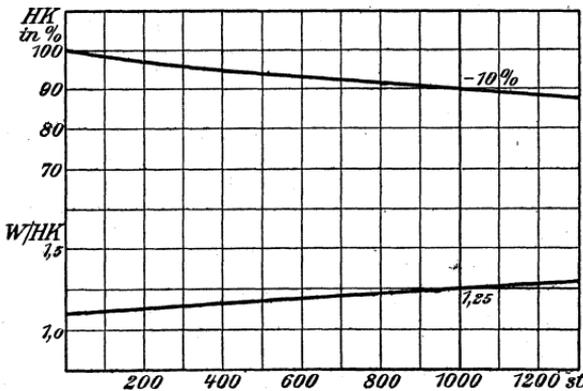


Abb. 492. Lichtstärke und spezifischer Verbrauch der Wolframlampe.

Die Prüfung der Luftleere geschieht mittels eines Induktoriums oder eines Wehnelt- oder Tesla- Apparates im elektrischen Felde. Eine mangelhafte Luftleere zeigt ein weißliches Aufleuchten. Anwesenheit von Stickstoff gibt sich

durch rötliche Färbung zu erkennen. Mangelhaftes Einschmelzen oder minderwertige verarbeitete Stoffe erzeugen ein „Nachziehen“ der Lampen.

(840) Wirtschaftlicher Betrieb. Selbst bei höheren Anschaffungskosten der Metallfadenlampen sind diese den Kohlenfadenlampen überlegen, wie eine einfache Rechnung und vor allem ihre praktische Einführung beweist. In der Größe des Lichtstromes sind die Grenzen viel weiter als für Kohlenfadenlampen und die ursprüngliche Befürchtung wegen der mangelnden Festigkeit der Glühkörper ist vor allem durch die gute und einfache Verankerung der Fäden in den Spiraldrahtlampen beseitigt, so daß dieselben mit vollem Erfolg auch in den Betrieb von Schiffen Einführung gefunden haben.

Bogenlampen.

1. Bogenlampen mit Lichtbogen im luftleeren Raum.

(841) Quecksilberdampfampe. Die Erregung der Strahlung in der Quecksilberdampfampe beruht auf einem gleichzeitigen Temperatur- und Lumineszenzleuchten. Der Brenner besteht aus einer Quarzröhre, da diese eine höhere Beanspruchung als Glas zuläßt und außerdem die reichlich vorhandenen violetten und ultravioletten Strahlen durchläßt. Als Kathode dient Quecksilber, als Anode eine Eisenelektrode. Wegen des Fehlens der roten und gelben Strahlen hat die Lampe nur beschränkte Anwendung gefunden. Das Zünden der Lampe geschieht durch Kippen auf elektromagnetischem Wege. Der beim Hinüberfließen des Quecksilbers entstehende Kurzschluß und darauf folgende Lichtbogen dient zur Ionisierung der Gasstrecke. Die nachstehende Zusammenstellung zeigt das Verhalten im Betrieb.

Tabelle 2. Quecksilberdampfampe.

Lampenart	Betriebs- Spannung V	Lichtbog- Spannung V	A	HK	W/HK
Quarzlampe mit Klarglas- glocke	110	85	4	1200	0,37
	220	160	2,5	1500	0,37
	220	180	3,5	3000	0,26

Der Vorteil der Lampe besteht darin, daß sie an kein Regelwerk gebunden ist, also gleichmäßig strahlt, daß kein Verbrauch an Stoffen stattfindet, und daß die Bedienungskosten bis auf das Putzen der Außenglocke gering sind. Bei der Betätigung an der Lampe schützt man Augen und Haut vor dem zerstörenden Einfluß der ultravioletten Strahlen, die für chemische und medizinische Zwecke Verwendung finden.

2. Bogenlampen mit Kohlenstiften.

(842) Konstruktion. Die Verwendung von Bogenlampen zur allgemeinen Beleuchtung, namentlich von Straßen, freien Plätzen, großen Hallen usw., ist durch die Entwicklung der Spiraldrahtlampen für großen Lichtstrom stetig zurückgetreten. Das Werk der Lampen, das die Zündung und den Nachschub der verbrennenden Kohlenstifte zu besorgen hat, ist meistens als Differentialwerk ausgebildet, indem ein im Nebenschluß zum Lichtbogen liegender Elektromagnet durch Betätigung eines Ankers auf konstante Spannung, und ein im Hauptschluß liegender Elektromagnet durch Beeinflussung desselben Ankers auf konstante Stromstärke zu regulieren sucht. Derartige Lampen können bei 110 Volt zu dreien in Reihe brennen.

(843) **Elektroden.** Als Elektroden werden heutigentags Reinkohlen fast nur noch für Bild- und Scheinwerferlampen benutzt; sonst sind es Effektkohlen, die als Dochtkohlen mit Leuchtzusätzen aus den Fluoriden von Kalzium, Strontium, Barium, Lantan usw. hergestellt werden. Dabei wird der Docht so stark gewählt, daß er nur noch von einem schwachen, äußeren Mantel aus reiner Kohle zusammengehalten wird. Zur Verbesserung der Leitfähigkeit wird ein Zinkdraht eingezogen.

(844) **Bogenlampenarten.** Man unterscheidet Lampen mit offen brennendem Bogen unter freiem Luftzutritt, und Lampen mit geschlossen brennendem Bogen unter stark vermindertem Luftzutritt. Erstere brennen teils mit übereinander, teils mit schräg nebeneinander stehenden Kohlen, letztere nur mit übereinander stehenden Kohlen. Bei diesen ist es schwer, die aus den Leuchtzusätzen entstehenden Verbrennungsrückstände so in den oberen und unteren Teil der Lampe abzuleiten, daß die Lichtausstrahlung nicht durch Beschlagen der Glocke leidet. Durch Anwendung einer Doppelglocke mit einer stehenden Luftschicht ist dies ziemlich gut gelungen. Es haben sich daraus die Flammenbogenlampen mit eingeschlossenem Lichtbogen als Dauerbrandlampen herausgebildet.

(845) **Spannung und Lichtstrom.** Die Flammenbogenlampen brennen mit Spannungen von nahe an 50 V und haben einen spezifischen räumlichen Lichtstrom von etwas über 30 Lm. Diesem Wert entspricht ein spezifischer Verbrauch von rund 0,2 W/K_l.

(846) **Ausrüstung.** Die Bogenlampen werden mit mattierten oder meistens opalisierten Glocken und Reflektoren ausgerüstet, um zunächst die Leuchtdichte des Flammenbogens auf der größeren Oberfläche der lichterstreuenden Glocke zu verkleinern. Allerdings tritt dadurch eine Schwächung des Lichtstromes um 20 bis 40 v. H. ein. Durch den Reflektor wird der über der wagerechten Richtung entweichende Lichtstrom für den unteren Raum nutzbar gemacht. Durch besondere Gläser und Spiegelreflektoren (Wiskottreflektoren) erreicht man die Wirkungen für Tief-, Breit- und Hochstrahler.

(847) **Bogenlampen und Spiraldrahtlampen.** Wie bereits erwähnt, hat die Anwendung der Bogenlampe eine starke Einschränkung durch die Metallfadenlampe als Spiraldrahtlampe erfahren. Im allgemeinen wird man Bogenlampen nur noch in Bahnanlagen, verkehrsreichen Straßen und großen Plätzen und Hallen neben der Verwendung in Bild- und Scheinwerfern benutzen. Dazu kommt, daß in vielen Fällen die Netzspannung durch einzeln brennende Metallfadenlampen, die keinen Störungen durch das Regulierwerk unterworfen sind, besser ausgenutzt werden kann. Weiter erniedrigen sich die Kosten durch die lange Brenndauer der Glühlampen ohne Bedienung; die Reinigung und der etwaige Bruch der Glocken sowie der Ersatz der Kohlenstifte fallen fort. Auch die Möglichkeit der Unterteilung und Verteilung der Glühlampen bietet oft Vorteile gegenüber einzelnen Bogenlampen für eine gleichmäßigere Beleuchtung. Dies sind Fragen, die für jeden einzelnen Fall zu erwägen sind.

Glimmlampen.

(848) **Moore-Licht.** Während der Lichtstrom der Glühlampen auf reinem Temperaturleuchten, derjenige der Quarz- und Bogenlampen mit Flammenbogen sowohl auf Temperatur- als auch Lumineszenzleuchten beruht, wird das Leuchten in den Glimmlampen wie in den Geislerschen Röhren fast nur durch Lumineszenz erzeugt. Die in hohem Grade von der Stärke der Luftleere abhängige Leitfähigkeit der verschiedenen Gase wurde von Moore verwendet, um Gassäulen von 40—60 m Länge bei Wechselstromspannungen von 15 000 und mehr Volt zum Leuchten zu bringen, indem er die langen Röhren mit Stickstoff oder Kohlensäure oder anderen Gasen füllte. Wegen des Hartwerdens der Röhren während des Betriebes konstruierte er ein sinnreiches Ventil, durch dessen Betätigung der Druck für die Gassäule fast gleichbleibend erhalten wurde. Die Entwicklung dieser vereinzelt ausgeführten größeren Anlagen hat zum Bau kleiner Glimmlampen geführt, die bei den üblichen Netzspannungen in Gleich- und Wechselstromanlagen brennen.

(849) Glimmlampen. Bei den Glimmlampen wird das negative Glimmlicht, das von der Kathode ausgeht, benutzt, um in kleinen Kugellampen die Gassäule zwischen einer Platte und einem Draht, die in Form von Halbkugeln, flacher Buchstabenform oder sonstige ausgebildet sind, zum Leuchten zu bringen. Je nach der Gasart, vor allem Edelgasen (Neon, Helium, Argon u. a.) und deren Mischungen auch mit Quecksilberdampf, entstehen verschiedene Färbungen von violett bis zum gesättigten Rot (Pintsch, Neonlampe). Neuerdings baut die Osram G. m. b. H. (Dr. Skaupy) Leuchtröhren für die Darstellung einzelner Buchstaben und für sonstige Reklamezwecke, in denen nicht das negative Glimmlicht, sondern das positive Glimmlicht für Leuchtzwecke in verschiedenen Farben benutzt wird. Die einzelnen mit Wechselstrom hoher Spannung betriebenen Röhren sollen bei einem spezifischen Verbrauch von 1 W/K einige tausend Stunden leuchten, ohne hart zu werden. Bei den neueren kleinen Glimmlampen ist die Zündspannung bis auf 90 Volt Gleichstrom herabgebracht worden, so daß die Lampen bei 110 Volt Netzspannung sicher zünden. Für die Allgemeinbeleuchtung finden die Lampen noch keine Einführung wegen ihres kleinen Lichtstromes und ihres hohen spezifischen Verbrauches.

Neuere Literatur über elektrische Beleuchtung: Heinke und Ebert, Handbuch der Elektrotechnik. 1904, Bd. I, 2. — J. Zeidler, Die elektrischen Bogenlampen. 1905. — Wedding, Über den Wirkungsgrad und die praktische Bedeutung der gebräuchlichsten Lichtquellen. 1905. — Biegon von Czudnochowski, Das elektrische Bogenlicht. 1906. — Herzog und Feldmann, Handbuch der elektrischen Beleuchtung. 1907. — Vogel, Die Metalldampflampen mit besonderer Berücksichtigung der Quecksilberdampflampen. 1907. — Bloch, Grundzüge der Beleuchtungstechnik. 1907. — Weber, Die Kohlenglühfäden für elektrische Glühlampen. 1907. — Weber, Die elektrischen Kohlenglühfadenlampen, ihre Herstellung und Prüfung. 1908. — Biscan, Elektrische Lichteffekte. 1909. — B. Monasch, Elektrische Beleuchtung, 1910. — Weber, Die elektrischen Metallfadenglühlampen. 1914. — J. C. Pole, Die Quarzlampe. 1914. — N. L. Müller, Die Fabrikation und Eigenschaften der Metalldrahtlampen. 1914. — O. Lumer, Grundlagen, Ziele und Grenzen der Leuchttechnik. 1918. — Halbertsma, Fabrikbeleuchtung. 1918. — Heyck u. Högner, Projektierung von Beleuchtungsanlagen. 1919. — Zeitschrift für Beleuchtungswesen, Heizungs- u. Lüftungstechnik 1894—1922. — Bloch, Lichttechnik. 1921. — A. R. Meyer, Die Bewertung des Lichtes elektrischer Glühlampen. 1922. — Schröter, Lumineszenzerscheinungen und ihre Beziehungen zur Technik. 1923. — Skaupy, Licht und Lampe. 1923. — Licht und Lampe, Rundschau für die Beleuchtungsindustrie.

Beleuchtungsanlagen.

1. Güte der Beleuchtung.

(850) Begriff der Beleuchtungsgüte. Die Beleuchtung eines geschlossenen oder freien Raumes nennen wir gut, wenn durch sie die Gegenstände der Umwelt dem Auge deutlich und gefällig in die Erscheinung treten. Dazu gehört erstens, daß die Beleuchtungsstärke auf allen Stellen des Raumes und in allen oder vielen Ebenen einen angemessenen Wert habe, zweitens also auch eine gewisse Gleichmäßigkeit aufweise, drittens, daß Licht und Schatten, und zwar sowohl Eigenschatten und Schlagschatten, wirkungsvoll verteilt sind, viertens, daß das Auge durch die Beleuchtung und die Mittel dazu nicht gestört, vor allen Dingen nicht geblendet wird, und zwar weder durch die Lampen selbst noch durch Reflexe von den beleuchteten Gegenständen, und schließlich fünftens, daß die Farben deutlich unterschieden werden, wenn auch nicht so wie bei Tageslicht, so doch in einer das Auge befriedigenden Weise. Endlich muß sechstens von einer guten Beleuchtung gefordert werden, daß sie ruhig, also zeitlich gleichmäßig sei.

(851) Stärke und Gleichmäßigkeit der Beleuchtung. Bei der Bemessung der Beleuchtungsstärke ist zu beachten, daß sie nur der eine Faktor zur Hervorrufung einer gewünschten Leuchtdichte ist, während der andere Faktor durch die Eigenart der sichtbar zu machenden Körper, nämlich durch das Reflexionsvermögen der Oberflächen gegeben ist. — Die Tabellen über die zu fordernden Beleuchtungsstärken nehmen hierauf nur sehr wenig, nämlich nur durch gelegentliche Angaben,

daß man an die Betrachtung von dunklen oder hellen Gegenständen gedacht habe, Rücksicht. Man fordert für

Magazine, Treppen, Gänge	3 bis 6 Lux,
Grobe Arbeiten	15 bis 30 Lux,
Feine Arbeiten	40 bis 70 Lux,
Besondere Feinarbeiten	120 bis 180 Lux,

Für öffentliche Verkehrsbeleuchtung werden meist gefordert für

Hauptstraßen mit starkem Verkehr . . .	3 bis 6 Lux,
Nebenstraßen mit stärkerem Verkehr . .	1,5 bis 3 Lux,
Nebenstraßen mit schwachem Verkehr . .	0,5 bis 1 Lux.

Diese und ähnliche Tabellen sind auch deshalb unzulänglich, weil sie entweder nichts über die Richtung der Ebene aussagen, in der die Beleuchtungsstärke gemessen werden soll, oder nur die sogenannte Meßebene, nämlich die Horizontal-ebene in 1 m Höhe über dem Fußboden als allein maßgeblich annehmen.

Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke ist das Verhältnis der geringsten zur größten Beleuchtungsstärke auf irgendwelchen dem Auge sich darbietenden Flächen. Sie wird bestimmt durch die Eigenschaften und die Schlagschatten der Körper und durch die Flächenlichtstromdichten, die an irgend welchen Stellen des Raumes auf einer irgendwie geneigten Ebene auch bei weggedachten Eigen- und Schlagschatten eines etwa vorhandenen Körpers herrschen würden. Bei der Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke spielt vor allem dieser letzte Einfluß eine Rolle. Die auf ihm beruhende Gleichmäßigkeit soll vor allem groß genug sein und die Abweichungen nicht so entschieden und plötzlich sein, daß den natürlichen Kontrasten durch Eigen- und Schlagschatten stark entgegen-gewirkt und dadurch die Erkennbarkeit vermindert würde; siehe (858).

(852) Schattigkeit¹⁾. Die Verteilung von Licht und Schatten dient besonders dazu, Kontraste (804) in der Leuchtdichte auf der Oberfläche der Körper hervor-zurufen; nur durch solche Kontraste können wir wahrnehmen und erkennen. Die Beleuchtung eines Raumes durch eine einzige Lampe bringt bestimmte Eigen- und Schlagschatten und um so schärfer begrenzte hervor, je konzentrierter, punktförmiger das Licht der Lichtquelle ist („direktes Licht“). Bei zwei oder mehreren derartigen Lichtquellen können die Schatten sehr verwirren. Die Schatten werden gemildert, aufgehellt und vor allen Dingen ihre Schärfe beseitigt durch Hinzufügung großflächiger Leuchtung, wie sie sich durch die Reflexion von Decke und Wänden von selbst ergibt („halbindirektes Licht“). Beleuchtet man nur durch diese Reflexion (durch Ablendung direkten Lichtes), so erhält man durch dieses „ganz indirekte Licht“ eine fast schattenlose Beleuchtung, in der die Gegenstände im allgemeinen weder deutlich noch insbesondere gefällig in die Erscheinung treten.

(853) Blendung. Ein großer Feind einer guten Beleuchtung ist die Blendung, die auf zu großer Leuchtdichte der Lampen oder im reflektierten Licht leuchtender Gegenstände beruhen kann. Die Lampen müssen so ausgebildet sein (860), daß ihre Leuchtdichte mäßig ist, und unter Umständen so gehängt sein, daß sie nicht in den sogenannten Blendungswinkel des Auges treten.

(854) Lichtfarbe. Die Farben, in der die Körperoberflächen erscheinen, ändern sich, — viel mehr, als man sich dessen im allgemeinen bewußt ist — mit der Farbe des Körper bestrahlenden Lichtes; schon im Sonnenlicht sind die Körperfarben anders als im Lichte des bedeckten Himmels. Das Auge, hieran gewöhnt, verlangt beim künstlichen Lichte im allgemeinen auch gar nicht denselben Farbeindruck wie beim Tageslicht. Nur in besonderen Fällen werden Einrichtungen zur Herstellung künstlicher Beleuchtung in der Farbe des Tageslichtes (bei bedecktem Himmel) gefordert.

¹⁾ Norden, ETZ 1911, Heft 25, Ztschr. f. Beleuchtungswesen 1919, S. 11, 1920 S. 73, 1921 S. 109, Licht und Lampe 1923, S. 470 und S. 207.

(855) **Ruhe der Beleuchtung.** Die Beleuchtungsstärke muß auf allen beleuchteten Flächenteilen, die ihre Lage oder ihren Ort nicht ändern, zeitlich gleichmäßig sein; man spricht von ruhigem oder unruhigem Lichte. Störend ist eine einmalige Änderung der Beleuchtungsstärke, wenn sie schnell ist, wenn „das Licht zuckt“. Viel störender aber sind periodische Schwankungen, wie sie z. B. vorkommen, wenn ein elektrischer Generator durch eine Arbeitsmaschine mit geringem Gleichförmigkeitsgrad (z. B. einem Gasmotor) angetrieben wird. Bei bewegten Gegenständen können durch stroboskopische Wirkung Beleuchtungsschwankungen störend bemerkbar werden, die bei ruhenden Körpern nicht wahrgenommen werden können. Bei der Festsetzung der Frequenz des Wechselstromes zur Beleuchtung ist hierauf Rücksicht genommen; bei 50 Per/s kommt es nur ausnahmsweise zu solchen störenden Erscheinungen, bei Bahnstrom von 25 oder $16\frac{2}{3}$ Per/s sind sie häufig.

2. Berechnung der Beleuchtungsstärke.

(856) **Punktweise Berechnung der Beleuchtungsstärke auf Ebenen.** Von den Richtungen, die beleuchtete Ebenen im Raume und relativ zur Lichtquelle einnehmen können, sind drei besonders bevorzugt: die zum Lichtstrahl normale Ebene, die Horizontalebene und die Vertikalebene. Dieser Dreierheit entsprechend unterscheidet man erstens die Normalbeleuchtung (Abb. 492)

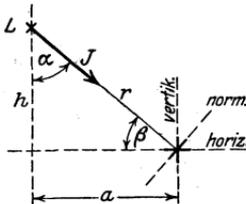


Abb. 492. Normal-, Horizontal- und Vertikal-Beleuchtung.

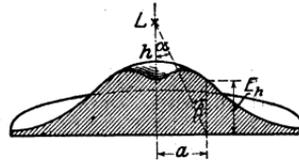


Abb. 493. Fläche der Beleuchtungsstärke.

$$E_n = \frac{J}{r^2},$$

die Horizontalbeleuchtung

$$E_h = \frac{J}{r^2} \cdot \cos \alpha = \frac{J \cdot h}{(a^2 + h^2)^{3/2}} = \frac{J}{h^2} \cdot \cos^3 \alpha,$$

die Vertikalbeleuchtung

$$E_v = \frac{J}{r^2} \cdot \cos \beta = \frac{J \cdot a}{(a^2 + h^2)^{3/2}} = \frac{J}{a^2} \cdot \cos^3 \beta.$$

Welche von diesen Formeln für E_h und E_v man benutzen will, hängt davon ab, ob man mit dem Rechenschieber allein rechnet (mit dem $[h^2 + a^2]^{3/2}$ leicht zu berechnen ist), oder ob man graphisch arbeitet (wobei $\cos^3 \alpha$ durch dreimalige Kosinusprojektion leicht zu ermitteln ist), oder ob man eine Tabelle der $\cos^3 \alpha$ zur Verfügung hat. Die Formel mit h und a empfiehlt sich auch deshalb, weil h immer gegeben ist und E zweckmäßigerweise immer für einen bestimmten Abstand a berechnet wird. Rechnet man für eine horizontale Ebene die Beleuchtungsstärke für Punkt aus und trägt die Beleuchtungsstärken maßstäblich auf der Ebene auf, so erhält man über der Ebene die Fläche der Beleuchtungsstärke, wie sie in Abb. 493, durch eine durch den Lichtquellpunkt gehende Vertikalene halbiert, dargestellt ist.

(857) **Berechnung der Beleuchtungsstärke aus Lichtstrom und Fläche (Lichtstromverfahren).** Die Verwendung der Flächenbeleuchtungsformel (809 c) setzt die Kenntnis des Lichtstroms Φ voraus, der die Fläche F trifft. Je nach dem

Wege, auf dem man zu dieser Kenntnis gelangt, kann man zwei „Lichtstromverfahren“ zur Berechnung der (mittleren) Beleuchtungsstärke unterscheiden.

a) **Lichtstromverfahren von Bloch.** Wenn erstens die zu beleuchtende Fläche eine Kreisebene ist, wenn zweitens der Lichtverteilungskörper axialsymmetrisch ist und drittens Lampe und Kreisebene einander so zugeordnet sind, daß die Drehachse des Lichtverteilungskörpers durch den Mittelpunkt des Kreises geht und auf der Kreisebene senkrecht steht, so strömt der Lichtstrom Φ in einen senkrechten Kreiskegel mit dem halben Spitzwinkel α , und Φ und F sind einfache Beziehungen dieses Winkels. Die jedem Winkel α zugehörigen Werte von Φ kann man aus der Lichtstrom- (Integralkurve der Rouseauschen) Kurve (830) entnehmen. Welcher Winkel α einer bestimmten zu beleuchtenden Kreisebene F mit dem Radius r zugehört, ist durch die beiden Formeln $r = \sqrt{F/\pi}$ und $\operatorname{tg} \alpha = r/h$ ausgedrückt. Bloch hat dieses Verfahren ausführlich durchgebildet und auch als Annäherungsverfahren auf rechteckige Ebenen ausgedehnt, indem er die Rechtecke in Kreise von gleichem Inhalt umwandelt¹⁾.

b) **Raumwinkelkugel und Raumwinkelpapier von Teichmüller.** Eine Glaskugel (Abb. 494) trägt auf ihrer Oberfläche ein Netz, dessen Striche durch eine kleine Glühlampe in der Mitte der Kugel als Schatten projiziert werden. Jedes Viereck auf der Kugeloberfläche entspricht zehn „Raumgrad“, wenn ein Raumgrad der tausendste Teil der natürlichen Einheit des Raumwinkels ist, von denen der volle Raumwinkel 4π an Zahl hat.

Um den Raumwinkel zu bestimmen, der von einer beliebig gestalteten und zur Lichtquelle beliebig gelagerten Fläche festgelegt wird, bringt man das Glühlämpchen in der Kugel an die Stelle der Lichtquelle und zählt die auf die Fläche ganz oder (unter Abschätzung in Raumgraden) nur teilweise projizierten Bogenvierecke; dann hat man den von der Fläche F überspannten Raumwinkel in Raumgraden oder, durch 100 dividiert, in natürlichen Raumwinkeleinheiten. Selbstverständlich ändern sich diese Verhältnisse nicht, wenn man die ganze räumliche Anordnung in einem bestimmten Maßstabe reduziert. Bei gleichmäßiger Lichtverteilung ($J = \text{konst}$) erhält man den Lichtstrom $\Phi = \omega \cdot J$, eine Formel, die bei ungleichmäßiger Lichtverteilung durch $\Phi = \Sigma \omega \cdot J$ zu ersetzen ist.

Sind in der Aufgabe die unter (a) gemachten drei Bedingungen erfüllt, so bedeutet das für das Verfahren keine wesentliche Änderung, wohl aber eine große Vereinfachung der praktischen Handhabung, insofern sich dann $\omega \cdot J$ sehr einfach bilden läßt.

Die (von Krüss in Hamburg hergestellte) Raumwinkelkugel ist später in verschiedener Weise verbessert worden²⁾. Es sind z. B. auch Kugeln hergestellt worden, die sich als „Lichtstromkugeln“ von der Raumwinkelkugel dadurch unterscheiden, daß der Raum nicht in gleiche Raumwinkel, sondern in Raumwinkel gleicher Lichtströme geteilt wird. Es ist außerdem ein Raumwinkelpapier gezeichnet (und von der Firma Schleicher & Schüll, Düren, in den Handel gebracht) worden, das im wesentlichen eine Nachzeichnung der Raumgrad-Schattenvierecke auf einer horizontalen Ebene darstellt.

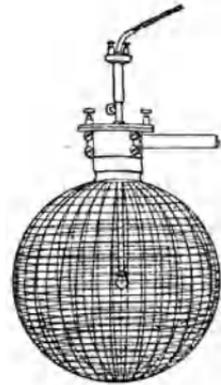


Abb. 494. Lichtstromkugel nach Teichmüller.

¹⁾ Bloch, Grundzüge der Beleuchtungstechnik, 1907 S. 47, und Lichttechnik 1921 S. 263.

²⁾ „Elektrotechnik und Maschinenbau“ 1918, S. 261. — „Licht und Lampe“ 1919, S. 108.

Man kann den von einer rechteckigen Fläche überspannten Raumwinkel natürlich auch rechnerisch bestimmen; diese Aufgabe haben H ö g n e r (ETZ 1910, S. 234) und T h o m ä l e n (ETZ 1912, S. 1313) gelöst.

(858) Die Beleuchtungsstärke eines Raumes. Die Technik hat das Bedürfnis die „Stärke der Beleuchtung eines geschlossenen oder offenen Raumes“ durch einfache Zahlen auszudrücken, obwohl eigentlich immer nur von der Beleuchtungsstärke auf bestimmten Flächen gesprochen werden kann. Diesem Bedürfnis hat man durch Verabredung dadurch entsprochen, daß man die mittlere Beleuchtungsstärke auf der Horizontalebene in 1 m Höhe, der sogenannten Meßebe, angeben soll. Man muß es begrüßen, daß es nach langen Schwankungen¹⁾ zu dieser Verabredung gekommen ist, muß sich aber jederzeit der beschränkten Bedeutung dieser Bewertung bewußt bleiben. Um Personen und Gefährte (die sich dem Beschauer wesentlich in vertikalen Flächen darbieten) auf Straßen, Plätzen und Gleisanlagen deutlich erkennen zu können, müßte man eine entsprechend starke und gerichtete Vertikalbeleuchtung fordern. Für die sichere Abwicklung des Verkehrs genügt es aber, die Körper als Silhouetten auf schwach beleuchtetem Hintergrunde, nämlich dem der Bodenfläche, vor sich zu haben. Es genügt hierzu eine Leuchtdichte, bei der das Auge mit den Stäbchen (804) sieht²⁾.

Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke eines Raumes wird ausgedrückt durch das Verhältnis der geringsten zur stärksten Beleuchtung auf der Meßebe, das in Form eines echten Bruches angegeben wird. Schatten und Lichtflecke bei künstlicher Beleuchtung werden den Normalien des VDE und der DBG gemäß in die Messungen nur einbezogen, wenn sie durch die Lampen oder ihr Zubehör unmittelbar hervorgerufen werden.

(859) Projektierung von Beleuchtungsanlagen für freie Räume. Beleuchtungsanlagen für solche Räume werden unter Zugrundelegung einer gewissen mittleren Beleuchtungsstärke und einer gewissen Gleichmäßigkeit projektiert: Man wählt nach Erfahrung Aufhängehöhe, Abstand und Art der Lampen. B l o c h und M y l o machen darüber folgende Angaben:

Art der Straße	Mittlere Horizontal- beleuchtung 1 m über dem Boden Lux	Lichtstärke der Lampen J_{\odot} in HK	Aufhänge- höhe m	Lampen- abstand in der Straßen- richtung m
Großstädtische Haupt- plätze	15 . . . 30	3000 . . . 6000 (3—4 Lampen auf einem Mast)	16 . . . 18	40 . . . 50
Großstädtische Haupt- verkehrsstraßen . .	10 . . . 20	2000 . . . 4000	8 . . . 10	30 . . . 45
Hauptstraßen . . .	5 . . . 10	600 . . . 2000	6 . . . 8	30 . . . 60
Straßen mit mittlerem Verkehr, Strandpro- menaden, Parkanla- gen usw.	1,5 . . . 5	200 . . . 600	4,5 . . . 6	30 . . . 80
Nebenstraßen mit schwachem Verkehr	0,5 . . . 1,5	50 . . . 100	3,5 . . . 5,5	30 . . . 80

1) Uppenborn-Monasch: Lehrbuch der Photometrie, München 1912, S. 123, S. 137 bis 140.

2) L. Schneider: Licht und Lampe 1924, S. 367.

Zur Berechnung der Beleuchtungsstärke kann man sowohl die Punktbeleuchtungsformel als auch die Flächenbeleuchtungsformel nach dem vorangegangenen Verfahren benutzen. Die an einer Stelle von den verschiedenen Lampen für sich hervorgerufenen Beleuchtungsstärken sind zu addieren. Über die Anwendung der Flächenbeleuchtungsformel für diesen Zweck siehe Ausführliches: Teichmüller: E. u. M. 1918, S. 261 und Licht und Lampe 1919, S. 108.

Man merke sich für die Projektierung erstens, daß die mittlere Beleuchtungsstärke von Straßen umgekehrt proportional dem Lampenabstand ist¹⁾, zweitens, daß die mittlere Beleuchtungsstärke für Lampen mit nicht ungewöhnlichen Lichtausstrahlungskurven in roher Annäherung umgekehrt proportional dem Quadrate der Aufhängehöhe ist, drittens, daß die Gleichmäßigkeit mit abnehmendem Lampenabstand und zunehmender Aufhängehöhe zunimmt, viertens, daß die Gleichmäßigkeit nur von dem Verhältnis der Aufhängehöhe zum Lampenabstand, nicht aber von ihren absoluten Werten abhängt.

Die mittlere Beleuchtungsstärke ergibt sich nach dem Lichtstromverfahren ohne weiteres. Bei der punktweisen Berechnung der Beleuchtungsstärke muß man sie rechnerisch ermitteln. Das geht nicht etwa (beispielsweise bei der Beleuchtung durch eine Lampe) durch Planimetrierung der in Abb. 493 dargestellten Schnittfläche; man muß vielmehr die zu beleuchtende Fläche in kleine Rechtecke gleicher Größe teilen, die Beleuchtungsstärke im Mittelpunkte jedes dieser Rechtecke bestimmen und aus ihnen den Mittelwert berechnen.

(860) Projektierung von Beleuchtungsanlagen für geschlossene Räume. Bei der Beleuchtung von Innenräumen versagen die oben besprochenen Verfahren deshalb, weil auf die Meße Ebene nicht nur das von der Lampe direkt aufgestrahlte Licht, sondern auch das von Decke und Wänden durch einmalige oder mehrmalige Reflexion rückgestrahlte Licht auftrifft; sogar der Fußboden kann (durch mehrmalige Reflexion) zur Beleuchtung der Meße Ebene beitragen.

Die Behandlung der Beleuchtung durch leuchtende Flächen bereitet große Schwierigkeiten; man führt deshalb in dem Quotienten

$$\eta = \frac{E_m \cdot F}{\Phi}$$

den Begriff des „Wirkungsgrades der Beleuchtung eines Raumes“ ein, wobei E_m die mittlere Beleuchtungsstärke in Lux auf der Meße Ebene von der Größe F in m^2 und Φ der von der oder den Lampen insgesamt erzeugte Lichtstrom in Lumen ist. Der Wirkungsgradbegriff ist unter dem Namen des Nutzfaktors von Högnier (Lichtstrahlung und Beleuchtung, Braunschweig 1906, S. 48) eingeführt. Der Wirkungsgrad wird zur praktischen Projektierung von Beleuchtungsanlagen folgendermaßen verwertet: Man bestimmt obiger Formel gemäß den Wirkungsgrad in möglichst großer Anzahl für verschieden gestaltete und in bezug auf das Reflexionsvermögen von Decke und Wänden mannigfaltig verschiedene Räume und für verschiedene Lampenausrüstungen durch Messung von E_m , F und Φ . Der zu beleuchtende Raum wird einem der untersuchten Räume ähnlich und die für die neue Beleuchtungsanlage zu wählende Lampenausrüstung der damals benutzten gleich sein. Man wählt aus den gemessenen Werten demgemäß denjenigen Wert aus, der für den zu beleuchtenden Raum am besten paßt. Aus der Formel

$$\Phi = \frac{E_m \cdot F}{\eta}$$

kann man dann den von der nackten Lampe zu liefernden Lichtstrom berechnen, der zur Erzielung einer gewünschten mittleren Beleuchtungsstärke E_m nötig ist. Über die von der Glühlampe nach moderner Abstufung gelieferten Lichtströme siehe die Tabelle (S. 636). Die Größe von E_m wähle man unter Be-

¹⁾ s. Teichmüller, Ein einfacher Satz über Freibleuchtung, Licht und Lampe 1924, S. 615.

rücksichtigung von (851). Der berechnete Lichtstrom ϕ kann von einer oder mehreren Lampen geliefert werden. Die Zahl der Lampen richtet sich wesentlich nach der Form des Raumes, der Fensterzahl und der Deckeneinteilung und nach der Art der in dem Raume auszuführenden Arbeiten; die Erfahrung spielt bei ihrer Festsetzung eine große Rolle.

Lichtstromtabelle für Gasfüllungslampen.

Lampen mit Edisonfassung			Lampen mit Goliathfassung		
Watt	Lumen bei 100—130 V.	Lumen bei 200—240 V.	Watt	Lumen bei 100—130 V.	Lumen bei 200—240 V.
40	440	340	300	5 200	4 600
60	750	590	500	9 250	8 350
75	970	800	750	14 500	13 200
100	1380	1200	1000	20 000	18 200
150	2350	2000	1500	31 000	29 000
200	3250	2800			

Die ausführlichste Tabelle über die Wirkungsgrade ist bisher von H a r r i s o n¹⁾ angegeben worden; sie ist auf Seite 637 abgedruckt. Die Tabelle gilt zunächst nur für quadratische Räume, und ihre Abmessungen sind nur durch das Verhältnis Raumbreite zu Lichtpunkthöhe (Spalte 4) angegeben, wobei angenommen ist, daß der Wirkungsgrad, was die Abmessungen betrifft, nur von diesem Verhältnis abhängig sei. Bei rechteckigen Räumen mit der Länge l und der Breite b erhält man den Wirkungsgrad, der zwischen demjenigen eines quadratischen Raumes mit der Seite b (η_b) und einem andern mit der Seite l (η_l) liegt, nach der Gleichung

$$\eta = \eta_b + \frac{1}{3}(\eta_l - \eta_b).$$

Den Bezeichnungen hell, mittel und dunkel sowohl bei der Decke als den Wänden ist in der Tabelle das Reflexionsvermögen in % beigesetzt.

Eine einfache Tabelle gibt H a l b e r t s m a²⁾, nämlich folgende:

Art des Raumes	Beleuchtung	Wirkungsgrad
Räume mit weißer Decke und hellen Wänden	halbindirekt oder direkt mit lichtstreuender Glocke	45...50 %
	indirekt	35...40 %
Werkstätten mit reflektierender Decke	direkt mit Reflektoren	30...35 %
	halbindirekt	30 %
Werkstätten ohne reflektierende Decke	direkt mit lichtstreuenden Glocken	25...30 %
Schmieden, Gießereien		15...20 %

Mit noch roheren Angaben begnügen sich H e y c k und H ö g n e r³⁾, indem sie angeben, daß der Wirkungsgrad in Räumen mit weißer Decke und hellfarbigen Wänden bei direktem und halbindirektem Lichte $\eta = 0,44$, bei ganz indirektem Lichte $\eta = 0,33$ und in Werkstätten $\eta = 0,4$ bis $0,3$ betrage, und zwar je nach

1) Gen. El. Rev. 1918, S. 419.

2) Fabrikbeleuchtung, München 1918, S. 159.

3) Projektierung von Beleuchtungsanlagen (Krain, Berlin 1919).

Beleuchtungs- körper	Licht- verteilung	$\Phi = \begin{matrix} \Phi \\ \Phi \end{matrix}$ in %	Raum- breite	Decke hell (70 %)			mittel (50 %)		dunkel (30 %)
				Wände					
				hell 50 %	mittel 35 %	dunkel 20 %	mittel 35 %	dunkel 20 %	dunkel 20 %
Holopane  mattierte Lampe		87 $\begin{cases} 22 \\ 65 \end{cases}$	1	0,42	0,38	0,35	0,36	0,34	0,33
			1,5	0,50	0,46	0,43	0,44	0,42	0,41
			2	0,56	0,52	0,49	0,50	0,47	0,45
			3	0,63	0,59	0,55	0,56	0,53	0,51
			5	0,70	0,66	0,63	0,63	0,60	0,57
dünnes Opal  mattierte Lampe		85 $\begin{cases} 35 \\ 50 \end{cases}$	1	0,31	0,27	0,24	0,24	0,21	0,18
			1,5	0,37	0,33	0,30	0,30	0,27	0,24
			2	0,43	0,39	0,35	0,34	0,31	0,27
			3	0,49	0,45	0,41	0,39	0,36	0,31
			5	0,56	0,52	0,48	0,45	0,42	0,36
dichtes Opal  mattierte Lampe		80 $\begin{cases} 20 \\ 60 \end{cases}$	1	0,41	0,37	0,34	0,35	0,33	0,32
			1,5	0,49	0,45	0,42	0,43	0,41	0,39
			2	0,54	0,50	0,47	0,48	0,46	0,44
			3	0,60	0,56	0,53	0,53	0,51	0,49
			5	0,67	0,63	0,59	0,59	0,57	0,54
tiefer Blechrefl.  emailliert		65 $\begin{cases} 0 \\ 65 \end{cases}$	1	0,38	0,36	0,34	0,35	0,33	0,33
			1,5	0,45	0,43	0,41	0,42	0,40	0,40
			2	0,49	0,47	0,45	0,46	0,44	0,44
			3	0,54	0,52	0,50	0,51	0,49	0,49
			5	0,59	0,57	0,55	0,56	0,54	0,54
flacher Blechrefl.  emailliert		80 $\begin{cases} 0 \\ 80 \end{cases}$	1	0,43	0,40	0,38	0,39	0,37	0,37
			1,5	0,52	0,49	0,47	0,48	0,46	0,46
			2	0,57	0,54	0,52	0,53	0,51	0,51
			3	0,63	0,60	0,58	0,59	0,57	0,57
			5	0,69	0,66	0,64	0,65	0,63	0,63
indirekt  versilb. Glas		80 $\begin{cases} 80 \\ 0 \end{cases}$	1	0,22	0,19	0,17	0,14	0,12	0,07
			1,5	0,27	0,24	0,22	0,17	0,15	0,09
			2	0,31	0,28	0,26	0,20	0,18	0,11
			3	0,36	0,33	0,31	0,24	0,22	0,13
			5	0,42	0,39	0,37	0,28	0,26	0,16
halbindirekt  dünnes Opal		85 $\begin{cases} 60 \\ 25 \end{cases}$	1	0,27	0,24	0,21	0,20	0,17	0,14
			1,5	0,34	0,30	0,27	0,25	0,22	0,18
			2	0,39	0,35	0,32	0,29	0,26	0,21
			3	0,45	0,41	0,38	0,34	0,31	0,25
			5	0,51	0,47	0,44	0,40	0,37	0,29
halbindirekt  dichtes Opal		80 $\begin{cases} 70 \\ 10 \end{cases}$	1	0,24	0,21	0,19	0,16	0,14	0,10
			1,5	0,30	0,27	0,24	0,20	0,18	0,13
			2	0,34	0,31	0,28	0,23	0,21	0,15
			3	0,39	0,36	0,33	0,27	0,25	0,18
			5	0,45	0,42	0,39	0,32	0,30	0,21
Glocke  dünnes Opal		75 $\begin{cases} 35 \\ 40 \end{cases}$	1	0,23	0,20	0,17	0,18	0,16	0,14
			1,5	0,30	0,26	0,23	0,24	0,21	0,19
			2	0,35	0,31	0,28	0,28	0,25	0,22
			3	0,41	0,37	0,34	0,33	0,30	0,26
			5	0,48	0,44	0,41	0,39	0,36	0,31
halbindirekt mit Reflektor  Opal		80 $\begin{cases} 20 \\ 60 \end{cases}$	1	0,32	0,28	0,26	0,27	0,25	0,23
			1,5	0,40	0,36	0,33	0,34	0,32	0,30
			2	0,45	0,41	0,38	0,39	0,37	0,35
			3	0,52	0,47	0,44	0,45	0,42	0,40
			5	0,59	0,54	0,51	0,51	0,48	0,46

der Verschmutzung des Raumes oder seiner Ausstattung mit Transmissionen oder ähnlichem¹⁾.

(861) Lampenausrüstungen. Die nackte Lampe, sei es eine Glühlampe oder Bogenlampe, kann nur selten zur Beleuchtung ohne weiteres verwendet werden. Im allgemeinen muß sie mit einem Reflektor oder mit einer Glocke oder mit beiden ausgerüstet werden.

Der **R e f l e k t o r** hat hauptsächlich die Aufgabe, den Lichtstrom zu richten, er kann ihn z. B. ganz nach unten oder ganz nach oben richten und so den Typus der „Tiefstrahler“ und „Hochstrahler“ unter den Lampenausrüstungen schaffen.

Die Verteilung des reflektierten Lichtes hängt wesentlich davon ab, ob der Reflektor spiegelnd oder diffus reflektiert. **S p i e g e l n d e R e f l e x i o n** zeigen polierte Metalle, versilbertes Glas, sowie Glas, welches mit totalreflektierenden Prismen versehen ist (sogenanntes Holophanglas). Hierbei ist der Ausfallwinkel des reflektierten Strahles gleich dem Einfallswinkel des auftreffenden Strahles, und beide Strahlen liegen mit dem Einfallslot in derselben Ebene (809e). Bei der **diffusen Reflexion** [Milchglas, Emaille (810)] dagegen wird das Licht nach

allen Richtungen reflektiert, und zwar bei vollkommen diffuser Reflexion nach dem Gesetz von **L a m b e r t** (809d).

Die Lichtverteilung bei diffus reflektierenden Reflektoren ist deshalb nahezu unabhängig von der Form des Reflektors. Bei spiegelnden Reflektoren dagegen spielt die Reflektorform für die Lichtverteilung eine große Rolle. Ist die Lichtquelle sehr klein (punktförmig), so kann man die mit einem spiegelnden Reflektor gegebener Form erzielte Lichtverteilung leicht berechnen oder für eine gewünschte Lichtverteilung

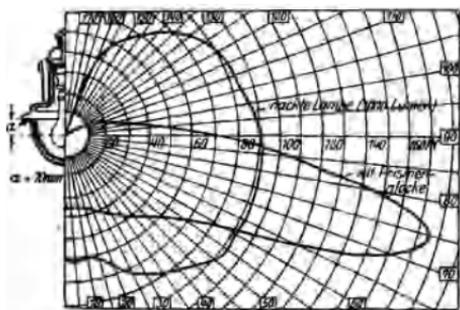


Abb. 495. Lichtverteilung einer Prismenglocke.

berechnen. Die Lichtquelle muß dabei im Reflektor natürlich eine bestimmte Stellung einnehmen. Auch bei Lampen, deren Leuchtsystem eine erhebliche Ausdehnung besitzt, ist die Stellung der Lampe im spiegelnden Reflektor von sehr großem Einfluß auf die erzielte Lichtverteilung; das ist bei der Anbringung der Lampe zu berücksichtigen.

Die **Glocke**, bestehend aus diffus durchlässigen Stoffen wie Mattglas, Milchglas, Opalüberfangglas, Marmor, hat die Aufgabe, die Leuchtdichte der nackten Lichtquelle auf ein erträgliches Maß herabzusetzen. Die Lichtquelle selbst wird dem Auge verborgen, und an ihre Stelle tritt die Glocke. Der Lichtstrom geht also von einer viel größeren Oberfläche aus.

Als ein Mittelding zwischen Glocke und Reflektor kann die **Diopfertglocke**, eine im allgemeinen unten offene mit prismatischen kreisförmigen horizontalen Riffeln versehene Glocke angesehen werden, insofern sie nämlich die Hauptaufgabe hat, den Lichtstrom zu richten (wie ein Reflektor), daneben aber auch das Licht ähnlich wie eine matte Glocke ausstreut. Mit ihr hat man den Typus des „Breitstrahlers“ geschaffen (Abb. 495). Um die lichtstreuende Wirkung zu vergrößern, kann man eine Glocke mit senkrechten Riffeln hinzufügen (Doppeldiopter).

¹⁾ Die Frage nach der Beleuchtung eines Raumes, bei dem die Reflexion von Decke und Wänden mitwirkt, ist mit mehr oder weniger Erfolg behandelt worden von: **Heyck** und **H ö g n e r**: Ztschr. f. Beleuchtungswesen Bd. 25, 1919, S. 22, 27, 45; — **Lansingh**, Trans. Ill. Eng. Soc. 1920, S. 124; **E. v. M.** 1920, S. 599; — **O n d r a c e k**: Ztschr. f. Beleuchtungswesen 1922, S. 64; **E. v. M.** 1922, S. 269, und **E. & M.**, 1924; **Lichttechnische Beilage** in Heft 20, S. 126; **R. W e i g e l**: Licht und Lampe 1924, S. 141. — **Hasenkämper**, Zeitschr. f. techn. Phys. 1924, S. 355.

Die Lampenausrüstung (Beleuchtungskörper) setzt sich im allgemeinen aus Reflektor und Glocke zusammen. Der Reflektor allein kommt z. B. da vor, wo die Lampe tief genug aufgehängt oder -gestellt werden kann, daß sie durch einen tiefen Reflektor dem Auge vollständig entzogen wird, oder wo das Licht zur Herstellung von indirekter Beleuchtung ganz nach oben geworfen werden soll. In diesem Falle verwendet man auch lichtundurchlässige Reflektoren, sonst sind meistens lichtdurchlässige Reflektoren üblich, die infolge ihrer Durchlässigkeit zum Teil den Charakter der Glocken tragen. Umgekehrt reflektiert die Glocke einen Teil des sie treffenden Lichtes und übt dadurch auf die Lichtverteilung eine gewisse ausgleichende Wirkung aus. — Unter den Lampenausrüstungen unterscheidet man vornehmlich drei Arten, nämlich solche für direkte, indirekte und halbindirekte Beleuchtung. Charakteristische Lichtverteilungskurven sind in den Abbildungen 496 a, b, c, angegeben.

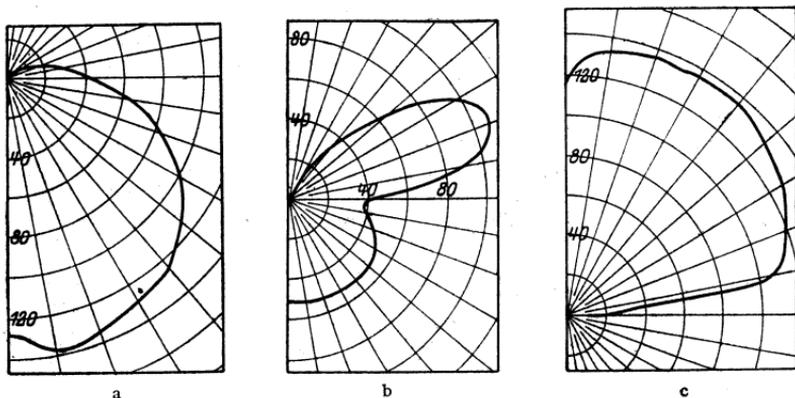


Abb. 496. Direkte (a), halbindirekte (b) und indirekte (c) Beleuchtung.

In jedem Beleuchtungskörper geht ein Teil des erzeugten Lichtes verloren, man kann deshalb von dem Wirkungsgrade eines Beleuchtungskörpers sprechen; er ist definiert als das Verhältnis des Lichtstromes der Lampe mit Ausrüstung zu dem von der Lichtquelle erzeugten Lichtstrom. Dieser Wirkungsgrad sagt aber bei weitem nicht mit ähnlicher Bestimmtheit etwas über die Güte des Beleuchtungskörpers aus wie der Wirkungsgrad bei anderen Energieumsetzern. Z. B. wird derjenige Reflektor den größten Wirkungsgrad haben, der den größten Teil des Lichtstromes frei ausstrahlen läßt und nur einen sehr kleinen Teil reflektiert. „Die Angabe des Wirkungsgrades ist also nur dann berechtigt, wenn über den Zweck, dem die Lampenausrüstung dienen soll und über das Maß, in dem dieser Zweck erreicht ist (erreichte Lichtverteilung und erreichte Leuchtdichte) gleichzeitig ausreichende Angaben gemacht werden.“ (VDE). Da solche Angaben in der Weise, daß auf ihrer Grundlage Beleuchtungskörper miteinander verglichen werden könnten, nur sehr schwer zu machen sind, führt die Angabe des Wirkungsgrades in der Regel eher irre, als daß sie aufklärte.

Lampenausrüstungen für künstliches Tageslicht. Im allgemeinen verwendet man das Licht in der Farbe, wie es erzeugt ist. Versuche, von der üblichen Farbe stark abweichendes Licht, wie insbesondere das von Quecksilberdampfampfen, anders zu färben, haben bisher wenig praktischen Erfolg gehabt.

Zur Färbung stehen zwei Mittel zur Verfügung, erstens die Hinzufügung von Licht der fehlenden Farben, zweitens die Abfiltrierung des Lichtes der nicht gewünschten Lichtfarbe aus dem erzeugten Licht. Das erstere, das grundsätzlich

wirtschaftlich günstigere, wird praktisch kaum angewendet. Das letztere ist durch Verwendung farbiger Gläser verwirklicht.

Praktische Bedeutung hat die Herstellung künstlichen Tageslichtes erhalten. Für diesen Zweck werden Beleuchtungskörper hergestellt, in denen bläulich gefärbte Glasglocken oder Glasscheiben, teilweise auch bläulich reflektierende Reflektoren verwendet werden. Lampen für künstliches Tageslicht sollen nur in Arbeitsräumen, insbesondere in solchen, wo es auf die Unterscheidung von Farben in der Beleuchtung des Tageslichtes ankommt, verwendet werden.

(862) Winke für die Beleuchtung von Innenräumen. Unterteilung des Lichtstroms. Aus der Glühlampentabelle auf S. 637 geht hervor, daß man bei 220 V einen Lichtstrom von rund 4800 Lm auf folgende Weise erzeugen kann:

1.	4600 Lm durch 1 Lampe von 300 W	= 300 W
2.	4800 „ „ 1 „ „ 200 W und 1 Lampe von 150 W .	= 350 W
3.	4800 „ „ 2 Lampen von 150 W „ 1 „ „ 75 W	= 375 W
4.	4800 „ „ 4 „ „ 100 W	= 400 W
5.	4800 „ „ 6 „ „ 75 W	= 450 W

Bei Verwendung von solchen Lampen soll man demnach die Lichtquellen nicht weiter unterteilen, als zur Erzielung einer genügend gleichmäßigen Beleuchtung unbedingt erforderlich ist. Hierzu führt auch die Überlegung, daß Installation, Glühlampen und Beleuchtungskörper verhältnismäßig teurer in der Anschaffung werden, je weiter die Unterteilung getrieben wird. Aus wirtschaftlichen Gründen ist daher die weitgehende Unterteilung bei Kronen, Deckenbeleuchtungen und „mehrfламigen“ Beleuchtungskörpern nicht zu rechtfertigen.

Lampenentfernung. Für die mit Rücksicht auf genügend gleichmäßige Beleuchtung einzuhaltende Entfernung der Lichtquellen voneinander ist ebenfalls nicht der absolute Wert dieser Entfernung maßgebend, sondern das Verhältnis der Entfernung zur Aufhängehöhe der Lampen. Es sei das Verhältnis l/h nicht größer als

- 0,75 bei Reflektoren für konzentriertes Licht,
- 1,5 bei lichtstreuenden Glocken,
- 1,8 bei halbindirekter Beleuchtung,
- 1,8 bei indirekter Beleuchtung.

h ist der Abstand von der Arbeitsfläche (1 m über Fußboden) bis zum Beleuchtungskörper. Nur bei der indirekten Beleuchtung ist h bis zur Decke zu nehmen).

Schatten und Lichtstreifen auf Decke und Wänden. Lichtquellen von sehr geringer Ausdehnung (Bogenlampen, Gasfüllungslampen) werfen von Ketten, Röhren, Schalenhaltern und ähnlichen Bestandteilen der Beleuchtungskörper störende Schatten auf Decke und Wände. Ferner entstehen bei geblasenen Hellgläsern mit ihren stets vorhandenen Schlieren und bei prismatischen sowie geschliffenen Gläsern infolge der Brechung des Lichtes helle Streifen auf der Decke und den Wänden. Beide Erscheinungen beeinträchtigen das Aussehen der Beleuchtungsanlage wesentlich. Sie können vermieden werden, wenn entweder die Glühlampe ganz oder teilweise oder die betreffenden Glasteile leicht mattiert (seidenmattiert) werden. Die hierdurch hervorgerufene geringe Streuung genügt, um Schatten und Streifen zum Verschwinden zu bringen. Dagegen genügt sie nicht, um das Auge gegen Blendung zu schützen, wenn es unmittelbar in die Lichtquelle hineinsehen kann. In diesem Falle ist die Verwendung vollkommen lichtstreuender Gläser (Opalüberfang und Opal) angezeigt. Lichttechnisch gute Beleuchtungskörper werden von verhältnismäßig wenigen Firmen hergestellt; man sieht viel mehr schlechte in Gebrauch. Das gilt vor allem auch von den einfachen Reflektoren, von denen die meisten weder das Auge vor Blendung schützen, noch einen erheblichen Einfluß auf die Lichtverteilung ausüben; oft würde man solche Reflektoren besser weglassen.

Beleuchtungsproben. Wo in bezug auf die Berechnung der Beleuchtung Unsicherheit besteht, nimmt man häufig zu einer Beleuchtungsprobe Zuflucht. Es ist hierbei erforderlich, daß der Versuch vollständig, d. h. unter Verwendung sämtlicher für den betreffenden Raum oder einen scharf begrenzten Abschnitt desselben bestimmten Lampen ausgeführt wird, da das Anbringen einer Lichtquelle kein Urteil über die später auftretende Verteilung der Beleuchtung zu bilden gestattet.

Literatur: Bloch, Grundzüge der Beleuchtungstechnik, Berlin 1907. — Uppenborn-Monasch, Lehrbuch der Photometrie, München-Berlin 1912. — Ill. Eng. Soc., Illuminating Engineering Practice, New York und London 1917. — Halbertsma, Fabrikbeleuchtung, München-Berlin 1918. — Teichmüller, Raumwinkel- und Lichtstromkugel, E. u. M. 1918. — Teichmüller, Neue Formen der Raumwinkel- und Lichtstromkugel, Licht und Lampe 1919. — Heyck u. Högner, Projektierung von Beleuchtungsanlagen, Berlin 1919 u. Z. f. Bel.-Wesen 1919. — Teichmüller, Beleuchtung von Gießereien, Gießerei-Zeitung 1919. — Deutsche Beleuchtungstechnische Gesellschaft (Bloch), Lichttechnik, München-Berlin 1921.

3. Theaterbeleuchtung.

(863) Allgemeines. Sicherheit. Zur Erhöhung der Feuersicherheit und zum Schutze des Publikums gelten besondere Bestimmungen der Verbandsvorschriften; die wichtigste bezieht sich auf die Anordnung der Lampen eines Raumes in verschiedenen, getrennt gesicherten Stromkreisen, weitere auf die Strombelastung der einzelnen Stromzweige, auf bewegliche Leitungen und auf die Anordnung der Sicherungen.

Stromversorgung. Die Theater sind fast durchweg an die städtischen Netze angeschlossen. Sind eigene Erzeugungsanlagen vorhanden, so ist immer ein Reserveanschluß an das Netz vorgesehen. Wegen der hohen Spitzenbelastung des Netzes durch die Theater und wegen der in kurzen Zeiträumen stark wechselnden Ausnutzung des Anschlußwertes wird durch Gewährung von Sondertarifen die Anlage von Akkumulatorenbatterien in Verbindung mit Umformernanlagen gefördert. Während einer Sperrzeit (im Winter von 4 bis 8, im Sommer von 7 bis 8) darf dann kein Strom aus dem Netze entnommen werden.

(864) Arten der Beleuchtung. In neueren Theatern kommt für die allgemeine Beleuchtung ausschließlich Glühlicht zur Anwendung. Das gilt auch für die gewöhnliche Szenenbeleuchtung. Nur zur Erzielung besonderer Effekte: Darstellung des Blitzes, von Wolken, Schnee und Regen usw. mit Projektionsapparaten werden noch Bogenlampen, in steigendem Umfange aber auch starke Gasfüllungslampen benutzt. Der Kuppelhorizont nach Fortuny wird nur noch in älteren Anlagen durch Bogenlampen beleuchtet, in neueren ausschließlich durch starke Gasfüllungslampen. (Paetow, ETZ 1909, S. 695; Rosenbergl, Z. V. D. I. 1911, S. 1366; H. Lux, Z. Bel. 1914, Heft 13 bis 17, derselbe in L. Bloch, Lichttechnik, München und Berlin 1921).

Die Szenenbeleuchtung durch Glühlicht wird entweder nach dem Lautenschlägerschen Einlampensystem oder dem Brandtschen Mehrlampensystem ausgeführt. Beim Einlampensystem weist jeder Beleuchtungskörper nur weiße Lampen auf. Farbenwirkungen werden durch drehbare, die Lampen umgebende Gelatineschirme mit mehreren Farbstreifen erzielt. Die Farbschirme werden durch Schnurzüge vom Beleuchterstande aus bewegt. Da dieses System nur größere Übergänge von einer Farbe in die andere gestattet, so ist es nur bei kleineren Theatern im Gebrauch. Eine besondere Art des Einlampensystems ist von der AEG ausgebildet (DRP 220616). Das farbige Licht wird hier in der Weise erzeugt, daß der Reflektor des Beleuchtungskörpers, gegen den das Licht der Lampen geworfen wird, farbig gestrichen ist, so daß vom Reflektor aus das Licht in der Farbe des Reflektors zurückgeworfen wird. Die weißen Lampen sind hierzu in eine der Zahl der gewünschten Farben entsprechende Anzahl von Stromkreisen geschaltet. — Beim Mehrlampensystem enthält jeder Beleuchtungskörper drei oder vier Abteilungen gefärbter Glühlampen.

Je nach der auf der Bühne gewünschten Färbung werden die entsprechenden Lampen eingeschaltet und ihre Lichtstärke durch Änderung der Stromstärke geregelt. Hierdurch lassen sich ganz allmähliche und zarte Übergänge von einer Farbe in die andere erzielen. Beim Dreilampensystem kommen weiße, rote und blaugrüne Lampen zur Anwendung. Beim Vierlampensystem treten noch gelbe hinzu. Diese beiden, ursprünglich für luftlere Glühlampen ausgearbeiteten Systeme sind mit so großem Erfolge an starke Gasfüllungslampen angepaßt worden, daß in neueren Theatern die luftleeren Lampen nur noch aushilfsweise und zur Rampenbeleuchtung zur Anwendung kommen. Die in mit Farbscheiben versehenen Laternen angeordneten Gasfüllungslampen beleuchten entweder unmittelbar die Spielfläche und die Dekorationen oder mittelbar unter Zwischenschaltung zerstreut reflektierender Flächen („Horizont“).

Horizont. In neueren Theatern spielt der **Fortunysche Kuppelhorizont** oder der **Max Reinhardtsche Rundhorizont** als sekundäre Lichtquelle eine große Rolle. Die mattweiße, stetig gekrümmte Fläche im Bühnenhintergrunde wirkt bei diffuser Beleuchtung wie ein Himmelshorizont von unendlicher Tiefe. — Nach dem **Fortunysystem** wird der Kuppelhorizont selbst wieder indirekt beleuchtet. Das Licht starker Bogenlampen, die auch in älteren Anlagen jetzt durch starke Gasfüllungslampen ersetzt sind, fällt zunächst auf breite Seidenbänder, die aus verschiedenfarbigen Streifen zusammengesetzt sind, und erst das von diesen Seidenbändern reflektierte Licht dient zur Ausleuchtung des Kuppelhorizontes. Die Seidenbänder sind rouleauartig aufgerollt; mit vom Beleuchterstande aus gesteuerten Elektromotoren können sie so abgerollt werden, daß die gewünschte Farbe zur Geltung kommt. Da die einzelnen Farbstreifen so aneinandergefügt sind, daß die eine Farbe mit zahlreichen und langen dreieckigen Zungen in die andere übergreift, können zarte Farbübergänge erzeugt werden. Die Seidenbandreflektoren und Bogenlampen hängen hinter der Proszeniumswand oder den Soffitten; außerdem sind noch fahrbare Reflektoren hinter Versatzstücken vorgesehen, um eine möglichst gleichmäßige Ausleuchtung des Kuppelhorizontes und Aufhellung der von Dekorationstücken ausgesandten Schlagschatten bewirken zu können. — An Stelle der Bogenlampen werden in allen neueren Anlagen starke Gasfüllungslampen zur unmittelbaren Ausleuchtung des Horizontes benutzt. — Die Ökonomie der **Fortunysbeleuchtung** ist wesentlich besser als die des **Brandtschen Mehrlampensystems**. Setzt man bei gleichem Energieaufwande die Beleuchtung beim Mehrlampensystem gleich 1, so ist sie beim **Fortunyschen System**:

Licht	senkrecht	wagrecht
weiß	3	5,6
rot	2,7	5,3
blau	2,5	5

Nach dem System der **Siemens-Schuckertwerke** werden zum Ausleuchten des Kuppel- oder Rundhorizontes, bzw. von Freilandschaften starke Gasfüllungslampen in Laternengehäusen benutzt. Das Gehäuse besitzt an der Vorderseite einen Ausschnitt, der durch eine stark streuende Glashülle geschlossen ist. Im Innern befindet sich eine drehbare Farbenglocke mit verschiedenen Farbstreifen, die durch einen Elektromotor in die gewünschte Stellung gebracht wird. Außer den weißen werden noch dunkelrote, rote, gelbe, „mondgrüne“, grüne, blaue, dunkelblaue und violette Farbtöne angewandt. Durch Änderung der Stromstärke und Fernsteuerung der Farbenglocken kann jede Helligkeit und jede Farb-
abstufung erzeugt werden. Zarte Farbübergänge werden dadurch erzielt, daß die Farbenglocken nicht alle gleichzeitig für dieselbe Farbe eingestellt werden. Zum Ausleuchten des Horizontes sind bis 64 große Gasfüllungslampen in meh-

renen Reihen an einem Rahmen befestigt, der vom Schnürboden herabhängt und, durch Gegengewichte ausgeglichen, in jede gewünschte Stellung gebracht werden kann. Einzelne Laternen dieses Rahmens enthalten anstatt der Farbglöcken drehbare Glasglöcken mit aufgemalten Wolkenbildern. Wegen seiner großen Einfachheit kann dieses Beleuchtungssystem auch nachträglich in jedem Bühnenhause eingebaut werden.

Das Einlampensystem mit Gasfüllungslampen ist dem Mehrfarbensystem von Brandt hinsichtlich der Ausnutzung der gesamten installierten Lampen weit überlegen. Nach Messungen in einem größeren deutschen Stadttheater ergab sich das folgende Resultat:

Mehrlampensystem	Anschlußwert	mittlerer Verbrauch
für weiße Lampen	60,6 kW	13 kW = 22 %
„ rote Lampen	15,2 „	1 „ = 6,5 %
„ grüne und gelbe Lampen	68,6 „	7 „ = 10 %

Die Ausnutzung ist also beim Mehrlampensystem verschwindend klein, sämtliche installierte Lampen waren aber erforderlich, um, wenn auch nur kurzzeitig, bestimmte Bühnenwirkungen hervorbringen zu können. Da das Einlampensystem aber sehr umständliche Einrichtungen zur Durchführung des Farbwechsels erforderlich macht, so wird bei neueren großen Theatern für die Horizont- und Spielflächenbeleuchtung wieder das Mehrlampensystem von Schwabe & Co. bevorzugt. Die einzelnen Lampen sind auch hier in Laternen untergebracht, die aber mit festen, streuend durchlässigen Farbglöcken in 6 bis 8 Farbstufen abgeschlossen sind. Farbenwechsel und Farbenübergänge lassen sich beim Mehrlampensystem mit großer Sicherheit und Leichtigkeit ausführen, im Gegensatz zum Einlampensystem, das wegen der unveränderlichen Anordnung der Farbstreifen an den Farbglöcken immer nur ganz bestimmte Farbenübergänge zuläßt, während beim Mehrlampensystem jede Willkür möglich ist, so daß sich szenische Effekte von bisher unerreichter Pracht erzielen lassen.

Eine große Rolle spielt bei dem Beleuchtungssystem nach Schwabe & Co. der Wolkenapparat, der zur Erzielung ziehender Wolken, aber auch zur allgemeinen Ausleuchtung des Bühnenhorizontes benutzt wird. Dieser Schwabesche Wolkenapparat besteht aus einer größeren Anzahl von Projektionsapparaten mit großen Gasfüllungslampen, die im Kreise um eine gemeinsame Achse und in zwei Stockwerken angeordnet sind. Die Projektionsapparate sind mit photographierten Wolkenbildern, die zeitlich nacheinander aufgenommen sind, besetzt. Da jedes Stockwerk der Projektionsapparate in horizontaler Ebene in beiden Richtungen unabhängig von dem anderen in beliebig zu wählenden Geschwindigkeiten durch Motorantrieb beweglich ist, und da sich die Bildwerfer auch in senkrechter Richtung motorisch regeln lassen, so sind mit Leichtigkeit horizontal ziehende Wolkenwolken, aufsteigende Gewitter u. dgl. in jeder gewünschten Verbindung szenisch darstellbar. Für kleinere Theater werden von Schwabe & Co. Wolkenapparate mit nur einer einzigen starken Gasfüllungslampe gebaut, die das Licht für eine Mehrzahl von auf einer Kugeloberfläche angeordneten Projektionsapparaten liefert. Mit Hilfe von motorisch verstellbaren Spiegeln werden die Wolkenbilder oder nach Bedarf auch nur einfarbiges Licht auf den Bühnenhorizont geworfen. — Mit Hilfe der Wolkenapparate werden auch Landschaften und Darstellungen beliebiger Art (z. B. die Walhall mit der Regenbogenbrücke im „Rheingold“) auf den Horizont geworfen.

(865) Die Bühnenbeleuchtungskörper. Die Beleuchtungskörper bestehen bei dem Einlampen- und Mehrlampensystem für luftleere Lampen aus leichten eisernen Rahmen, an die die Glühlampenfassungen fest angebaut sind. Ein Drahtgitter schützt die Lampen. Diese Beleuchtungskörper werden bei der Soffittenbeleuch-

tung an Seilzügen horizontal aufgehängt, bei der Kulissenbeleuchtung hinter den einzelnen Kulissen senkrecht aufgestellt. Der Rampenbeleuchtungskörper ist fest montiert. Außerdem kommen noch Versatzständer und Versatzplatten mit Glühlampen zur Anwendung, die hinter den Kulissen oder passenden Versatzstücken nach Bedürfnis aufgestellt werden, um Dekorationseinzelheiten besonders hervorzuheben. Als Lampen kommen heute ausschließlich Metallfadlampen zur Anwendung. Besonders vorteilhaft zur Erzielung einer gleichmäßigen Beleuchtung sind Röhrenlampen, die hintereinander und in mehreren Reihen nebeneinander angeordnet sind. Der Anschluß der beweglichen Beleuchtungskörper geschieht mit mehrpoligen Steckern und ebensolchen Steckdosen, die unterhalb des Bühnenfußbodens und an den Bühnenwänden in reichlicher Zahl vorgesehen sind. — Zur hellen Beleuchtung der Szene selbst, wie sie bei großen Freilandschaften, z. B. Meistersinger III. Akt, Festwiese, nötig ist, werden direkt wirkende Beleuchtungskörper verwandt. Sie bestehen aus Rahmen, die an jedem beliebigen Prospektzuge aufgehängt werden können, oder an den Rahmen für die Horizontbeleuchtung angebaut sind. Diese Rahmen nehmen unten offene Laternen für große Gasfüllungslampen auf. Vor die Laternenöffnungen können Farbscheiben durch Seilzug vorgeschaltet werden. Auch die sehr wirksamen *Wiskott* reflektoren der AEG in Verbindung mit Gasfüllungslampen finden für diese Zwecke Verwendung.

(866) Die Regulierung der Bühnenbeleuchtung. Zur Bedienung und Regulierung der gesamten Bühnenbeleuchtung dient der Bühnenregulator. Entsprechend dem Ein- oder Mehrlampensystem sind die Bühnenregulatoren als Ein- oder Mehrhebelregulatoren ausgebildet. Jeder Lampenstromkreis — bei großen Bühnen bis zu 150 — erhält einen einfachen, vielfach unterteilten Widerstand mit besonderen Kontaktbahnen, an denen der Schleifkontakt entlang gleitet. Die Zahl der Abstufungen ist so groß gewählt, daß bei Übergang von Stufe zu Stufe im Lichte der Lampen keine schroffen Übergänge stattfinden. Es kommen 50 bis 100 Abstufungen zur Anwendung. Wenn einer Lampe so viel Widerstand vorgeschaltet ist, daß sie nur noch dunkelrot glüht, wird durch einen Endausschalter ihre Abschaltung bewirkt. Der Schleifkontakt jedes Widerstandes wird vermittelt Seilübertragung von einem Stellhebel des Stellwerkes aus bedient. Die Stellhebel für die einzelnen Stromkreise sind nebeneinander und die Hebelgruppen untereinander angeordnet. Die Stellhebel können miteinander gekuppelt werden, so daß ganze Gruppen von Stromkreisen gleichzeitig regelbar sind. Für jede Lampenfarbe ist immer eine ganze Reihe nebeneinanderliegender Stellhebel vorgesehen. Die Reihen für die verschiedenen Farben liegen dann parallel untereinander. Auch diese Gruppen können nach Bedarf miteinander gekuppelt werden. Es lassen sich also die mannigfaltigsten Zusammenstellungen bilden, und so ist es möglich, jede gewünschte Beleuchtungswirkung und jeden Farbübergang zu erzeugen. Während z. B. die eine Farbe verdunkelt wird, kann man schon vor deren Erlöschen eine andere Farbe mit der geringsten Helligkeit einstellen und allmählich anwachsen lassen, um sanfte Helligkeits- und Farbenübergänge zu erzeugen. — Das Stellwerk für das Beleuchtungssystem mit Gasfüllungslampen ist, entsprechend der geringeren Zahl von Stromkreisen, erheblich einfacher. Bei dem Einlampensystem wird nur die Helligkeit der Lampen durch Einschalten von Widerständen reguliert. Für den Farbwechsel kommt dann noch eine Farbschalttafel hinzu, an deren Farbfeldern der Farbwechsel mittels eines Umschalters vorgenommen wird, durch den die Lampenmotoren zum Hervorholen der einzelnen Farben gesteuert werden. Ein besonderes „*Wolkenfeld*“ auf dieser Schalttafel enthält die Betätigungsvorrichtung für die Wolkenlampen, nämlich den Regulierwiderstand für die Wolkengeschwindigkeit, den Druckknopf für das Hervorholen eines beliebigen Wolkengebildes und den Umschalter zum Vorziehen roter Filter vor die Wolkenlampen. Der Regulator für das Schwabesche System ist genau so gebaut wie der für das gewöhnliche Mehrlampensystem, nur braucht er für erheblich weniger

Stromkreise eingerichtet zu sein. — Dazu kommt dann noch die Fernsteuer-einrichtung für den Wolkenapparat.

Die Bühnenregulatoren werden zweckmäßig an der Hinterseite der Proszeniumswand angeordnet, von wo der Beleuchter das ganze Bühnenbild übersehen kann. Die Regulierwiderstände werden meist getrennt von den Regulatoren aufgestellt, zweckmäßig im Bühnenunterraume, häufig aber auch oberhalb der Regulatoren an der Proszeniumswand.

Berechnung der Widerstände. Da die Bühnenbeleuchtung ganz allmähliche Übergänge in den Helligkeits- und Farbenabstufungen verlangt, die dem Auge nicht unangenehm auffallen dürfen, so wurde von E. Löbecke (ETZ 1890, S. 234) versucht,

auf Grund des Weber-Fechnerschen Grundgesetzes die erforderlichen Helligkeitsstufen theoretisch abzuleiten. Hiernach müssen die Lichtstärken so geändert werden, daß die Empfindungsstärke proportional den Logarithmen der Reizstärken wachsen oder abnehmen. D. h. die Lichtstärken müssen in einer geometrischen Reihe wachsen, wenn die zunehmende Beleuchtung den Eindruck der gleichmäßigen Änderung für das Auge behalten soll. Hierbei ist von dem Schwellenwerte des Reizes auszugehen. Zur Durchführung der Rechnung benutzt man Lichtstärken- und Stromstärkenkurve der Lampensorte in Abhängigkeit von der Spannung (Kurven HK und A der Abb. 497). Hier-

auf werden für eine bestimmte Anzahl Stufen, z. B. 25, die Lichtstärken so berechnet, daß sie nach einer geometrischen Reihe abnehmen. Hiernach gilt:

$$J \cdot v^{25} = \frac{1}{50} J, \text{ also } v = \sqrt[25]{\frac{1}{50}} = 0,855,$$

wobei v den Quotienten zweier aufeinanderfolgender Glieder der Reihe darstellt. Man berechnet nun zunächst die im Widerstande zu vernichtende Spannung für jede Helligkeitsstufe und hieraus den zugehörigen Widerstand. Diesen trägt man gleichfalls als Kurve auf (Kurve W in Abb. 497) und kann nun aus dieser den Widerstand jeder Stufe abgreifen. Jede einzelne Stufe wird dann noch weiter in drei gleiche Stufen geteilt, so daß insgesamt 75 Stufen vorhanden sind, um eine 32 HK-Lampe auf 0,64 HK herabzuregulieren. Für die weitere Abnahme der Helligkeit bis zum völligen Verlöschen werden schließlich noch 25 weitere Stufen angefügt, wofür die Stromstärken aus der verlängerten Kurve A zu entnehmen sind. Da Helligkeitsabstufungen bei Glühlampen zugleich auch immer mit Farbenveränderungen verbunden sind, so können diese Berechnungen nur zu einem ungefähren Anhalt für die Konstruktion der Regelapparate dienen. In der Praxis werden sie nach Erfahrungsgrundsätzen aufgebaut.

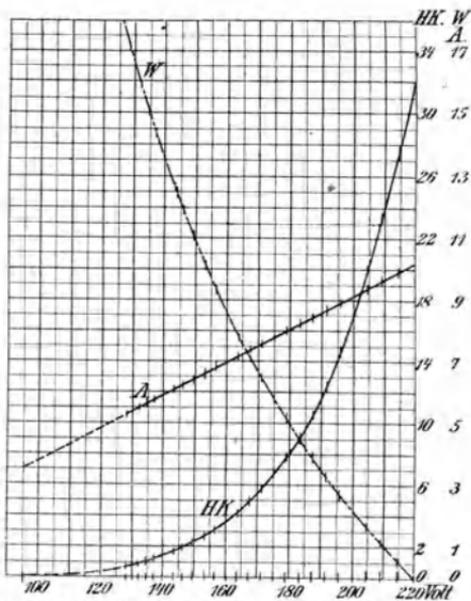


Abb. 497. Abstufung eines Bühnenregulator-Widerstandes.

(867) Effektbeleuchtung. Theaterblitze werden in zwei voneinander verschiedenen Arten erzeugt, je nachdem man das Bild eines Blitzes oder dessen momentane Lichtwirkung darzustellen wünscht. Im ersten Falle wirft man das Lichtbild eines Blitzes mit dem Projektionsapparat auf den Bühnenhintergrund, im zweiten Falle läßt man Blitzbogenlampen aufflammen, die so konstruiert sind, daß der Lichtbogen rasch in die Länge gezogen wird, bis er abreißt. — Lodernde Flammen werden von Schwabe & Co. mittels wehender Seidenbänder dargestellt. Die Bänder werden von einem Ventilator in Bewegung gehalten und gleichzeitig durch gelbe und hellrote Glühlampen beleuchtet. — Flimmernde Sterne ahmt man nach einem Patente der Siemens-Schuckertwerke durch kleine Lämpchen für 5 bis 6 V mit vorgestellten Linsen nach, die in den Bühnenhintergrund eingesetzt werden. Die Lämpchen werden von einem Wechselstromumformer für niedrige Spannung gespeist. Mit Vorteil werden diese Lämpchen auf die drei Phasen des Drehstromes verteilt. Bei Anwendung einer niedrigen Periodenzahl kann so das Funkeln der Sterne sehr naturgetreu nachgeahmt werden.

(868) Notbeleuchtung. In allen Teilen des Theaters ist eine sicher funktionierende Notbeleuchtung anzulegen.

Nach dem System von Schwabe & Co. werden hierfür Akkumulatorenlampen mit Zeitschaltung vorgesehen, die an allen Ausgängen und anderen wichtigen Stellen unabhängig voneinander angebracht werden. Zur Ladung werden diese Akkumulatoren entweder nach einem besonderen Laderaum gebracht, oder sie sind auch hintereinander in den Stromkreis einer besonderen Ladeleitung eingeschaltet.

Nach dem System von Brandt werden die in den einzelnen Rängen übereinanderliegenden Notlampen oder Lampengruppen von senkrecht das Gebäude durchziehenden Leitungen gespeist, die untereinander und von allen anderen Leitungen vollkommen unabhängig sind. Als Energiequelle kommen ausschließlich Akkumulatorenbatterien in Betracht, die geschützt im Kellergeschoß untergebracht sind. Zweckmäßig werden für diese Art der Notbeleuchtung Lampen derselben Type wie für die Hauptbeleuchtung benutzt, so daß die Notlampen teilweise an den Hauptbeleuchtungskörpern untergebracht und zur Hauptbeleuchtung selbst mit herangezogen werden können.

4. Beleuchtung von Eisenbahnwagen.

(869) Ausführungsarten. Die Beleuchtung erfolgt

1. durch Sammlerbatterien — Batteriebeleuchtung,
2. durch Maschinen in Verbindung mit Batterien — Maschinenbeleuchtung.

Beide Arten können sowohl für Beleuchtung einzelner Wagen (Einzelwagenbeleuchtung) oder für Beleuchtung ganzer Züge von einem oder mehreren Wagen des Zuges aus (geschlossene Zugbeleuchtung) Verwendung finden.

(870) Batteriebeleuchtung. Die Batterien werden für geschlossen bleibende Züge in einem oder zwei Wagen des Zuges, sonst in jedem Wagen aufgestellt. Zur Ladung werden die Batterien entweder herausgenommen und durch frisch geladene ersetzt, oder es ist besser, sie bleiben in dem Wagen und werden während des Aufenthaltes der Züge auf den Abstellbahnhöfen geladen. In letzterem Falle werden die Leitungen bis an die Gleise geführt und enden in verschließbaren Anschluß- und Schalttafeln. Bei den Wagen der italienischen und ungarischen Staatsbahnen sowie einer großen Zahl von Klein- und Nebenbahnen, ferner bei den Bahnpostwagen der Reichspost, der bayerischen und österreichischen Post werden die Batterien ausgewechselt. Die Batterien müssen deshalb möglichst leicht gebaut sein; es sind vorzugsweise positive Gitterplatten, aber auch Oberflächenplatten in Verwendung. Die genannten Verwaltungen haben Einzelwagenbeleuchtung.

Geschlossene Zugbeleuchtung mit Aufladung im Wagen hat die dänische Staatsbahn eingeführt, bei welcher zwei Wagen jedes Zuges mit Batterien ausgerüstet sind.

Einzelwagenbeleuchtung mit Aufladung im Wagen hat die preußische Staatsbahn bei einer größeren Anzahl Wagen ausgeführt. Da es auf das Gewicht der Batterien bei Aufladung im Wagen nicht ankommt, sind positive Groboberflächenplatten für die Batterien vorgesehen.

Die Hauptvorteile der reinen Batteriebeleuchtung sind große Einfachheit der Wageneinrichtung und geringe Beschaffungskosten. Der wesentlichste Nachteil besteht in der Abhängigkeit von einer Ladestation, ein Nachteil, welcher natürlich mit der größeren Verbreitung der Anordnung und der dadurch bedingten größeren Anzahl von Ladestellen immer weniger ins Gewicht fällt.

Reine Akkumulatorenbeleuchtung ist in Deutschland bei Bahnpostwagen, bei D-Zugwagen der deutschen Reichsbahn und vielen Klein- und Nebenbahnen eingeführt. Die Bahnpostwagen enthalten Batterien von 16 Zellen, zu je 4 in einen Kasten eingebaut. Kapazität etwa 96 Ah, Lade- und Entladestrom 6 A, Gewicht der ganzen Batterie 172 kg. Die zu speisenden Lampen sind einzeln ausschaltbar. Batterien werden zum Laden ausgewechselt. Bei den D-Zugwagen der deutschen Reichsbahn werden die Batterien von 370 Ah Inhalt im Wagen aufgeladen. In außereuropäischen Ländern wird die reine Batteriebeleuchtung nur wenig angewandt.

(871) Maschinenbeleuchtung. a) Geschlossene Zugbeleuchtung. Die Dynamomaschine kann angetrieben werden:

1. von einer Dampfturbine oder Dampfmaschine auf der Lokomotive, oder im Gepäckwagen,
2. von einem Petroleummotor im Gepäckwagen und
3. von der Wagenachse (Achsbeleuchtung).

Die geschlossene Zugbeleuchtung eignet sich für europäische Verhältnisse mit Ausnahme Rußlands infolge des dichten Bahnnetzes und der geringen Anzahl dauernd zusammen bleibender Züge wenig, dagegen ist sie in den Vereinigten Staaten und in Rußland sehr verbreitet. Turbinendynamos auf der Lokomotive sind von der preußischen Staatsbahn angewandt worden bei einer Reihe von Zügen und auch auf amerikanischen Zügen vielfach im Gebrauch. Dort wird die Aufstellung von Dynamomaschinen im Gepäckwagen mit Dampflieferung von der Lokomotive vielfach angewandt, ganz besonders auf den westlichen Bahnen. Petroleummotoren waren auf russischen Bahnen vielfach im Gebrauch. Die Batterien befinden sich entweder lediglich im Gepäckwagen, oder jeder Wagen ist mit solchen ausgerüstet.

Vorteilhaft in den Anschaffungskosten ist die Achsbeleuchtung für geschlossene Züge, welche in größerem Umfange auf deutschen und dänischen Klein- und Nebenbahnen für Vorortstrecken, auf den deutschen Staatsbahnen, auf amerikanischen Bahnen und bei Kleinbahnen eingeführt ist, also bei solchen Zuggattungen, welche dauernd geschlossen bleiben. Die Batterien werden in der Regel nur in den mit Maschine ausgerüsteten Wagen angeordnet.

b) Einzelwagenbeleuchtung. Die Maschinenbeleuchtung kann hier nur als Achsbeleuchtung Anwendung finden. Eine gute Einrichtung muß folgenden Bedingungen entsprechen:

Bei Achsbeleuchtung muß vor allen Dingen die Beleuchtung unabhängig von der Richtung und Geschwindigkeit des Zuges, von der Zahl und der Dauer der Aufenthalte sein. Sie erfordert unbedingt die Verwendung von Sammlern, welche die Beleuchtung bei Stillstand des Zuges oder langsamer Fahrt unterhalten. Sie erfordert weiter, daß die Maschine bald nach der Anfahrt bei einer bestimmten Geschwindigkeit mit Erreichung der Batteriespannung sich selbsttätig in den Stromkreis einschaltet und bei Nachlassen der Geschwindigkeit ebenso wieder ausschaltet und ferner stets Strom im gleichen Sinne abgibt, welches auch die Fahrtrichtung und dementsprechend die Drehrichtung der Maschine ist. Sie erfordert ferner, daß die Spannung an den Lampen durch entsprechende Vorkehrungen, innerhalb gewisser Grenzen, auf gleicher Höhe gehalten wird und

nicht mit steigender und abnehmender Geschwindigkeit des Zuges sich ändert. Dabei muß die Maschinenspannung sich so hoch steigern lassen, daß die Batterie voll geladen werden kann. Da nun die Ladespannung einer Batterie höher ist als die Entladespannung und letztere der Lampenspannung entsprechen soll, so ist bei der vorzunehmenden Regelung hierauf Rücksicht zu nehmen. Die Spannungsregelung muß ferner derartig sein, daß beim Ein- und Ausschalten der Maschine, sowie bei der Spannungsregelung ein Zucken der Lampen oder ein starkes plötzliches Schwanken des Lichtes nicht in höherem Maße eintritt, als dies für gute ortsfeste Beleuchtungsanlagen gilt.

(872) Achsbeleuchtung. Die Apparate müssen in ihrem Bau in jeder Weise den schwierigen Betriebsverhältnissen angepaßt sein. Es ist zu berücksichtigen, daß sie ohne jede Aufsicht in Betrieb sind und nur innerhalb größerer Zwischenräume nachgesehen werden können, ferner, daß sie den Einflüssen der Witterung, schnellem Temperaturwechsel, Staub, Feuchtigkeit usw. unterworfen sind.

Eine Einrichtung umfaßt außer der Maschine, der Batterie, dem Leitungs- und Installationsmaterial folgende Teile: 1. Die Antriebsvorrichtung der Maschine, 2. eine Vorrichtung, die Maschinenspannung entsprechend den Erfordernissen der Ladung der Batterie zu regeln, 3. eine Vorrichtung, die Spannung an den Lampen stets gleichmäßig zu halten, 4. einen Selbstschalter, welcher die Maschine in den Stromkreis einschaltet, sobald deren Spannung die Spannung der Batterie erreicht oder überschritten hat, und ebenso dieselbe wieder ausschaltet, sobald die Spannung der Maschine sinkt, 5. eine Vorrichtung, bei Fahrtrichtungsänderung die Pole der Maschine umzuschalten, den Polwechsler, 6. eine Vorrichtung zur Verhütung der Überladung der Batterien, den Spannungsbegrenzer. Hierzu kommt noch bei den Bauarten, welche 2 Batterien verwenden, ein Umschalter für diese Batterien.

1. Der Antrieb erfolgt vorzugsweise durch Balatariemen, neuerdings bei der Deutschen Reichsbahn durch den Keilriemen (Kettenriemen), Bauart R o d e r w a l d, der National-Dynamo-Zugbeleuchtung G. m. b. H.

Die A u f h ä n g u n g der Maschine erfolgt am Wagen-Untergestell oder -Drehgestell. Die Riemenspannung wird entweder durch das Gewicht der Maschine oder durch Federdruck bewirkt. Der R o d e r w a l d -Riemen läuft mit etwas Durchhang, so daß eine Spannvorrichtung wegfällt; die Maschine wird fest aufgehängt.

2. Der M a s c h i n e n - S e l b s t s c h a l t e r, der die Maschine bei Erreichung der Batteriespannung auf das Netz schaltet, besteht durchgängig aus einem Elektromagneten, dessen Kern bei einer bestimmten Spannung in eine Spule aus feinem Draht, deren Enden mit den Dynamoklemmen verbunden sind, hineingezogen wird und hierbei Kontakte schließt. Eine zweite Spule aus stärkerem Draht, welche den Maschinenstrom führt, ist über die erste gelagert und verstärkt sie in ihrer Wirkung.

3. Der P o l w e c h s e l bei Fahrtrichtungsänderung erfolgt in den meisten Fällen durch Umlegen der Bürsten auf dem Kollektor; die Bürsten werden bei Drehrichtungsänderung selbsttätig durch die Reibung auf dem Kollektor bis zu einem bestimmten Anschluß mitgenommen; vielfach wird das Umschalten durch einen Flichkraftregler bewirkt. Die R o s e n b e r g - Maschine gibt bei Änderung der Fahrtrichtung Strom in gleicher Richtung, macht also eine Polwechsellvorrichtung entbehrlich.

4. R e g e l u n g d e r M a s c h i n e n s p a n n u n g ist während der Ladung der Batterie erforderlich. Nach der verwandten Ladeweise unterscheidet man:

- A. Bauarten, bei denen der Maschinenstrom auf gleicher Stärke gehalten wird. Die Aufladung erfolgt also ohne Rücksicht auf den Stromverbrauch des Lampennetzes. Der Ladestrom ist um so größer, je geringer der Netzstrom ist. Es wird meist ein elektrischer Schalter vorgesehen, bei Erreichung einer bestimmten Spannung den Ladestrom auf 0 oder auf einen

sehr geringen Wert zu erniedrigen (Schwebespannung etwa 2,15 V je Zelle), wie bei der Bauart GEZ oder amerikanischen Bauarten, oder ein solcher fehlt (ältere Bauart Stone und Vicarino).

- B. Aufladung mit gleichbleibender Stromstärke, unabhängig vom Netzstrom. Die Stromlieferung der Maschine muß sich dem Netzverbrauch anpassen. Nach Erreichung einer bestimmten Ladespannung erfolgt selbsttätige Schaltung auf die Schwebespannung (Bauart Brown-Boveri & Cie. und amerikanische Bauarten).
- C. Aufladung mit abnehmender Stromstärke. Mit fortschreitender Ladung sinkt die Ladestromstärke. Auch hier erfolgt nach Erreichung einer bestimmten Spannung ein Herabsetzen der Ladestromstärke, so daß die Spannung auf Schwebespannung sinkt (amerikanische Bauarten), oder es erfolgt keine Spannungserniedrigung, d. i. Aufladung mit gleichbleibender Spannung (Bauarten Dick, Dalziel, ESB). Bei letzterer Art der Aufladung wird die Spannung auf 2,4 V je Element gehalten; die Bauart Dick und die Bauart ESB der Electric Storage Battery Co., Philadelphia, gehen auf 2,25 V je Zelle während der Beleuchtung herunter.

In den Vereinigten Staaten von Amerika wird auch vielfach der Amperestundenzähler der Sangamo Electric Co. benutzt, der bei Entladung und Ladung eingeschaltet ist und der die Ladung selbsttätig unterbricht oder die Maschinenspannung auf die Schwebespannung herabsetzt, sobald 25 v. H. mehr in die Batterie geladen sind als herausgenommen waren.

Die Regelung der Maschinenspannung erfolgt fast ausschließlich durch Beeinflussung der Feldstärke. Die Beeinflussung der Umdrehungszahl der Maschine ist in der älteren Bauart der Firma J. Stone & Co. benutzt, indem der antreibende Riemen bei einer gewissen Umdrehungszahl zu gleiten anfängt, so daß die Maschine trotz steigender Geschwindigkeit des Zuges keine größere Umdrehungszahl erhält. Zur Regelung der Feldstärke der Maschine sind 5 Ausführungsarten in Anwendung:

- a) Die Regelung des Erregerstromes durch selbsttätiges Vorschalten von Widerständen (Dick, Brown-Boveri & Cie, Vickers) oder mittels einer gegenelektromotorischen Kraft (Dalziel).
- b) Anordnung einer zweiten, den Hauptstrom führenden Feldwicklung, welche der ersteren entgegenwirkt (Vicarino).
- c) Anwendung einer Maschine für geringe Erregerenergie, die von einer besonderen Akkumulatorenbatterie geliefert wird, deren Strom die Feldmagnete erregt (Pintsch-Grob).
- d) Anordnung eines in sich kurzgeschlossenen Bürstenpaares ungefähr in der Neutralzone der Ankerspannung, zwischen welchen eine elektromotorische Kraft wirkt, die das zu den Hauptbürsten gehörige Feld beeinflusst; Regelung auf gleichbleibende Leistung (GEZ, Rosenberg-Maschine).
- e) Anordnung einer dritten Bürste, der entmagnetisierenden Hilfsbürste; zwischen ihr und einer Hauptbürste ist die Erregerwicklung geschaltet, Regelung auf gleichbleibenden Strom.

5. Regelung der Lampenspannung. Um die Spannung an den Lampen trotz wechselnder Maschinenspannung auf gleicher Höhe zu erhalten, kann man entweder einen festen Widerstand vor die Lampen schalten oder einen selbsttätigen Regelungsapparat verwenden, welcher allmählich mit steigender Maschinenspannung Widerstand vor die Lampen schaltet oder 2 Batterien, von denen die eine die Lampen speist, während die andere aufgeladen wird.

Ein fester Widerstand ist nur anwendbar, wenn die Lampen nicht zu- oder abgeschaltet werden können. Auch in diesem Falle sind die Spannungsschwän-

kungen der Maschine beim Ein- und Ausschalten recht beträchtlich. Selbsttätige Spannungsregler sind vielfach in Anwendung, die die Spannung an den Lampen innerhalb gewisser Grenzen gleichmäßig halten und dabei auch das Zu- und Abschalten einer größeren Zahl von Lampen ohne nennenswerte Spannungsveränderung gestatten.

Einige Bauarten verzichten auf die Verwendung von Lampenreglern, wodurch eine bemerkenswerte Vereinfachung der Schaltung erzielt wird. Es ist zu beachten, daß die Geschwindigkeitsänderungen des Zuges nur sehr allmähliche sind und demgemäß auch die Spannungsänderungen, so daß sie nicht auffällig sind und unangenehm wirken, wie beim Zuschalten von Widerständen. Bei den Bauarten, welche mit einer gleichbleibenden Spannung von 2,25 V je Zelle arbeiten, ist der Wegfall des Lampenreglers ohne weiteres angängig, wie bei den Bauarten Dick und ESB. Die GEZ benutzt einen zweistufigen Schaltapparat, den Spannungsbegrenzer, welcher bei Erreichung einer bestimmten mittleren Ladespannung, bei welcher die Batterie zum größten Teile voll geladen ist, Widerstand in den Nebenschlußkreis der Maschine schaltet und die Spannung und Ladestromstärke dadurch wesentlich herabsetzt, und zwar schaltet er bei 2,3 V je Zelle während der Beleuchtungszeit und bei 2,5—2,6 V während der Tageszeit.

Bei Benutzung von 2 Batterien, deren eine die Lampen speist, während die andere geladen wird, ist die erstere meist mit der Maschine über einen festen Widerstand verbunden, während die zweite Batterie die Lieferung des Lampenstromes unterstützt. Sobald der Zug hält, werden beide Batterien parallel geschaltet und speisen gemeinsam das Netz, wobei jedoch der eben in Ladung gewesenen Batterie ein kleiner Teil des Widerstandes vorgeschaltet bleibt, da diese eine etwas höhere Spannung hat als die andere. Während des Tagesbetriebes sind beide Batterien parallel geschaltet und erhalten volle Ladung. Im Augenblick der Parallelschaltung der Batterien läßt sich schwer ein Zucken des Lichtes vermeiden. Die Verwendung von 2 Batterien erfordert eine Vorrichtung, welche selbsttätig in regelmäßigen Abständen die Batterien von der Ladestellung in die Entladestellung umschaltet und umgekehrt. Die älteste und einfachste Art ist die der Bauart Stone, welche bei jedem Fahrtrichtungswechsel umschaltet. Doch werden bei diesem Verfahren die Batterien sehr ungleich beansprucht, da die Wagen nicht immer beleuchtet fahren und oft ihren Lauf ändern durch Übergang in andere Züge. Ebenso bringen die Änderungen der Jahreszeit Abweichungen in der Dauer der Aufladung hervor. Um dies zu vermeiden, wechselt man die Batterien auch nach jeder Beleuchtungszeit; bei Einschaltung des Lichtes werden gleichzeitig die Batterien umgeschaltet (ältere Bauart Dick und Vicarino). Günstiger erscheint der Wechsel bei jedem Aufenthalt des Zuges (neue Bauart Stone-Liliput und Pintsch-Grob).

(873) Bemessung der Anlage. Bei reiner Batteriebeleuchtung wird die Größe der Batterie für eine wenigstens 20stündige Beleuchtung bemessen. Nur bei Kleinbahnen nimmt man Batterien, welche je nach den Verhältnissen eine geringere Beleuchtungsdauer bis zu 8 und 10 Stunden hergeben.

Bei geschlossener Zugbeleuchtung ist der Kraftbetrieb bei wechselnder Wagenanzahl ein verschiedenes groß, bei Einzelwagenbeleuchtung viel gleichmäßiger. In ersterem Falle bemißt man die Maschinenleistung gleich dem höchst vorkommenden Lampenstrom und wählt die Batterie so groß, daß sie diesen Strom 2—3 Stunden hergeben kann, vorausgesetzt, daß dies nur ausnahmsweise an Festtagen, Markttagen usw. vorkommt. Im zweiten Falle der Einzelwagenbeleuchtung bemißt man die Maschine so, daß die normale Stromstärke das 2—2½fache des Lampenstromes beträgt, wobei angenommen wird, daß die Maschine bei einer Geschwindigkeit von 20—25 km/h Strom gibt. Die Batterie soll diesen Strom etwa 7 Stunden hergeben.

Die Maschinenanlage muß allen Anforderungen entsprechen, die die Betriebsverhältnisse des Wagens an sie stellen. Die Einstellung der Leistung muß so er-

folgen, daß ohne Nachregelung der Apparate der Wagen für alle vorkommenden Betriebsverhältnisse verwendbar ist. Dabei muß eine ausreichende Aufladung der Batterie unter allen Umständen gesichert sein, gleichgültig, ob sie mit gleichbleibender oder veränderlicher Spannung erfolgt, so daß die Batterie am Ende der Fahrt und vor langen Aufenthalten volle Leistung hat.

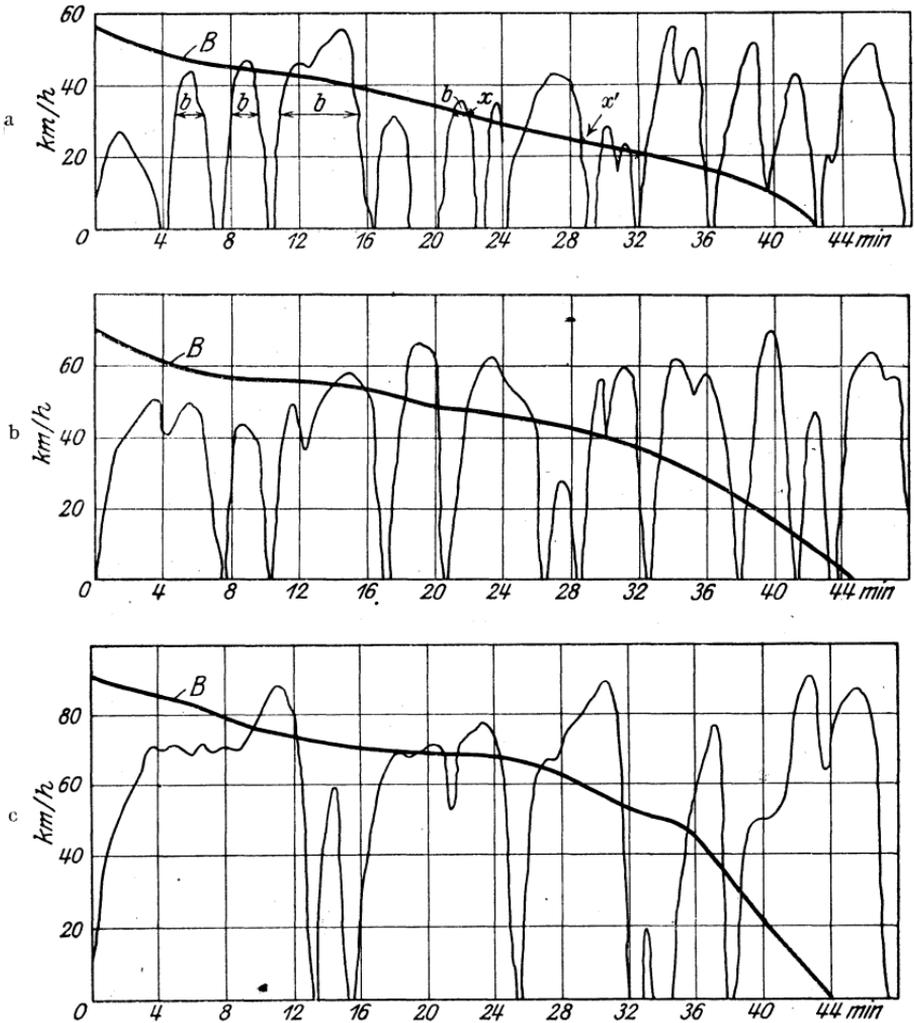


Abb. 498 a, b, c. Geschwindigkeits-Zeitlinien.

(874) Einfluß der Zuggeschwindigkeit. Es ist klar, daß Wagen von Zügen mit großer und mittlerer Geschwindigkeit mit wenigen und kurzen Aufenthalten wesentlich andere Bedingungen an die Maschine stellen, als Wagen von Personenzügen mit geringer Geschwindigkeit und vielen und langen Aufenthalten. Bei letzteren Wagen muß die Maschine bei geringerer Geschwindigkeit auf volle Leistung

kommen und höheren Strom abgeben, um die größere Strommenge, die bei Aufenthalt der Batterie entnommen worden ist, ihr wieder zuzuführen, als im ersteren Falle. Es genügt keineswegs immer, für solche Wagen eine größere Maschine zu nehmen. Die Zeitdauer, bei der die Maschine während einer Fahrt auf volle Leistung kommt, kann eine so kurze sein, daß selbst mit außergewöhnlich großer Maschinenleistung es unmöglich ist, die Batterie wieder aufzuladen. Trotz großer Maschine und Batterie tritt bald völlige Erschöpfung der Batterie ein, die zu Lichtstörungen führt und ein Aufladen der Batterie von einer Ladestelle erforderlich macht. (Es ist wichtig, auf diesen Punkt hinzuweisen, da das öftere Versagen der Batterie fast immer auf zu kleine Bemessung der Batterie geschoben wird.) Vielfach wird man mit einer Maschine kleinerer Leistung, die aber bei geringerer Geschwindigkeit einschaltet, einen Betrieb tadellos durchführen können, bei dem eine Maschine mit größerer Leistung, aber späterer Einschaltung versagt.

Die Abbildungen 498 a, b, c stellen Geschwindigkeit-Zeitlinien von Zügen für verschiedene Betriebsbedingungen dar, und zwar Abb. 498 a für schwierigere, Abb. 498 b für mittlere Betriebsverhältnisse und Abb. 498 c für Schnellzugsbetrieb. Nimmt man an, daß die Achsmaschine bei 25 km Geschwindigkeit

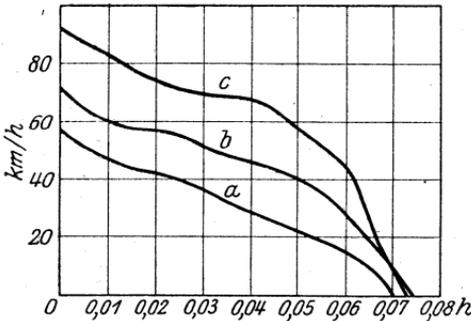


Abb. 499. Fahrtkennlinien.

eingeschaltet wird und ihre volle Leistung bei 32 km erreicht, so zeigt die Wagerechte durch die Geschwindigkeits-Zeitlinien bei 32 km, in wieviel Zeit während der Fahrt diese Leistung von der Maschine geliefert wird. Die Zeiten, während deren die Leistung vorhanden ist, sind mit „b“ bezeichnet. Für die Gesamtfahrt muß diese Zeit, alle Strecken „b“ zusammen gerechnet, so groß sein, daß die Maschine den Strom für das Lampennetz und zugleich den Strom zur vollen Aufladung der Batterie für die abgegebene

Strommenge der Fahrzeit unterhalb der Einschaltgeschwindigkeit hergibt. Wenn man für die verschiedenen Geschwindigkeiten des Zuges diese Linien bestimmt, so erhält man eine Linie „B“, die Fahrtkennlinie. Bei der Kennlinie „B“ der Abb. 498 a bedeutet Punkt x der Geschwindigkeit von 32 km, daß diese insgesamt während 22 Minuten erreicht wird, Punkt x' von 24 km die Einschaltgeschwindigkeit während 28,5 Minuten. Abb. 499 stellt die Fahrtkennlinien der drei Abbildungen nochmals dar, in der die Grundlinie statt Minuten Zehntelstunden angibt. (Verfahren von J. L. Woodbridge und F. G. Beetem, Railway Electrical Engineer, 1920, S. 147 ff.)

Da der Stromverbrauch des Lampennetzes jedes Wagens bekannt ist, ebenso die Vollenleistungsgeschwindigkeit der Maschine, so läßt sich leicht feststellen, ob eine Maschine bestimmten Betriebsverhältnissen entspricht. Durch Vervielfachung der Stromstärke der Maschine bei Vollenleistung mit der Zeit, während welcher die erstere vorhanden ist, erhält man die Amperestunden, welche die Maschine während der Fahrt unter Vollenleistung abgibt. Es betrage nun die Geschwindigkeit, bei der die Maschine auf das Netz geschaltet wird, 24 km, also etwa 75 % der Vollenleistungsgeschwindigkeit. Die Maschinenstromstärke ist dann noch Null, sie wächst gleichmäßig mit der Geschwindigkeit bis zur Vollenleistung. Der Unterschied in der Fahrzeit zwischen niedrigster Vollenleistungsgeschwindigkeit und Einschaltgeschwindigkeit, vervielfacht mit der Hälfte der Vollenleistungsstromstärke, der mittleren Stromstärke während dieser Zeit, muß zu oben bezeichneter

Leistung hinzugefügt werden, um die Gesamtleistung in Amperestunden zu erhalten. Diese darf nicht niedriger sein als die Zahl der Amperestunden, die von der Batterie hergegeben werden, zuzüglich des Wirkungsgrades der Batterie in Amperestunden, also 10 %, sowie eines gewissen Sicherheitsaufschlages.

Die Mittel, die man hat, um eine Einrichtung, die für Schnellzugbetrieb gebaut ist, also bei welcher die Maschine auf etwa 25 km/h Geschwindigkeit und darüber eingeschaltet wird, für Nebenbahnbetrieb zu verwenden, bestehen erstens in der Änderung der Übersetzungsverhältnisse der Maschine und zweitens in der Änderung der Maschinenregelung. Sind diese beiden Mittel nicht zugänglich, so muß eine Umwicklung der Maschine oder deren Ersatz durch eine entsprechend gebaute erfolgen.

Das Übersetzungsverhältnis ist nur in dem durch den beschränkten Raum unterhalb des Wagens gegebenen Maße veränderlich. Die Riemenscheibe kann bei normalen Wagenrädern keinen größeren Durchmesser haben als 650 mm, unter Berücksichtigung der Vorschrift der Deutschen Staatsbahnverwaltungen (B. O. § 11, Anl. A.), daß kein Teil des Wagens in den Raum 130 mm oberhalb der Schieberoberkante hereinragen darf.

Bei Drehgestellwagen wird die Achsriemenscheibe nicht über 500, meist aber nur 450 mm betragen können, je nach der Bauart des Drehgestelles. Die Maschinenscheibe kann nicht gut unter 120 mm Durchmesser ohne Nachteil für den Riemen verwendet werden. — Für Roderwald-Antrieb darf die Maschinenriemenscheibe nicht kleiner als 160 mm Durchmesser sein, so daß hierdurch die Grenzen der möglichen Übersetzungsverhältnisse gegeben sind.

Der zweite Weg, durch Änderung des Maschinenreglers die Volleistungsgeschwindigkeit schneller zu erreichen, etwa durch Einschalten von weniger Widerstand in den Erregerstromkreis der Maschine, bedingt die Beibehaltung der Einschaltgeschwindigkeit, ist also nicht so wirkungsvoll.

Vorteilhaft ist es, die Maschine von vornherein so zu bauen, daß sie allen Betriebsverhältnissen entspricht. Nur selten sind im Betriebe einer größeren Verwaltung die Wagen in ihrer Verwendung scharf getrennt. In den meisten Fällen müssen die Wagen, welche vorzugsweise auf Nebenlinien laufen, auch in der Lage sein, auf dem Hauptnetz zu verkehren und umgekehrt, so daß es meist notwendig ist, die Einrichtung für alle Betriebsverhältnisse geeignet zu gestalten.

(875) Beschreibung bemerkenswerter Bauarten. 1. Bauart Dick stammt von Ingenieur Emil Dick. Schaltbild Abb. 500, vierpolige Nebenschlußmaschine, Nutenanker mit Trommelwicklung. Der Polwechsel erfolgt durch Verschieben der Kohlenbürstenhalter bei der Umkehr bis zu einem Anschlag. Maschinenselbstschalter mit Strom- und Spannungswicklung r und s . Der Spannungsregler ist ein Elektromagnet mit einer Spannungswicklung a aus vielen Windungen dünnen isolierten Kupferdrahtes und einer aus wenigen Windungen bestehenden Stromwicklung i . Unterhalb der Wicklungen befindet sich ein mit Quecksilber gefülltes Kontaktgefäß, das aus vielen voneinander isolierten Kontaktscheiben zusammengesetzt ist, an deren Ableitungsösen die einzelnen Stufen des Regelwiderstandes f anschließen. Der in das Kontaktgefäß hineinragende weiche Eisenkern trägt am unteren Ende einen Kolben aus Isoliermaterial. Sind die Spulen stromlos, so steht der Kolben bis auf den Boden des Gefäßes auf.

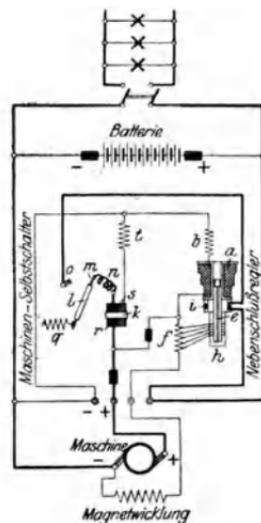


Abb. 500. Schaltungsplan nach Dick.

wobei das von ihm verdrängte Quecksilber alle Kontaktscheiben kurzschließt. Wird der Kern bei Stromdurchgang hinaufgezogen, so sinkt der Quecksilberspiegel und es schaltet sich dadurch Widerstand in den Erregerstromkreis der Maschine. Vor dem Regler befindet sich ein zweistufiger Vorschaltwiderstand. Ist der Hauptschalter offen, brennen also die Lampen nicht, so ist der ganze Widerstand eingeschaltet. Derselbe ist so bemessen, daß die Spannung der Maschine bis auf 2,4 V für das Element steigen kann. Ein Lampenregler ist nicht vorgesehen. — Die Patente der Bauart befinden sich im Besitze der Gesellschaft für elektrische Zugbeleuchtung m. b. H., Berlin. Eingeführt ist die Bauart besonders auf den Bahnen Österreichs, der Tschechoslowakei, Rumäniens, auf der Bahn Paris-Lyon-Mediterranée, sowie den Wagen der Compagnie Internationale des Wagons-lits.

2. Bauart Brown, Boveri & Co. Nebenschlußmaschine. Polwechsel durch Verschieben der Bürsten auf dem Kollektor um eine Polteilung bei Änderung der Fahrtrichtung. Schalter und Regler in einem geschlossenen eisernen Gehäuse. Schaltbild 501 — *C* ist ein Maschinenselbstschalter. Der Regler *M*

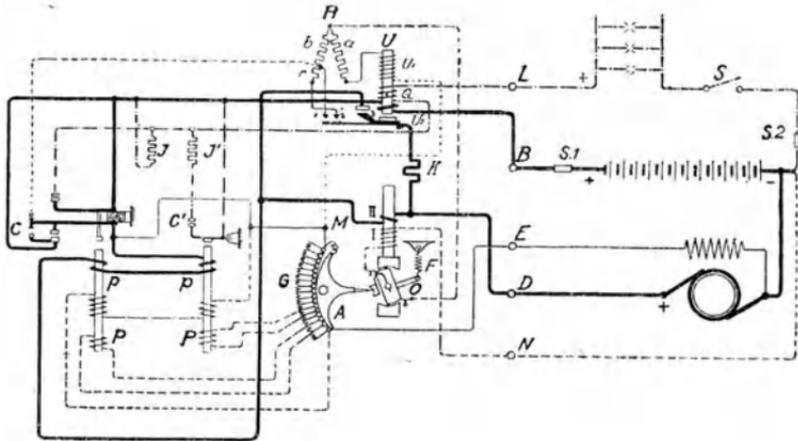


Abb. 501. Schaltungsplan nach Bauart Brown-Boveri.

besteht aus einem Kontaktsektor, der sich über eine Anzahl den einzelnen Widerstandsstufen entsprechenden Kontakte wälzt. Der Sektor wird bewegt durch eine Spule *O*, welche in einem Magnetfeld drehbar gelagert ist, das erzeugt wird von zwei Wicklungen, die Nebenschlußwicklung *I* und die Hauptstromwicklung *II*, die den Maschinenstrom führt. Der Schalter *U* hat drei Wicklungen, die Nebenschlußwicklung *U_I*, die den Lichtstrom führende Wicklung *Q* und die den Batteriestrom führende Wicklung *U_{II}*. Diese wirken auf den Regler in dem Sinne, daß die Batterieladung bei voll eingeschalteten Lampen einen Wert annimmt, der noch eine gute Aufladung sichert, so daß die Maschine vollständig ausgenutzt wird. Werden die Lampen auf Dunkel gestellt, der Lichtstrom also vermindert, dann steigt die Ladespannung an; wird der Lichtstrom über seinen Normalwert gesteigert, dann geht die Maschinenspannung zurück, so daß die Maschine vor Überlastung vollständig geschützt ist. — Die Bauart ist eingeführt auf den Schweizer Bundesbahnen, auf französischen und russischen Bahnen, der Deutschen Reichsbahn usw.

3. Bauart G E Z der Gesellschaft für elektrische Zugbeleuchtung m. b. H., Rosenberg-Maschine, die auf gleichbleibende Leistung regelt und bei wechselnder Drehrichtung Strom in gleichem Sinne liefert. Der von Hand einstellbare Neben-

schlußregler besitzt eine Reihe von zu- oder abschaltbaren Eisendrahtwiderständen, die das Anwachsen des Erregerstromes nur bis zu einem gewissen Grade zulassen. Schaltbild Abb. 502: Maschinenselbstschalter normaler Bauart. — Der Spannungsbegrenzer besteht aus einer Spule, die bei einer bestimmten Spannung einen Eisenkern in die Höhe zieht, wobei ein Widerstand in die Erregerwicklung geschaltet wird. Vor der Spule liegt ein Einstellwiderstand mit zwei Abzweigklemmen. Jede derselben entspricht einem bestimmten Widerstand. Die Stellung mit dem kleineren Widerstand ist bei Beleuchtung und die andere bei Tagesfahrt eingeschaltet; der Hauptschalter ist dreipolig. Der Widerstand bei Beleuchtung ist so bemessen, daß die Maschinenspannung auf 2,25 bis 2,3 V je Element der Batterie steigen kann, ehe der Begrenzer in Tätigkeit tritt. Da die Ladung der Batterie zur Beleuchtungszeit nur verhältnismäßig schwachen Strom liefert, so ist der Anstieg der Batteriespannung ein entsprechend langsamer. Bei Erreichen der Spannung von 2,25 bis 2,3 V wird durch den Begrenzer Widerstand in den Erregerstromkreis geschaltet und die Spannung bedeutend ermäßigt, so daß nur ein geringer Strom in die Batterie geht, der zu schwach ist, eine nennenswerte Erhöhung der Batteriespannung zu bewirken. Wird das Lampennetz ausgeschaltet, so wird die zweite Stellung des Begrenzers

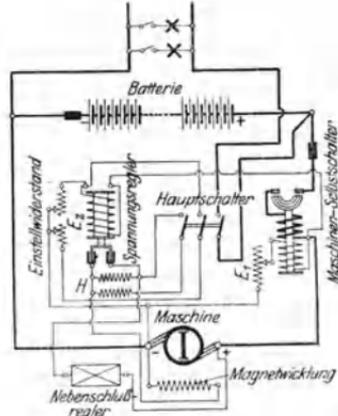


Abb. 502. Schaltungsplan nach GEZ.

eingeschaltet, bei welcher die Spannung bis zu 2,5 V je Element steigen kann, so daß die Batterie ordnungsgemäß aufgeladen wird.

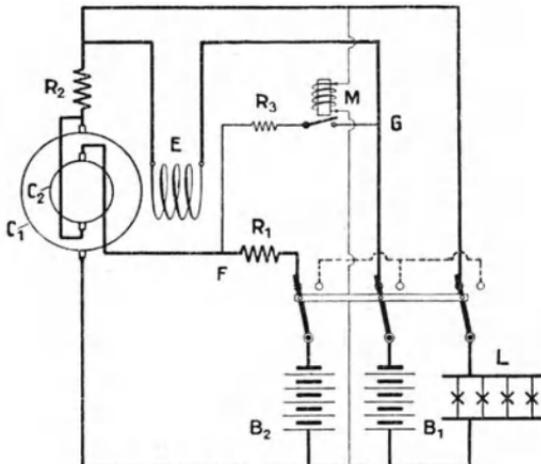


Abb. 503. Schaltungsplan nach Pintsch-Grob.

eingeschaltet, bei welcher die Spannung bis zu 2,5 V je Element steigen kann, so daß die Batterie ordnungsgemäß aufgeladen wird.

Diese Bauart ist eingeführt auf der deutschen Reichsbahn, den meisten deutschen Kleinbahnen, den dänischen Staatsbahnen, russischen und französischen Bahnen.

4. Bauart Pintsch-Grob. Die Maschine wird durch den Strom einer Batterie erregt. 1 V an den Klemmen der Erregerspule E (Schaltplan Abb. 503) genügt, die Maschine bei der niedrigsten Umdrehungszahl von 500 U/min, bei welcher sie Strom abzugeben hat, zu erregen. Hat die Maschine die Spannung der Batterie, z. B. 24 V, erreicht, so fließt kein Strom durch E und die Maschine ist nicht erregt, so daß die Spannung sofort sinkt. Hat sie sich jedoch um ein Geringes, etwa um 1 V, verringert, so tritt sofort volle Erregung ein und die Spannung sinkt nicht weiter. Die Maschinenspannung kann deshalb nur um einen Bruchteil von 1 V steigen, selbst bei höchster Drehzahl. Eine zweite Batterie wird während des Maschinenbetriebes aufgeladen. Um die dazu erforderliche höhere Spannung zu erhalten, hat der Anker noch eine zweite Wicklung mit eigenem Kollektor C_2 , der mit dem Kollektor C_1 , der Hauptwicklung, in Reihe geschaltet ist und der zu dessen Spannung noch einen Betrag von etwa 20 % hinzufügt. Die andere Batterie bestimmt die Höhe der Spannung. R_1 ist ein Widerstand, der den Ladestrom nach oben begrenzt. Der Widerstand R_2 erhöht durch den größeren Spannungsabfall bei eingeschalteten Lampen die Ladespannung etwas. Die Aufladung erfolgt also mit gleichbleibender Spannung der Maschine. Ein Fliehkraftregler verbindet bzw. trennt die Maschine von der Batterie bei einer bestimmten Zuggeschwindigkeit. Er hat gleichzeitig die Aufgabe, bei Fahrtrichtungsänderung die Enden der Erregerwicklung miteinander zu vertauschen und ferner die beiden Batterien bei jedem Halt zu wechseln, damit abwechselnd jede Batterie zur Ladung kommt (letzteres in Abb. 503 nicht zur Darstellung gebracht). Der Maschinenantrieb erfolgt durch eine Kette mit einer Ausgleichkupplung, die die Stöße beim Bremsen aufnehmen soll. Die Bauart ist eingeführt bei der deutschen Reichsbahn, der deutschen Reichspost und der dänischen Postverwaltung.

5. Bauart Stone ist die am meisten verbreitete Bauart, da sie hauptsächlich auf den englischen und den unter englischem Einfluß stehenden Bahnen eingeführt ist. Hergestellt wird sie von der Firma J. Stone & Co., London-Deptford. Sie verwendet eine am Wagenuntergestell pendelnd aufgehängte Dynamomaschine mit Riemenantrieb. Hat der Wagen eine Geschwindigkeit erreicht, bei der die Spannung der Maschine gleich der der Batterie geworden ist, so wird durch einen auf der Achse der Dynamomaschine befindlichen, durch Fliehkraftregler betätigten Ausschalter der äußere Stromkreis geschlossen. Bei weiterer Steigerung der Spannung gibt die Maschine Ladestrom für die eine der beiden Batterien und speist gleichzeitig die Lampen unter Zwischenschaltung eines kleinen Widerstandes. Steigt die Geschwindigkeit des Wagens jedoch über eine gewisse Grenze, so wird die Maschine infolge ihrer exzentrischen Aufhängung aus ihrer Lage gebracht und nähert sich der Riemenscheibe. Infolgedessen beginnt der Riemen zu gleiten, und die Spannung erhöht sich nicht mehr. Bei der ursprünglichen Ausführung, die erst vor einigen Jahren aufgegeben worden ist, wurden die verschiedenen Umschaltungen von einem Fliehkraftregler mit Hilfe eines dreiarmligen, dreh- und verschiebbaren Kontaktarmes auf dem Schaltbrett auf der Welle der Dynamomaschine bewirkt.

Neuerdings hat man diese Art der Schaltung, von der über 70000 Ausrüstungen geliefert worden sind, geändert. Die jetzige Anordnung wird unter der Bezeichnung „Stone-Liliput“ in Handel gebracht. Der Fliehkraftregler ist weggefallen. Der Polwechsel erfolgt bei Fahrtrichtungsänderung durch einen besonderen Kipp-schalter, der an der Ankerseite auf der Welle angebracht ist und von dem Bürstenhalter beeinflußt wird. Es werden sowohl Ausführungen mit einer Batterie als auch solche mit zwei Batterien geliefert. Das Schaltbild der Ausführung mit einer Batterie gibt Abb. 504 wieder. Der Maschinenselbstschalter ist ein elektromagnetischer Apparat mit einer Strom- und einer Spannungswicklung, der mit Einschalten der Maschine gleichzeitig Widerstand vor den Lampenstromkreis schaltet, und zwar mit steigender Spannung in drei Stufen bei Verwendung von einer Batterie; bei zwei Batterien ist nur eine Stufe vorhanden. Sobald die

Batterie geladen ist, wird durch einen zweiten Schalter ein passender Widerstand parallel zur Batterie geschaltet, die infolgedessen nur noch einen schwachen Strom erhält. Der Schalter besteht gleichfalls aus einem Elektromagnet mit einer Strom- und einer Spannungsspule. Durch Anzug des Kernes werden die Kontakte geschlossen, die die Einschaltung des Widerstandes bewirken. Bei Verwendung von zwei Batterien wird die Umschaltung durch einen besonderen Schalter, den sogenannten Pegoud-Wechselschalter, bewirkt, der bei jedem Anfahren des Zuges die Batterie selbsttätig umschaltet.

Für stark veränderliche Betriebsverhältnisse hat Stone dann eine weitere Ausführungsart geschaffen, die gleichfalls unter der Bezeichnung „Stone-Liliput für wechselnde Geschwindigkeiten“ vertrieben wird. Bei dieser fällt die Spannungsregelung der Maschine durch das Gleiten des Riemens weg. Es wird eine besondere Maschine mit einem Paar Hauptbürsten und einer Hilfsbürste verwendet. Die Hilfsbürste steht senkrecht zu den Hauptbürsten. Wenn die Maschine leer läuft, ist der Erregerstrom am größten. Die Spannung zwischen der Hilfsbürste und den Hauptbürsten ist ungefähr die Hälfte der Spannung der Maschine. Liefert die Maschine Strom, so bewirkt die Ankerrückwirkung eine Ver-

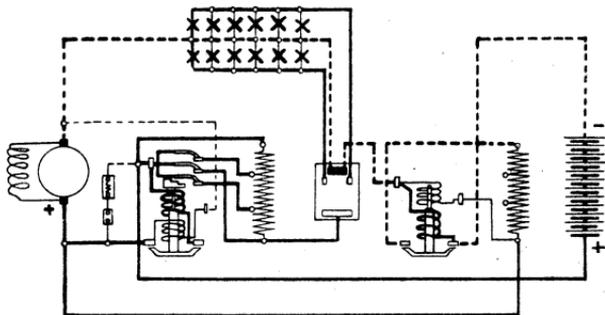


Abb. 504. Schaltungsplan, Bauart Stone-Liliput.

drehung des Feldes und ein Vorrücken der neutralen Achse in der Drehrichtung. Die Kraftlinien werden aus dem Raum zwischen der — Hauptbürste und der Hilfsbürste verdrängt nach dem Raume zwischen der Hilfsbürste und der anderen Hauptbürste. Infolgedessen sinkt die Spannung zwischen der Hilfsbürste und der — Bürste und damit auch die Erregung der Feldmagnete, und der Strom kann nicht größer werden trotz steigender Geschwindigkeit, so daß also der für die Ladung der Batterien vorgesehene Strom auf gleicher Höhe gehalten wird. Wenn keine Lampen brennen, liefert also die Maschine den für die Ladung der Batterien erforderlichen Strom in gleichbleibender Stärke.

Wird das Lampennetz eingeschaltet, so tritt eine den Maschinenstrom führende, dem Lampenstromkreis vorgeschaltete Wicklung S (Abb. 505) der Feldmagnete in Wirkung, zu der ein Widerstand a parallel geschaltet ist. Dieser wird so eingestellt, daß nur ein bestimmter Teil des Lampenstromes durch die Wicklung geht, und zwar so viel, daß der Maschinenstrom sich durch die Wirkung der Wicklung S um den für die Lampen erforderlichen Teil erhöht, während der Ladestrom derselbe bleibt, ob die Lampen zu- oder abgeschaltet werden.

Die Maschine hat noch eine dritte Wicklung b , die mit der Hilfsbürste einerseits und mit dem Ladebegrenzer andererseits verbunden ist. Dieser besteht aus einem Elektromagnete, dessen Wicklung parallel zu den Klemmen der Batterie liegt. Sobald die Spannung der Batterie eine bestimmte Höhe erreicht, wird der Kern des Magnets angezogen, und dieser stellt nunmehr eine Verbindung der

Wicklung h mit der positiven Bürste her. Die Wicklung h arbeitet der Wicklung g entgegen, schwächt das Feld und vermindert dadurch den Ladestrom der Batterie.

Bei besonderen Betriebsbedingungen, die eine große Stromlieferung der Maschine bedingen, kann man auch die Wicklung h so schalten, daß ihre Wirkung die Wicklung g unterstützt.

(876) Die Kosten der elektrischen Beleuchtung sind je nach Bauart und Ausstattung verschieden. Sie sind im allgemeinen bei großen Bahnnetzen gleich der Gasbeleuchtung, bei kleineren Netzen vorteilhafter wegen der hohen Kosten der Gasanstalt. Die Betriebskosten stellen sich nur bei sehr billigem Gasbezug, wie er durch große Gasanstalten ermöglicht wird, höher als die Gasbeleuchtung.

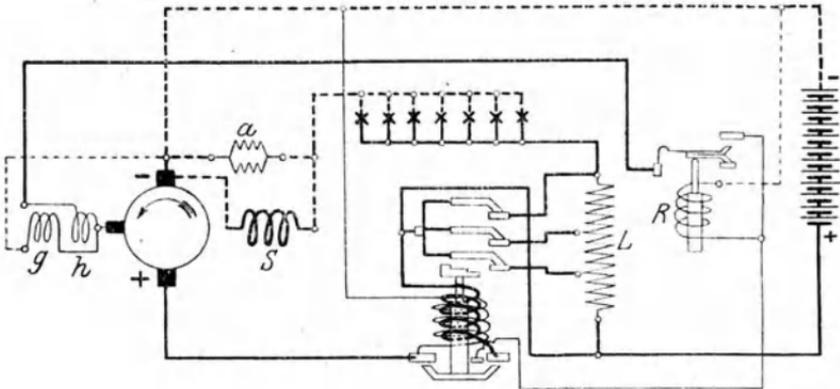


Abb. 505. Schaltungsplan, Bauart Stone-Liliput für wechselnde Geschwindigkeiten.

Die Vorzüge der elektrischen Beleuchtung bestehen, abgesehen von den allgemeinen der elektrischen Beleuchtung überhaupt, insbesondere in dem absoluten Schutz vor Feuersgefahr bei Eisenbahnunfällen, der Abwesenheit jedes unangenehmen Geruches im Gegensatz zur Gasbeleuchtung, der Möglichkeit einer guten Lichtverteilung, u. a. der Anordnung von Lese-, Bett- und Tischlampen, der Möglichkeit einer guten Lüftung der Wagen durch Anbringung von Ventilatoren.

Literatur: Adolf Prash, Die elektrische Beleuchtung der Eisenbahnzüge. Stuttgart 1901, Ferdinand Enke. — Dr. Max Büttner, Die Beleuchtung von Eisenbahn-Personenwagen mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Beleuchtung. 3. Aufl. Berlin 1924, Julius Springer. — Derselbe, Neuerungen und Fortschritte der elektrischen Zugbeleuchtung. Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen 1916, S. 345. — J. Schmidt, Die elektrischen Zugbeleuchtungssysteme unter besonderer Berücksichtigung des gemischten Betriebssystems. Helios, Fachzeitschrift für Elektrotechnik 1915, S. 415; 1916, S. 145ff. — Wechmann, Fortschritte auf dem Gebiete der elektrischen Zugbeleuchtung. Verkehrstechnische Woche 1915, S. 337. — Dr. E. Rosenberg, Elektrische Zugbeleuchtung. Z.V.D.I. 1915, S. 380. — E. Dick, Elektrische Beleuchtung von Personenwagen nach dem vereinfachten System Dick. ETZ 1914, S. 1077.

Elektrische Wärmeerzeugung.

Elektrisches Heizen und Kochen.

(877) **Elektrische Widerstandsheizkörper.** Ein elektr. Heizkörper besteht im wesentlichen aus einem Elektrizitätsleiter aus Metall, Kohle oder einem ähnlichen Stoff in Form von Draht, Band, dünner Schicht usw., der durch Glimmer, Mikanit, Asbest, Glasperlen oder andere Stoffe elektrisch isoliert ist. Seine einfachste Form ist eine Drahtspule, die in die zu erhitzende Flüssigkeit eingetaucht wird. Das ist aber nur in den Fällen anwendbar, wo die Flüssigkeit elektrisch isoliert und den Widerstandsstoff chemisch nicht angreift. Meist wird ein Widerstandsdraht zickzackförmig oder ein Band mäanderartig zwischen 2 Isolationsplatten gelegt oder um eine Isolationsplatte gewickelt und durch Einfalzen in Blech mechanisch fest gemacht. Bei älteren Verfahren wurde der mit Glasperlen isolierte Heizdraht in die Nuten einer Metallplatte eingelegt und mit Steinkitt darin befestigt, oder ein in Schamottepulver oder Schamottestücken eingebetteter Heizdraht mit Metall umgossen, oder der Heizdraht in die Emailleschicht einer emaillierten Platte eingebettet. Eine besondere Stellung nimmt das „Prometheus“-Verfahren ein, bei dem Edelmetallwiderstände in breiten dünnen Schichten anfänglich auf Emaile, später auf Glimmer, eingebrannt wurden. Dieses Verfahren gestattet auf gleichbleibender Fläche, beispielsweise von 150×30 mm, unterschiedliche Widerstände von 1—10 000 Ω herzustellen.

Für die Wahl des Widerstandstoffes sind hauptsächlich folgende Eigenschaften maßgebend: hoher spezifischer Widerstand, geringer Temperaturkoeffizient, hoher Schmelzpunkt und geringe Oxydation. Die beiden letzteren Forderungen haben zunächst zur Verwendung von Platin geführt und bei dessen stetiger Verteuerung zur Benutzung von reinem Nickel. Dieses hat aber einen niedrigen spezifischen Widerstand und einen hohen Temperaturkoeffizienten, wodurch kleine, wenig haltbare Querschnitte des Leiters und hohe Anlaßstromstärken verursacht werden. Legierungen haben höheren spezifischen Widerstand und geringeren Temperaturkoeffizienten (70), und so haben sich Legierungen von Nickel, Stahl, Chrom, Mangan usw. als am zweckmäßigsten erwiesen, da es auch gelungen ist, ihren Schmelzpunkt und ihre Widerstandsfähigkeit gegen Oxydation auf eine befriedigende Höhe zu bringen. Von dem Isolierstoff wird ebenfalls hohe Temperaturbeständigkeit, beste elektr. Isolierung, möglichst gute Wärmeleitung, Dehnbarkeit usw. verlangt; er soll sich leicht bearbeiten lassen und nicht hygroskopisch sein. Diese Eigenschaften vereinigt am besten natürlicher Glimmer. Daneben kommt sogenannter künstlicher Glimmer, Mikanit in Frage.

Der Wunsch, hohe Temperaturen des Heizkörpers zu erreichen, führte auch zur Anwendung von Halbleitern, insbesondere Kohle. Sie wurde in Form kleiner Körner und gemischt mit Nichtleitern zum Herstellen verschieden hohen Widerstandes unter dem Namen Kryptol benutzt. Der hohe negative Temperaturkoeffizient, geringe Haltbarkeit der Elektroden, schneller Abbrand des Stoffes, die notwendige Regelung usw. haben die praktische Einführung von Kohlewider-

ständen verhindert; sie sind heute nur noch in Laboratorien zu finden. Eine andere Möglichkeit, die Kohle zu verwenden, ergab sich, als es Bölling¹⁾ gelungen war, sie in Siliziumdämpfen zu glühen und dadurch unverbrennbar zu machen. Dieses „Silundum“ genannte Material kann mit Temperaturen bis etwa 1700° C beansprucht werden. Es hat höheren Widerstand als Kohle und einen geringen negativen Temperaturkoeffizienten. Es wird nicht in Körnerform, sondern in Stäben runden oder viereckigen Querschnittes und in Rohren oder Formstücken verarbeitet und benutzt. Ähnlich ist „Silit“, das aus Siliziumkarbid mit freiem Silizium und verkohlbarem Bindemittel besteht und ebenfalls in Form von Stäben, Rohren und Platten angewendet wird²⁾.

Zur Vermeidung von Metallwiderständen ist oft vorgeschlagen worden, die zu erhitzende Flüssigkeit selbst als Widerstand zu benutzen³⁾. Das ist aber nur möglich, soweit die Flüssigkeit leitend ist, bzw. leitend gemacht werden kann. Meist findet dabei eine unerwünschte Elektrolyse statt, auch wird die Flüssigkeit und ihr Gefäß spannungsführend, dadurch entsteht eine Gefahr für die Bedienung, und die Geräte werden ziemlich unhandlich. Ferner ist es schwierig, eine bestimmte Leistung des Apparates bei den vorkommenden verschiedenen Spannungen und der verschiedenen Leitfähigkeit der Flüssigkeiten einzustellen. Es haben sich deshalb solche Heizgeräte nur wenig einführen können. Dagegen sind in den letzten Jahren für große Leistungen sogenannte Elektroden-Dampfkessel mit direkter Anwendung von hochgespanntem Wechselstrom ausgeführt worden⁴⁾.

(878) Wärmeerzeugung durch Induktion wird heute fast nur für die besonderen Zwecke der Elektrometallurgie angewandt. Sie ist im 11. Abschnitt ausführlich beschrieben (939 C). Eine Schweizer Firma brachte um die Jahrhundertwende elektr. Heizgeräte auf den Markt, bei denen eine Induktionsspule in dem umgebenden Metall Wirbelströme erzeugt und es auf diese Weise erhitzt. Auch bei diesen Geräten war die Regulierung ziemlich schwierig; ihre Benutzung war ferner auf Wechselstromanlagen beschränkt, und sie verursachten eine unerwünschte Phasenverschiebung. Solche Geräte konnten sich ebenfalls nicht einbürgern.

(879) Wärmeerzeugung durch den Lichtbogen ist heute auf die Zwecke der Elektrometallurgie beschränkt (939 A). Im Anfang der elektr. Heiztechnik suchte man Geräte, die verhältnismäßig hohe Arbeitstemperaturen benötigten, wie LötKolben, Brennstempel u. dgl., mit Lichtbogen zu erwärmen. Es bildete dann die Metallmasse des Gerätes den einen Pol und eine bewegliche und isoliert angeordnete Kohle den anderen meist positiven Pol, zwischen denen der Lichtbogen gezogen wurde. Solche Geräte erforderten entweder eine niedrige Spannung oder bei den üblichen Leitungsspannungen besondere Vorschaltwiderstände, bzw. Drosselspulen, ferner eine dauernde Nachstellung der Kohlenelektrode zur Aufrechterhaltung des Lichtbogens und waren wenig geeignet für die Benutzung durch Laien. Die punktförmige intensive Erhitzung des Lichtbogens war wohl für die genannten einzelnen Geräte erwünscht, für die meisten anderen Anwendungszwecke dagegen hinderlich, und auch solche Heizgeräte haben keine größere Einführung gefunden.

(880) Aufbau elektrischer Heizgeräte. Die einfachen el. Wasserkocher werden aus Messing, innen verzinkt, außen vernickelt, aus Kupfer, Reinnicke), Aluminium, oder auch aus Eisen, innen und außen emailliert, angefertigt. Ursprünglich wurde ein zylindrisches Innengefäß mit einer Heizwicklung auf Asbestunterlage versehen und in ein zweites Außengefäß hineingesteckt. Jetzt werden die Wasserkocher meist nach Abb. 506 ausgeführt. Das zylindrische Oberteil ist zu einem sogenannten Hezsack verengt, auf dessen Außenseite der el. Heizkörper befestigt und durch eine zweite Schutzkappe abgedeckt wird. Die Erwärmung solcher Wasserkocher erfolgt von der Seite her durch bandförmige Hezelemente, die meist wie eine Schelle befestigt werden. Die Schutzhaube trägt die beiden Kontaktstifte für die Energiezuführung, die sich auf Federn des Heizwiderstandes auf-

setzen. Sowohl die Isolierung der Kontaktstifte in der Schutzhaube, wie auch die Verlötung der letzteren am Oberteil muß nach den Verbandsvorschriften vollständig wasserdicht sein, damit ein solcher Kocher behufs Reinigung in Spülwasser getaucht werden kann, ohne daß die el. Heizeinrichtung durch eindringende Feuchtigkeit beschädigt wird. Manche Firmen bringen auch bei diesen Wasserkochern ein scheibenförmiges Hezelement auf dem Boden an, doch ergibt solche Beheizung eine geringere Heizfläche und auch die Befestigung des Heizkörpers ist schwieriger.

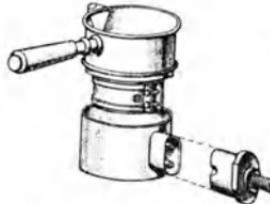


Abb. 506. Elektrischer Wasserkocher.

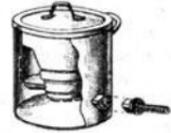


Abb. 507. Elektrischer Kochtopf.

El. Kochtöpfe, wie solche für Küchenzwecke gebraucht werden, sind meist aus Kupfer, nickelplattiertem Blech, Aluminium oder Gußeisen hergestellt. Bei ihnen ist unbedingt eine Bodenheizung erforderlich, die zweckmäßig durch eine Seitenheizung ergänzt und vergrößert wird (Abb. 507). Die flachen Hezelemente werden auf den Boden aufgeschraubt, der zu diesem Zweck außen mit einer Aluminiumschicht verstärkt ist, oder an dem Verstärkungen für die Halteschrauben angegossen sind. Entsprechend ihrem größeren Inhalt werden diese Töpfe auch mit größerer Energieaufnahme ausgeführt, die dann regulierbar ist. Das Regulieren kann in einfachster Weise durch Umstecken des Gerätesteckers (Abb. 508) (Heizwiderstände parallel, in

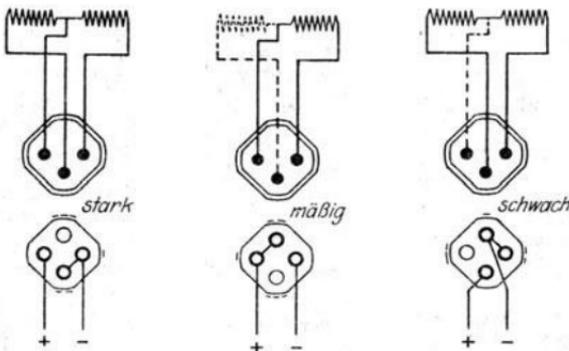


Abb. 508. Schaltung des elektrischen Kochtopfs.

Reihe oder einzeln) oder durch entsprechende Regulierschalter erfolgen. Einzelkochtöpfe werden meist durch Geräteanschlußschnüre angeschlossen, wogegen in vollständigen elektrischen Küchen schnurlose Kontakte eine Vermeidung der sich verschleißenden Schnüre ermöglichen. Solche schnurlosen Kontakte werden auf einem Kochtisch angeordnet, u. U. als Aufsätze für vorhandene Kochtische geliefert, und zwar aus Metall, um eine Erdung der aufgestellten Töpfe zu erzielen 5).

El. Heizplatten, die meist aus Gußeisen angefertigt sind, unterscheiden sich von den direkt beheizten Kochtöpfen dadurch, daß el. Heizkörper und Kochgefäß getrennt sind. Das hat den Vorteil, daß auf einer Heizplatte nacheinander verschiedene Töpfe und Pfannen benutzt werden können, aber den Nachteil, daß infolge der indirekten Heizung die Erwärmung ziemlich langsam und mit geringerem Wirkungsgrad erfolgt. Meist sind die Heizplatten als Tischherde

(Abb. 509) ausgebildet mit 1—4 Kochstellen und in das Gehäuse eingebauten Regulierschaltern. Durch ihren Zusammenbau mit darunter angeordneten Bratofen und Wärm- bzw. Grillraum erhalten sie die Form üblicher Küchenherde. Solche Herde werden auch kombiniert mit Kohlen- oder Gasheizung und el. Heizung ausgeführt.

El. Bügeleisen sind die am meisten benutzten Heizgeräte. Sie sind aus Schmiede- oder Gußeisen hergestellt, meist außen vernickelt, und bestehen aus einer flachen Bügelsohle, auf der das el. Heizelement befestigt ist, und einer gewölbten Haube, die den Griff und die Kontakte trägt (Abb. 510). Diese Bügeleisen werden in allen erforderlichen Gewichten und gebräuchlichen Formen sowohl für Haushaltungen als auch für Gewerbe geliefert⁶⁾. Infolge der dauernden Energiezufuhr bleibt das Bügeleisen gleichmäßig warm, und bei Arbeitspausen muß die Energiezufuhr abgeschaltet werden. Da bei den Bügeleisen die Arbeitstemperatur eine ziemlich hohe sein muß, so werden auch Gerätestecker und Geräteanschlußsnüre sehr heiß und verhältnismäßig schnell verschleißt. Sehr



Abb. 509. Elektrischer Tischherd.



Abb. 510. Elektrisches Bügeleisen.

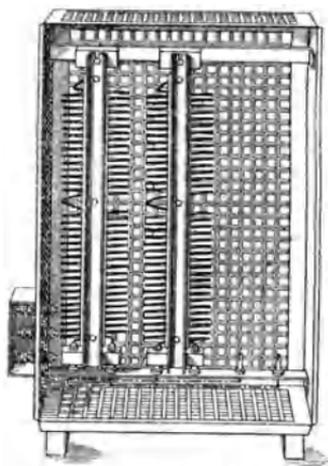


Abb. 511. Elektrischer Ofen (Zirkulationsofen).

wichtig ist die geeignete Führung der Zuleitungsschnur, die von rechts oben kommend und nachgiebig aufgehängt sein soll und ferner die Einfügung eines Ausschalters, am besten eines sogenannten Steckerschalters, damit ein Ausschalten durch Abziehen des heißen Gerätesteckers, das zum Abreißen der Zuleitungsschnur führt, vermieden wird.

El. Heizöfen werden als Lampen- oder leuchtende Öfen für kleine Leistungen bis etwa 1 kW, als strahlende Öfen mit Glimmerheizelementen oder als Zirkulationsöfen (Abb. 511) ausgeführt. In einem durchlochtem Gehäuse einfacher oder verzierter Ausführung sind die auswechselbaren Heizwiderstände montiert, und zwar meist in einer durch 3 teilbaren Anzahl, damit die Öfen bei Drehstrom für gleichmäßige Phasenbelastung geschaltet werden können. El. Heizöfen können auch als Zieröfen oder Kamine ausgebildet werden, zu denen dann noch el. Nachahmungen der Holzscheitfeuerung benutzt werden.

(881) Anwendung el. Koch- und Heizgeräte im Haushalt und ihre Betriebskosten. Die gebräuchlichsten Heizgeräte: Wasserkocher, Bügeleisen, Brennscherenwärmer, Zigarrenanzünder, Heißluftduschen usw. haben eine Energie-

Energieverbrauch im Haushalt.

Zahl der Haushaltsgmitglieder	6	6	5	5	4	3	3	2
	Personen							
Verbrauch	Kilowattstunden							
im Dez. 1912	222	193,5	84,6	115	80	46,2	82	34
„ Jan. 1913	200	89,3	120,5	118	72,6	48,8	76	26
„ Febr. 1913	190	147,8	102	110	76	57,4	72	32
„ März 1913	256	170,6	114,2	104	86	111,2	86	46
„ April 1913	162	148,8	117,8	97	53,8	60,6	89	22
„ Mai 1913	210	137,4	90,5	76	48,6	71	89	47
„ Juni 1913	230	125,1	103	37	47	74	49	31
„ Juli 1913	225	63	112	149	83	59	79	40
„ Aug. 1913	233	141,2	145	214	80	53	86	34
„ Sept. 1913	234	136	78	126	68	68	109	40
„ Okt. 1913	168	140	99	174	76	61	50	40
„ Nov. 1913	170	229	84	138	91	78	85	32
im Dez. 1913	199	121,8	117	145	79	22	75	36
„ Jan. 1914	153	118	74	84	78	9	70	36
„ Febr. 1914	182	90	108	101	100	22	70	44
„ März 1914	210	92	73	94	92	31	86	40
„ April 1914	183	136	110	108	44	38	80	38
„ Mai 1914	219	130	126	132	21	28	50	—
Dez. 1912 bis Mai 1914	3646	2409,5	1858,6	2122	1276	938,2	1383	618
Durchschnittsverbrauch im Monat	202,6	133,8	103,3	117,9	70,9	52,1	76,8	36,4
Kosten bei 12 Pfg. für 1 kWh Mk.	24,31	16,05	12,40	14,15	8,51	5,25	9,22	4,36
Verbrauch für Person und Monat kWh	33,8	22,3	20,6	23,6	17,7	17,4	25,6	18,2
Für Person und Tag kWh	1,13	0,74	0,69	0,79	0,59	0,58	0,85	0,61

Erwärmung	Verbrauch Wh	Kosten in Pfennigen bei einem Preis der kWh von			
		8 Pf.	10 Pf.	12 Pf.	15 Pf.
1 l Wasser von 8 bis 100° zu erhitzen	115	0,92	1,15	1,38	1,73
6 Tassen Kaffee zu kochen	130	1,04	1,30	1,56	1,95
30 „ „ „ „	460	3,76	4,60	5,52	6,90
2,5 l Suppe zu kochen	480	3,84	4,80	5,76	7,20
1 großer Kopf Blumenkohl zu kochen	350	2,80	3,50	4,20	5,25
0,85 kg Fisch zu kochen	240	1,92	2,40	2,88	3,60
1,50 „ Rindfleisch zu kochen	320	2,56	3,20	3,84	4,80
1,50 „ Schweinebraten herst. nebst Sauce	900	7,20	9,—	10,80	13,50
1,75 „ Filet herstellen.	550	4,40	5,50	6,60	8,25
4 Koteletts zu braten	100	0,80	1,—	1,20	1,50
0,60 kg Kartoffeln zu rösten.	150	1,20	1,50	1,80	2,25
2,00 „ „ „ kochen	380	3,04	3,80	4,56	5,70
2 Omelettes zu backen.	140	1,12	1,40	1,68	2,10
6 Eier halbhart zu kochen	50	0,40	0,50	0,60	0,75
1 Stunde zu bügeln, ohne Unterbrechung	360	2,88	3,60	4,32	5,40
1 Brennschere zu erhitzen	7	0,06	0,07	0,08	0,10

aufnahme bis höchstens 600 W und können ohne weiteres an vorhandene Lichtleitungen angeschlossen werden. Erwünscht ist es aber auf alle Fälle, daß, wenigstens in neuen Häusern, auch el. Kraftleitungen in möglichst vielen Räumen vorgesehen werden, so daß auch größere Geräte, wie Kochtöpfe, Heizöfen, Herde u. dgl. angeschlossen und vor allen Dingen der Verbrauch der Heizgeräte zu dem ermäßigten Krafttarif berechnet werden kann. Bei starker Benutzung el. Heizgeräte empfiehlt es sich, einen besonderen Kraftanschluß herstellen zu lassen, dessen Kosten recht schnell durch die Ersparnisse in der Energieverrechnung aufgewogen werden.

Die el. Küche wird vielfach, besonders im Sommer, zur Ergänzung des Kohlenherdes verwendet ⁷⁾, namentlich in solchen Haushalten, die den Kohlenherd im Winter zur Raumheizung der Küche benötigen und kein Gas zur Verfügung haben. Solche el. Ergänzungsküche benötigt nur wenige Heizgeräte mit geringen Anschaffungskosten, und auch ihr Energieverbrauch mit etwa 0,5 kWh für Person und Tag gestattet ihre Benutzung selbst bei höheren Energiepreisen. Eine vollständige el. Küche, für die ein Energieverbrauch von etwa 0,8—1,2 kWh für Person und Tag in Frage kommt, bedingt Energiepreise von etwa 10 Pfg./kWh und kann dann auch mit Gasküchen wirtschaftlich konkurrieren ⁸⁾. Nach Schweizer Feststellungen ⁹⁾ beträgt der Energieverbrauch beim Kochen auf Heizplatten und Herden 1,1 kWh für Person und Tag bei Benutzung durch die Hausfrau, der bei Bedienung durch Dienstboten auf 1,4 kWh steigt und mit Bereitung des Spülwassers sich auf 1,8 kWh stellt. Die Tabelle auf S. 663 gibt den Energieverbrauch einer Anzahl verschiedenen großer Haushalte unterschiedlicher Lebenshaltung in dem Villenvorort einer norddeutschen Großstadt an ¹⁰⁾. Die zweite Tabelle zeigt den Energieverbrauch und die Betriebskosten bei verschiedenen kWh-Preisen für die Herstellung einer Anzahl Speisen.

Auf die Betriebskosten der el. Küche ist das Vorhandensein, bzw. die Herstellung von warmem Wasser von beträchtlichem Einfluß. In Großstadthäusern mit Dampfheizung ist meistens warmes Wasser dauernd vorhanden, während in kleineren Orten, namentlich im Anschluß an die Überlandzentralen, die Warmwasserbereitung zweckmäßig ebenfalls mittels el. Heizung, und zwar unter Aufspeicherung in der Nacht bezogener Energie erfolgt ¹¹⁾.

Für die Benutzung el. Herde ist Bedingung besonders niedriger Energiepreis, etwa von 4—6 Pfg./kWh, wenn die Betriebskosten nicht über die direkt heizteiler Kochapparate hinausgehen sollen. Sie hat aber dann immer noch den Nachteil längerer Kochzeiten, so daß sie unter allen Umständen zur schnellen Bereitung kleinerer Speisemengen durch direkt beheizte Kocher ergänzt werden muß. Während beim Kohlenherd die Konzentrierung der Koch- und Bratgelegenheiten üblich und erforderlich ist, werden sie bei größeren el. Küchen zweckmäßig dezentralisiert, d. h. die Anschlüsse für die Kochgeräte vom Wärmeschrank und Backofen getrennt.

El. Küchen werden auch im Großbetriebe angewendet und haben sich dort sehr gut bewährt. Der Energieverbrauch stellt sich ungefähr auf 0,4 kWh für die hergestellte Portion ¹²⁾ ¹³⁾.

Benutzer el. Koch- und Heizgeräte mögen diese auch auf der Reise nicht missen, und es sind besondere Reisegeräte geschaffen worden, die einen Anschluß an die unterschiedlichen, in den verschiedenen Benutzungsorten vorkommenden Leitungsspannungen gestatten. Nebenstehende Schaltskizze (Abb. 512) zeigt die Schaltung der Heizkörper und die Stöpselung der zweiadrigen Schnur auf den 3 Kontaktstiften bei den verschiedenen vorkommenden Spannungen.

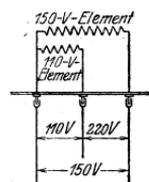


Abb. 512. Schaltung für verschiedene Gebrauchsspannungen.

(882) Elektrische Raumheizung. El. Heizöfen erfordern besonders billige Energie, wenn sie dauernd benutzt werden sollen. Das trifft zu in Gegenden mit

reichen Wasserkraften, die auch meist kohlenarm sind und die weit hertransportierten Kohlen teuer bezahlen müssen. Bei den üblichen Energiepreisen wird man die el. Heizung zur Ergänzung von Kohlen- oder Dampfheizung benutzen, namentlich in den Übergangszeiten. Dann werden sich die Kosten der kurzzeitigen Benutzung des el. Ofens niedriger stellen als die Inangahaltung der Dampfheizung. Ferner kommt die el. Heizung besonders in Frage in Räumen mit explosiblen Stoffen, in Untersuchungsräumen, wo gleichmäßige Temperaturhaltung erforderlich ist, in transportablen Räumen, wie Wagen der el. Straßenbahn, Aufzugskabinen, Unterseebooten u. dgl., ferner auch in exponiert gelegenen kleineren Räumen, wie Pförtnerhäuschen, Kommandobrücken, Krankkabinen, Maschinenräumen von Aufzügen, Schalträumen in Bergwerken usw., deren Anschluß an die Zentralheizung nicht nur hohe Installationskosten, sondern auch auf das Vielfache gesteigerte Betriebskosten verursacht. Oft beschränkt man die Heizung auf eine Fußwärmung, indem ein besonderer Fußwärmer aufgestellt oder in den Fußboden eingelassen wird. Der Energieaufwand für eine el. Raumheizung muß von Fall zu Fall nach den örtlichen Abkühlungsverhältnissen des Raums berechnet werden. Für Überschlagsrechnungen sei erwähnt, daß für die Übergangsheizung normaler Wohnräume mit günstigen Abkühlungsverhältnissen etwa 30 W/m^3 und für Dauerheizung etwa 60 W/m^3 erforderlich sind ^{14) 15)}.

(883) Elektrische Heizung in Gewerbe und Industrie. Je mehr der el. Antrieb der Maschine in der Industrie Fuß gefaßt hat, um so mehr ist ihm die el. Heizung, soweit sie für den Arbeitsvorgang der Maschine erforderlich ist, gefolgt, denn es ist unzweckmäßig, für den Antrieb el. Energie und für die Erwärmung Dampf-Gas, Spiritus oder andere Brennstoffe zuzuführen, dies um so mehr, da die el. Heizung nicht nur allen höheren Ansprüchen an die Gesundheitlichkeit und Feuersicherheit gerecht wird, sondern sich auch sehr fein und wirtschaftlich regeln läßt. So werden in der Papierindustrie sowohl die Präge- und Ziehpressen, wie die Anleim- und Trockenmaschinen und die Druckpressen el. erwärmt. Lack- und Paraffinschmelzkessel, Heizplatten und Trockenschränke für lackierte Waren werden el. beheizt. In der Schuh- und Lederindustrie sind Narbenpressen, Walkbacken, Klebepressen, Glätt- und Polierwerkzeuge mit el. Heizung versehen. Die Wäscheindustrie benutzt el. Bügeleisen, Bügelmaschinen, Pliissiermaschinen usw. In der Holzindustrie verbessern el. Leimwärmer, Anwärmpplatten, Trockenräume die Feuersicherheit, wie in der Zelluloidindustrie die Stanz- und Prägwerkzeuge, Dubliermaschinen, Wasserbäder durch elektrische Heizung erst volle Betriebssicherheit erlangen. In Druckereien werden die Schmelzkessel der Setzmaschinen, die Stereotypiepressen, Zylinder der Tiefdruckmaschinen el. geheizt. El. LötKolben und Siegelackwärmer sind notwendige Werkzeuge geworden. In Laboratorien ergänzen bzw. verdrängen el. Heizgeräte die Gasheizung. Auch viele andere Industrien wenden in steigendem Maße die el. Heizung an. So werden fast allgemein in den Arbeiterkantinen el. geheizte Wasserkessel und Wärmeschränke zur Warmhaltung der von den Arbeitern mitgebrachten Speisen benutzt. Vielfach verwendet man auch in der Nacht oder zu sonstigen Zeiten überschüssige Energie zur Herstellung und Aufspeicherung von warmem Wasser, für Destillierapparate, zur Dampfbereitung usw. ^{16) 17)}.

Durch die Ausnutzung auch der kleinsten Wasserkraft, durch die Vermeidung von Wärmeverlusten und ihre günstigste Anpassung an den Erwärmungszweck ist die el. Heizung berufen, wirksam an der notwendigen Verbesserung der Wärme-wirtschaft mitzuhelfen.

Literatur: 1. Bölling, Silundum, ein neues Erzeugnis des el. Ofens. Chemikerzeitung 1908, Nr. 91. — 2. Perlewitz, Silit, ein neues el. Widerstandsmaterial. ETZ 1913, Nr. 10. — 3. Biermann, Der Tauchsieder, ein Apparat für Heißwasserbereitung. ETZ 1918, Nr. 13. — 4. Zeulmann, Die Leistungsregelung von Elektroden-dampfkesseln. ETZ 1922 Nr. 22. — 5. Schulz, Winke für die Installation el. Koch- und Heizapparate. Helios 1918, Nr. 28, 29. — 6. Schulz, El. Heizung in Wäschefabriken und Waschanstalten. Helios 1912, Nr. 27. — 7. Schulz, El. Kochapparate als Ergänzung des Kohlenherdes. El. Anz. 1912, Nr. 41. — 8. Ritter, Das elektr. Heizen und Kochen.

El. Anz. 1907, Nr. 60, 65 und 67. — 9 Bulletin des Schweiz. Elektrot. Vereins 1917, Nr. 7. 10. Schulz, Die el. Küche. El. Anz. 1914, Nr. 73—78. — 11. Rittershausen, Die Verwendung von Wärmespeichern. ETZ 1912, Nr. 34. — 12. Schulz, Die el. Küche im Großbetrieb. Helios 1913, Nr. 30 und 31. — 13. Perlewitz, Das el. Kochen im Großbetrieb. ETZ 1914, Nr. 42 und 43. — 14. Schulz, El. Raumheizung. El. Anz. 1916, Nr. 79 und 80. — 15. Frank, El. Raumheizung im photographischen Institut der Techn. Hochschule Dresden. Gesundheitsingenieur, Bd. 33, Nr. 32—34. — 16. Schulz, El. Heizung im Maschinenbau. Ztschr. V. D. Ing. 1913, S. 1092. — Spezialanwendung el. Heizung für Apparate und Maschinen. Helios 1914, Nr. 7 und 8. — 17. Rutgers, El. Wärmeerzeugung für industrielle Anlagen. ETZ 1918, Nr. 26.

Elektrisches Schweißen.

(884) Arten der elektrischen Schweißung. Die elektrische Energie wird zum Erhitzen der Metalle entweder mittels Widerstandes oder mittels Lichtbogens in Wärme umgewandelt. Der elektrische Strom wird praktisch verlustlos bis an die eigentliche Schweißstelle geleitet und hier örtlich in Wärme umgesetzt. Im Gegensatz zu allen nicht elektrischen Methoden entwickelt sich die Wärme von innen nach außen. — Die elektrische Lichtbogenschweißung ist zu unterteilen in die Verfahren von Bernardos, von Slawianoff und von Zener. — Die elektrische Widerstandsschweißung ist zu unterteilen in elektrische Stumpfpunkt- und Nahtschweißverfahren.

(885) Verfahren von Bernardos. Das Schweißstück wird mit dem positiven Pol einer Gleichstromquelle verbunden, den Gegenpol bildet ein Kohlenstab, der in einem Handgriff festgespannt ist. Der Lichtbogen wird zwischen Kohlenstab und Schweißstück gezogen, die Schweißstelle erweicht und Zusatzmaterial wird zwischen Lichtbogen eingeschmolzen. Das Bernardosche Verfahren findet Anwendung beim Verschweißen von dünneren Blechen, wie Fasern, kleinen Tanks und bei der elektrischen Schienenschweißung. Die Lichtbogenspannung schwankt zwischen 45 und 65 V, die Stromstärken zwischen 100 und 600 A. — Die Methode wird auch zum elektrischen Schneiden benutzt, indem man die Metallteile durch den Lichtbogen an der zu trennenden Stelle abschmilzt. Der Schnitt wird nicht ganz glatt. Das elektrische Schneiden hat daher Bedeutung bei Abbruch- und Einschnelzarbeiten. Besonderen Vorteil bringt es beim Schneiden von Gußteilen, die bekanntlich autogen nicht geschnitten werden können. Die Lichtbogenspannung beträgt 65 Volt, die Schneidestromstärke liegt zwischen 600 und 1500 A.

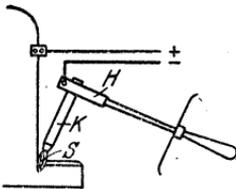


Abb. 513. Schweißverfahren von Bernardos.

(886) Verfahren von Slawianoff. Das Verfahren von Slawianoff unterscheidet sich von dem vorhergehenden dadurch, daß man anstelle der Kohlen-Elektrode eine Metall-Elektrode benutzt. Der Lichtbogen wird also zwischen Schweißgut und Metall-Elektrode gezogen. Die Metall-Elektrode schmilzt ab und fließt in die Schweißstelle ein (siehe Prakt. Maschinen-Konstrukteur 1919, S. 291). Das Verfahren eignet sich zur Ausführung fast aller vorkommenden Schweißarbeiten. Genaue Angaben über Vorbereitung der Schweißstücke, Schweißspannung und Schweißstromstärke für die einzelnen Fälle gibt das folgende Betriebsblatt Nr. 1 bei Stumpfschweißungen von Blechen und das Betriebsblatt Nr. 2 bei Überlapptschweißungen von Blechen. Die Metall-Elektrode kommt im blanken Zustand oder als sogenannte Mantel-Elektrode zur Anwendung. Ummantelte Elektroden erleichtern das Halten des Lichtbogens und gestatten auch Schweißungen „über Kopf“ auszuführen, was bei Dampfkessel-Reparaturen und dergleichen von besonderer Wichtigkeit ist. Bei Gußschweißungen unterscheidet man entsprechend der Vorbereitung Kalt-, Halbwarm- und Warmschweißungen. Gußstücke, die von Natur aus nicht zu Spannungen neigen und nicht dicht sein müssen, können im

kalten Zustand verschweißt werden. Es gelten hierfür Werte für Schweißspannung und Stromstärke wie für die Blechschweißung. Als Schweißmaterial kommt ebenfalls ein Schweißdraht zur Anwendung. Gußstücke, bei denen größere abgebrochene Teile neu anzuschmelzen sind, bearbeitet man nach dem Halbwarm-schweißverfahren. Für das anzuschweißende Stück, beispielsweise ein abgebrochener Motorfuß, wird eine entsprechende Form aus Koksplatten, Lehm und Gießereisand vorbereitet. Dieser hohle Raum wird durch Einschmelzen von siliziumreichen Gußeisenstäbchen, in den Stärken von 8—15 mm Durchmesser ausgefüllt. Gußstücke, die von Natur aus zu Spannungen neigen, müssen vor dem Schweißen auf Hellrotglut vorgewärmt werden. Die Schweißung wird, wie bei der Halbwarmschweißung, mit siliziumreichen Gußeisenstäbchen und Stromstärken von 400—1000 A bei Spannungen von 45—65 V ausgeführt (siehe Glasers Annalen 1917, Nr. 972 und General El. Rev. Bd. 21, Nr. 12, 1918).

(887) Verfahren von Zerener. (Abb. 514). Die Pole einer Gleichstromquelle werden an zwei schräg zueinander gestellte Kohlenelektroden angeschlossen, in deren Mitte ein Blasmagnet eingebaut ist. Dieser bewirkt, daß der gezogene Lichtbogen stichflammenartig gerichtet wird. Der Lichtbogen bildet sich hier also zwischen Kohle und Kohle und erhitzt das darunter gebrachte Schweißstück nebst Zusatzmaterial auf Schweißhitze. Das Zerenersche Verfahren hat als eigentliches Schweißverfahren heute nur noch geringe Bedeutung. Dagegen verwendet man die Zerenersche Lampe noch hier und da zum Hartlöten (vgl. Prakt. Maschinen-Konstrukteur 1919, S. 291).

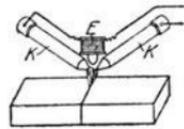


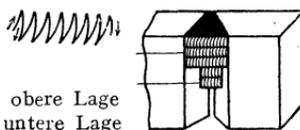
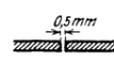
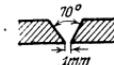
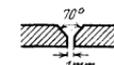
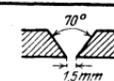
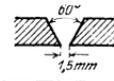
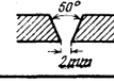
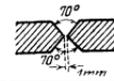
Abb. 514. Schweißverfahren von Zerener.

Für alle Lichtbogenschweißverfahren wird in erster Linie Gleichstrom verwendet. Benutzt man gewöhnliche Nebenschlußmaschinen oder den Strom direkt aus einem Gleichstromnetz, so ist es erforderlich, die Maschinen durch Widerstände gegen die oft auftretenden Kurzschlüsse zu schützen. Die Netzspannung bzw. Generatorspannung muß auf die Schweißspannung von 65 bis 70 V herabgesetzt werden. Mit der Vernichtung der Netz- bzw. Maschinenspannung geht die Energieverrichtung Hand in Hand und verteuert das Verfahren. Für alle Lichtbogenschweißverfahren empfiehlt es sich daher, Spezialmaschinen zu verwenden, die auf konstanten Strom arbeiten (siehe Querfeldmaschine ETZ 1906, S. 1035, 1061 und Gleichstrommaschinen in Krämerschaltung ETZ 1909, S. 798). Bei Verwendung solcher Maschinen wird die gesamt erzeugte Energie ausgenutzt. Die Maschinen können ohne jede Gefahr dauernd Kurzschluß vertragen.

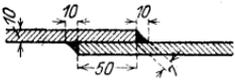
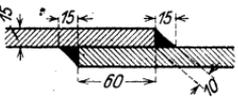
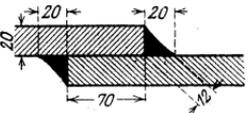
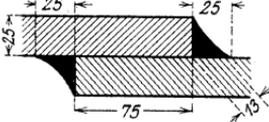
In neuerer Zeit wurde auch Wechselstrom für die Lichtbogenschweißung herangezogen. Es ist gelungen, mittels Spezialtransformatoren mit großer Streuung den Metalllichtbogen einwandfrei zu ziehen und zu halten. Diese Transformatoren besitzen einen Wirkungsgrad von 94 % und stellen sich im Gewicht und den Anschaffungskosten wesentlich günstiger wie Gleichstromumformer.

(888) Widerstandsschweißung. Zur Umwandlung der elektrischen Energie in Wärme wird der innere Widerstand und der Übergangswiderstand des Schweißstückes selbst benutzt. Die Schweißspannungen schwanken zwischen 0,5 und 10 V, je nach Größe und Art des Schweißstückes. Die Stromstärken bewegen sich in außergewöhnlich hohen Werten und gehen oft in die Größenordnung bis 100 000 A und darüber. Zur Verwendung gelangt fast ausschließlich Wechselstrom, da der Transformator das einfachste Hilfsmittel ist, die übliche Netzspannung auf die für Schweißzwecke verlangte, niedrige Spannung und hohe Stromstärke umzuwandeln (siehe ETZ 1915, Heft 43/44, Prakt. Maschinen-Konstrukteur 1919). Die elektrische Widerstandsschweißung hat vor allen Dingen Bedeutung bei der ausgesprochenen Massenfabrikation.

Die Stumpfschweißung umfaßt alle Schweißarbeiten, die eine Stoßverbindung verlangen, wie dies bei der Verbindung von Rundeisen, Profilen,

Für technische Beamte und Arbeiter	Lichtbogenschweißung Eisenblechschweißung	Betriebsblatt		
Blatt 1				
<ol style="list-style-type: none"> 1. Minuspol an Schweißdraht, Pluspol an Schweißgut. 2. Möglichst mit linker Hand schweißen, rechte für Zulangen frei halten (Drahtbürste, Hammer). 3. Lichtbogen ziehen durch kurzes Berühren des Werkstückes mit dem Schweißdraht. 4. Lichtbogen so kurz wie möglich halten. 5. Schweißdraht zickzackartig bewegen. 6. Stärkere Stücke durch Aufeinanderlegen verschiedener Schweißlagen schweißen. 				
7.		 <p style="text-align: center;">obere Lage untere Lage</p>		
Blechstärke mm	Vorbereitung der Schweißnaht	Schweißstromstärke Amp.	Schweißspannung Volt	Schweißdraht Φ mm * mm *
1,5		50	12	1
2		60	16	2
3		100	18	2
4—6		120	18	3
6—8		130	20	3
8—10		150	20	4
10—15		180	20	4
15—20		200	22	5
über 20		für die *Vorbereitungen gelten für jede Seite analog die obigen Zahlen für die vorbereiteten V-Schweißnähte.		

* Für geaute u. geixte (V u. X) Bleche wird für die untere Lage die Verwendung des nächst kleineren Schweißdrahtdurchmessers empfohlen.

Für technische Beamte und Arbeiter	Lichtbogenschweißung Eisenblechschweißung Blatt 2	Betriebsblatt		
8.				
Blechstärke mm	Vorbereitung der Überlappung	Schweißstromstärke Amp.	Schweißspannung Volt	Schweißdraht ϕ mm
10+10		150	20	4
15+15		180	20	4,5
20+20		180	20	5
25+25		200	22	6
<p>9. Für jede Schweißstelle möglichst eine Stromquelle vorsehen. 10. Für „Über-Kopf“ und Vertikalschweißen präparierte Schweißstäbe verwenden.</p>				

Ringen, Schnallen, Kettengliedern usw. vorkommt. Die stumpf zu verschweißenden Stücke sollen an der Schweißstelle gleichen Querschnitt besitzen. Das Schema der elektrischen Stumpfschweißung zeigt die Abb. 515. Die zu schweißenden Stücke werden festgespannt und der Strom mittels Fußhebels eingeschaltet. Die hohen Schweißströme erhitzen die zu verbindenden Metalle zwischen den Einspannelektroden. Im Moment, wo die Schweißwärme erzeugt ist, erfolgt eine Stauchung. Die Schweißung ist nunmehr beendet. Die entstehende Stauchwulst kann in derselben Hitze, mit der das Stück geschweißt wurde, wieder weg-

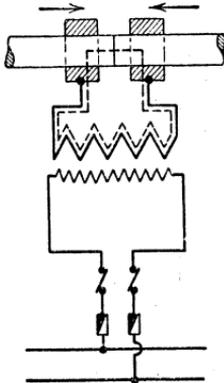


Abb. 515. Elektrisches Stumpfschweißen.

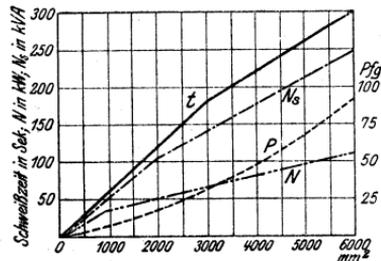


Abb. 516. Zeit- und Stromverbrauch beim Schweißen von Eisen verschiedener Querschnitte.

gehämmert werden. Da bei der Schweißung kein Fremdmaterial in die Schweißstelle gelangen kann, bleibt das Material außerordentlich rein. Die Schweißung ist in metallurgischer Hinsicht ideal zu nennen. Mittels der Stumpfschweißung lassen sich Eisen, Temperguß, Stahl, Kupfer, Aluminium, Eisen mit Temperguß, Stahl mit Temperguß, Stahl mit Kupfer und Stahlguß mit Eisen verschweißen. Hochwertige Stähle bzw. komplizierte Querschnitte schweißt man nach dem sogenannten Abbrenn- bzw. Abschmelzverfahren (siehe ETZ 1919, Heft 40). Das Abschmelzverfahren unterscheidet sich vom gewöhnlichen Widerstandsschweißverfahren dadurch, daß die Schweißstücke nicht sofort in Kontakt gebracht werden. Der Strom wird vielmehr zunächst eingeschaltet. Die Schweißstücke werden sodann vorsichtig genähert, bis der Strom in Form von Funkensprühen überspringt, wodurch die Stoßstelle auf Schweißhitze gebracht wird. Nach Eintritt der Hitze werden die Stücke schlagartig zusammengestaucht. Der auftretende, perlige Schweißgrat muß im noch warmen Zustand abgemeißelt werden. Ein Einhämmern in die Schweißstelle ist unzulässig. Schneidwerkzeuge aller Art werden nach diesem Verfahren derart hergestellt, daß nur die eigentlichen Schneidflächen aus hochwertigem Material gewählt werden. Für die weniger beanspruchten Teile verwendet man billigeres Material. Besondere Bedeutung hat das Verfahren beim Verschweißen von Rohren (Rauch- und Siederohren u. dgl.). Einen Überblick über Energie- und Zeitverbrauch beim Verschweißen von verschiedenen Querschnitten gibt die Abb. 516. Gleichgroße Kupfer- bzw. Messingquerschnitte benötigen ungefähr dreimal soviel Energie wie die entsprechenden Eisenquerschnitte. Geschlossene Stücke, wie Ringe, Schnallen, Kettenglieder usw. erfordern mehr Energie wie nicht in sich geschlossene Teile, da ein Teil des Stromes im Nebenschluß verloren geht.

Die Punktschweißung (Abb. 517) hat Bedeutung bei der Verbindung von Blech- und Eisenkonstruktionen als Ersatz für das frühere Nieten. Punktweise lassen sich Eisen, Messing und Zinkbleche verschweißen. Infolge der hohen Regulierfähigkeit des Schweißstromes lassen sich selbst die dünnsten Bleche ohne

Schwierigkeiten behandeln. Die obere Grenze der praktischen Schweißmöglichkeit liegt bei ungefähr 25 mm Eisenblechstärke. Punktschweißverbindungen haben gegenüber Nietverbindungen den Vorzug der höheren Festigkeit, da eine Materialschwächung durch das Lochen, wie es beim Nieten erforderlich ist, wegfällt. Einen Anhaltspunkt über Schweißzeit und Energieverbrauch gibt die Abb. 518. Das Verschweißen von Stücken, bei denen größere Eisenmassen zwischen die Schweißelektrodenarme gelangen (Blechzylinder), erfordert mehr Energie als solche mit kleineren Eisenmassen. Die Anwendung der elektrischen Punktschweißung ist durch die Ausladung der Elektrodenarme beschränkt (maximale Ausladung etwa 1 m).

Bei der Nahtschweißung (Abb. 519) werden die zu verbindenden Bleche zwischen zwei unter Druck stehenden, stromführenden Kupferrollen hindurch-

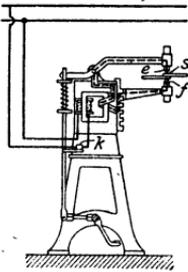


Abb. 517. Elektrische Punktschweißung.

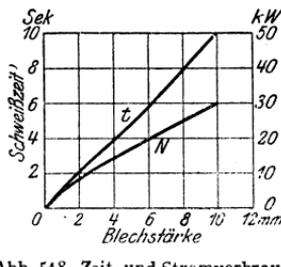


Abb. 518. Zeit- und Stromverbrauch beim Schweißen von Eisenblech.

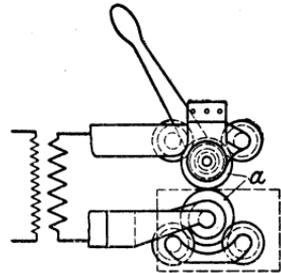


Abb. 519. Elektrische Nahtschweißung.

gezogen. Nach diesem Verfahren können Eisenbleche bis 2 mm Stärke, Messing und Zinkbleche bis 1,5 mm verschweißt werden. Die Schweißgeschwindigkeit schwankt je nach Blechstärke zwischen 2 bis 50 mm in der Sekunde. Die Festigkeit naht- und punktgeschweißter Bleche beträgt bis 100 % des Materials. Geschweißte Zylinder können nachträglich geformt, gedrückt und gepreßt werden. Elektrische Nahtschweißung erzielt man auch durch dichtes Aneinanderreihen von Schweißpunkten.

(889) Das Verfahren von Lagrange und Hoho beruht auf elektrolytischer Wirkung. Das zu schweißende Stück bildet die eine Elektrode. Die Gegenelektrode stellt eine Bleiplatte dar, welche in einen Bottich mit angesäuertem Wasser eintaucht. Die Schweißung erfolgt unter Wasser. Beim Stromdurchgang von 110 V erfolgt eine Wasserstoffentwicklung im Umkreis des Schweißstückes. Der Wasserstoff setzt dem Durchgang des Stromes einen hohen Widerstand entgegen. Um das Schweißstück entwickelt sich eine außerordentliche Hitze, welche die zu schweißenden Enden auf Schweißhitze bringt. Die Vereinigung der erhitzten Schweißenden erfolgt außerhalb des Wasserbades durch Hammer und Amboß. Die Spannung und Stromstärke der Stromquelle richten sich nach der Größe der eingetauchten Oberfläche des zu erhitzenden Schweißgutes. Die Spannung beträgt bei 5 cm Oberfläche etwa 110 V; auf 1 cm² der eingetauchten Oberfläche können etwa 5 A gerechnet werden. Das Verfahren findet heute nur noch selten Anwendung.

(890) Elektrische Nietwärmer und Elektro-Schmiedeesse. Die zu erhaltenden Niete bzw. Schmiedestücke werden als Widerstände in den sekundären Stromkreis eines Niederspannungstransformators eingesetzt. Spannung und Stromverhältnisse sind dieselben wie bei elektrischen Widerstandsschweißmaschinen. Elektrische Nietwärmer werden zum Anschluß an Einphasenstrom und zum direkten Anschluß an Drehstrom benutzt. Sie erhalten meistens mehrere Wärmestellen. Beim Drehstrom-Nietwärmer ist es möglich, jede Wärmestelle für sich zu regulieren. Für transportable Zwecke (Montage auf Schiffswerften u. dgl.)

werden elektrische Nietenwärmer mit Luftkühlung gebaut. Das Erwärmen von 1 kg Nieten erfordert im Durchschnitt 0,4 kWh.

Elektrische Schmiedeessen werden zum direkten Anschluß an Drehstrom ausgeführt. Die zu erheizenden Stücke werden zwischen drei Elektroden gefaßt. Durch die Dreipunkteinspannung können auch komplizierte Stücke ohne Umständlichkeit behandelt werden.

(891) Transformator-Muffelöfen (Abb. 520). Transformator-Muffelöfen arbeiten mit Spannungen von 1,5 bis 15 V. Als Widerstand wird ein Spezialmaterial gewählt, das eine Temperatur von 1000° dauernd verträgt, ohne zu oxydieren. Infolge der geringen Spannung erhalten die Heizelemente großen

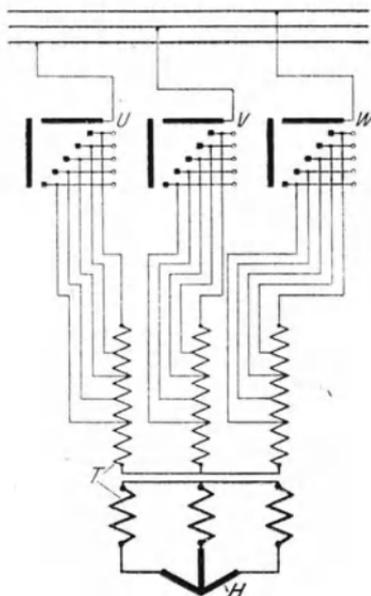


Abb. 520. Transformator-Muffelöfen.

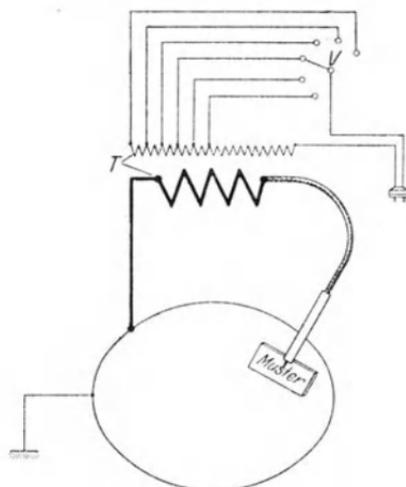


Abb. 521. Signierapparat.

Querschnitt, so daß sie unempfindlich sind. Transformator-Muffelöfen finden Verwendung zum Härten von Kohlenstoffstählen, Vor- und Nachwärmen von Werkzeugen und Schmiedeteilen, zum Heizen von Lötkolben, Zinkbädern, sowie zum Erwärmen von Gläsern.

(892) Signierapparate. Ein Einphasentransformator reduziert die vorhandene Netzspannung auf etwa 1 V. Der eine sekundäre Pol ist als Grundplatte ausgebildet, auf welche das zu signierende Stück zu liegen kommt. Den Gegenpol bildet der Schreibgriffel mit Signierstift (Abb. 521). Der Verbrauch beträgt etwa 0,5 kW. Elektrisch beschrifteten lassen sich gehärtete und ungehärtete Werkzeuge, Stücke aus Kupfer, Messing und Aluminium. Zwecks Diebstahles von Stahlwerkzeugen entfernte Schriftzeichen können durch Ätzen, mit einer 4%igen Quecksilberchloridlösung erkennbar gemacht werden.

Zehnter Abschnitt.

Die Elektrizität auf Schiffen.

(893) Stromsystem und Umfang. Da auf Schiffen eine andere als die elektrische Beleuchtung kaum in Frage kommt, sind fast alle Schiffe wenigstens mit einer Dynamomaschine ausgerüstet. Die allgemein übliche Stromart ist Gleichstrom; Drehstrom ist nur vereinzelt, besonders auf Tankschiffen, verwendet worden wegen der Explosionsicherheit und Einfachheit der Motoren mit Kurzschlußläufer (H i b b a r d, El. Review, 4. 1. 1918).

Die Spannung beträgt meist 110 bis 120 V, auf Schiffen mit überwiegendem Verbrauch für Kraft 220 oder 240 V, wobei das Lichtnetz bei besonders sorgfältiger Installation ebenfalls mit dieser Spannung betrieben werden kann; andernfalls wird die niedrige Lichtspannung durch Umformer oder Mittelleiter und Spannungsteiler hergestellt. Kommandoapparate, Kreiselkompaß, Funktelegraphie und Unterwasserschallsignalanlage erfordern Umformer für besondere Stromarten.

Über den Umfang der elektrischen Anlagen einiger größerer Schiffe sind die Hauptdaten in nachstehender Tabelle zusammengestellt:

Name des Schiffes	Primärmaschinen			Anschlußwert der Verbraucher kW				
	Anzahl	Leistung f. Masch. kW	Gesamt- leistung kW	Be- leuch- tung	Schein- werfer	Heiz- u. Koch- appar.	Motoren	Befehls- über- mittlung
Fahrgastdampfer „Columbus“ 32500 Br.-Reg.-T. (1923)	5 1	140 90	790	250	—	560	800	ca. 3
Fahrgast- Motorschiff „Monte Sarmiento“ 13500 Br.-Reg.-T. (1924)	5 2	450 12,5	2250	70	—	1950	1900	1,5
Motorfrachtschiff „Vogtland“ 7000 Br.-Reg.-T. (1924)	4 1	120 12,5	500	40	2,5	120	1050	—
Linienschiff „Baden“ (1916)	4 2 4	400 300 75	2500	200	120	—	3000	140

(894) Stromerzeuger sind gegen Tropf- und Schwitzwasser zu schützen und für deutsche Handelsschiffe nach den Vorschriften des VDE auszuführen, wobei für Schiffe der Tropenfahrt mit 45° Raumtemperatur zu rechnen ist.

Für D a m p f d y n a m o s hat der Handelsschiffs-Normalien-Ausschuß folgende Leistungsreihe festgesetzt:

2,5; 5 kW bei 500 U/min.	20, 25 kW bei 350 U/min.
7,5; 10 „ „ 450 „	30, 40, 50 „ „ 325 „
12,5; 15 „ „ 400 „	75, 100 „ „ 300 „

Bei 45° Raumtemperatur verringern sich die Leistungen um 14 %, während sich die Drehzahlen um 6 % erhöhen.

T u r b o d y n a m o s ermöglichen 40 bis 50 % Raum- und Gewichtersparnis gegenüber Kolbendampfmaschinen und werden auf Turbinenschiffen mit Rücksicht auf die Reinhaltung des Kondensates von Öl fast ausschließlich verwendet. Die Drehzahlen betragen je nach Größe 2000 bis 6000 U/min. In Amerika verwendet man Turbinen mit Rädervorgelege und normalen Dynamo-
maschinen.

Ö l d y n a m o s werden hauptsächlich auf Motorschiffen, aber auch auf Dampfern als Notmaschinen oder für Hafenbetrieb verwendet. Kleinere Motoren erhalten Glühkopfzündung, größere von etwa 60 kW an werden als Dieselmotoren ausgeführt. Zur Abgabe der Spitzenleistung, z. B. für den Betrieb der Ladewinden, wird die Drehzahl bisweilen um etwa 50 % erhöht, während die Spannung durch Nebenschlußregelung konstant gehalten wird.

(895) Verteilungssystem. Auf Kriegsschiffen wird die Zentrale in 2 bis 4 voneinander unabhängige Stationen unter Panzerdeck unterteilt, die sich gegenseitig unterstützen. Jeder Stromkreis wird an 2 Stationen angeschlossen. Parallelschaltung der Maschinen wird vermieden.

Auf Handelsschiffen arbeiten die Generatoren entweder in P a r a l l e l s c h a l t u n g, unter Umständen auf getrennte Sammelschienen für die Lichtstromkreise und die Kraftstromkreise (Abb. 522), oder in E i n z e l w a h l s c h a l t u n g derartig, daß jeder Stromkreis mittels eines mehrfachen Umschalters auf jeden einzelnen Generator wahlweise geschaltet werden kann. An die Reservestation, die auf Fahrgastschiffen über der Wasserlinie vorgesehen werden muß, ist die N o t - oder P o l i z e i b e l e u c h t u n g angeschlossen, die ein unabhängiges Notbeleuchtungsnetz mit einer genügenden Anzahl von Stromkreisen umfaßt, durch welche in den Wohnräumen und Mannschaftsräumen, in allen Gängen, an den Niedergängen und Luken sowie auf der Kommandobrücke und in den Maschinen- und Kesselräumen so viel Lampen im Betrieb erhalten werden, wie für den Dienst und die Benutzung dieser Räume gerade hinreichen. Auch die Positionslichter und die Station für Funkentelegraphie sind an das Notbeleuchtungsnetz anzuschließen. (Meyer, Werft und Reederei, 22. 9. 1920, S. 383).

(896) Die Leitungsanlage wird entweder als Doppelleitersystem mit besonderer Hin- und Rückleitung oder, bis 110 V, als Einleitersystem mit dem Schiffskörper als Rückleitung ausgeführt. Letzteres ist für deutsche Handelsschiffe die Regel. Innerhalb der Kompaßzone von 5 m Radius und auf Tankschiffen ist doppelpolige Verlegung vorgeschrieben.

Es sind mindestens folgende getrennte Stromkreise zu verlegen: Dauerbeleuchtung, bei Tage abschaltbare Beleuchtung, Notbeleuchtung, Kraft und Heizung. Bis 12 Lampen werden von einer Zweigleitung gespeist; diese zweigen von den Hauptleitungen auf den in verschließbaren Kästen untergebrachten Verteilungsschalttafeln ab. Alle Hauptleitungen sowie Zweigleitungen in Mannschafts-, Maschinen- und Kesselräumen, Bunkern, Lade-, Kühl- und Waschräumen, Küchen, Bädern, Klosetts und anderen feuchten Räumen, für Außenlampen und für Motoren sind als eisenbandarmierte Bleikabel, alle übrigen Zweigleitungen als Gummileitungen in Holzleisten zu verlegen.

Decksdurchführungsrohre und Schottstopfbuchsen dienen zur wasserdichten Durchführung der Kabel (Kennedy, Electrician 11. 4. 1919).

Das Installationsmaterial der deutschen Handelsmarine, insbesondere Schalter, Stecker, Abzweigdosen, Sicherungen, ist genormt. Sicherungen bis 200 A werden als Patronensicherungen nach dem Diazsystem (703), über 200 A als Streifen-

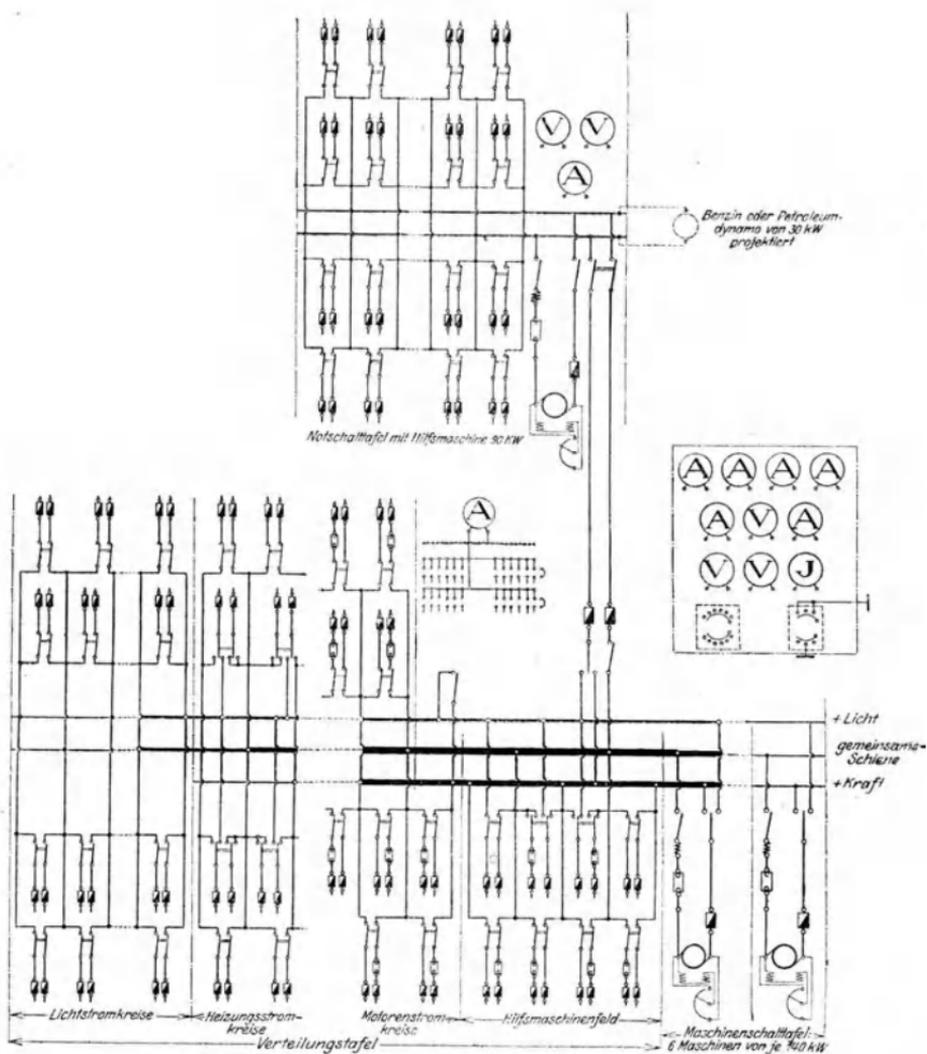


Abb. 522. Schaltanlage des Fahrgastdampfers „Homerie“ (Columbus).

sicherungen ausgeführt. Nebenschaltstellen (Abb. 523) werden aus normalen Dreh-
schaltern und Patronensicherungen auf Eisengerüst aufgebaut.

(897) Beleuchtung. Für deutsche Handelsschiffe erhalten Glühlampen bis
50 HK, Swanfassung, lichtstarke Glühlampen Goliathfassung. Die Beleuchtungs-

körper, insbesondere Zwischendecklampen (Abb. 524), Maschinen- und Heizraumlampen, flache Decklampen, Laderaumlampen, Sonnenbrenner, Handlampen, Steh- und Wandlampen sind genormt.

Mit den Positionslaternen zu 32 HK werden Kontrollampen auf einer Schalttafel im Steuerhaus in Reihe geschaltet.

Für allgemeine Raumbelichtung ist auf 1 m² Bodenfläche mit folgenden Lichtstärken in HK zu rechnen: Bunker 1, Laderäume, Tunnel 1,5, Bootsdeck 2, Promenadendeck, Gänge, Heizraum 2, Mannschaftsräume 2,5, Offizierskammern 2,5, Fahrgastkammern 4, Zwischendeck 2, Maschinenraum 3, Waschräume 3, Wirtschaftsräume, Hospital, Turnhalle, Klosetts 4, Salons II. Kl. 10, Luxuskammern 10, Salons und Vorplatz I. Kl. 15 (Müller, Schiffbau 8. 10. 1919).

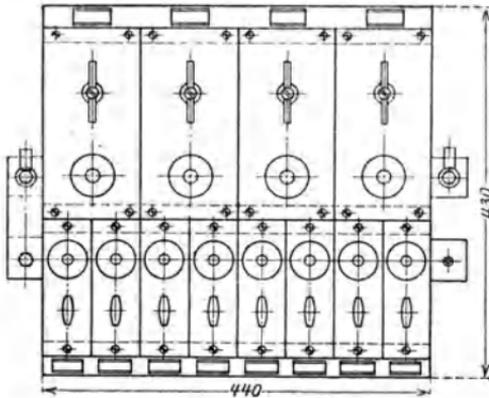


Abb. 523. Nebenschaltstelle nach Handelsschiffsnormen.

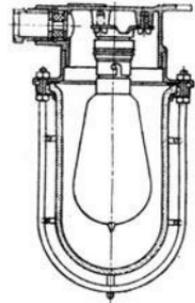


Abb. 524.

Zwischendecklampe.

(898) **Scheinwerfer**, hauptsächlich auf Kriegsschiffen verwendet, bestehen aus horizontalen Bogenlampen für 20 bis 200 A, deren Lichtbogen im Brennpunkte eines Parabolspiegels von 35 bis 200 cm Durchmesser erzeugt wird. Um sofort Licht geben zu können, läßt man die Lampe hinter der lichtdicht schließenden Blende brennen oder rüstet sie mit der von den Siemens-Schuckertwerken geschaffenen Schnellzündung aus. Zum Signalisieren dient ein Jalousieverschluß, zum Ausbreiten des Strahles der Streuer aus zylindrisch geschliffenen Glasstreifen. Zum Schwenken und Neigen dient Hand- oder elektromotorischer Fernantrieb (Krell, ETZ 1915, Heft 32—38).

Handelsschiffe verwenden im Suezkanal einen 50-cm-Scheinwerfer mit 15° Streuung und 5° dunklem Mittelfeld, damit begegnende Schiffe nicht geblendet werden.

Um Scheinwerfer größerer Stromstärke aus einem 220-V-Netz zu speisen, benutzt man Umformer mit abfallender Charakteristik (Krell und Stauch, Deutscher Schiffbau 1913). Durch wesentliche Erhöhung der Stromdichte in den Elektroden und Erzeugung hoch leuchtender Dämpfe im Krater der Anode gelang es Beck, eine Scheinwerferlampe höherer Lichtstärke bei kleinerem Kraterdurchmesser zu schaffen, durch welche die Intensität des Strahles um ein Mehrfaches gesteigert wurde (ETZ 8. 9. 1921).

(899) **Elektrische Heizung** wird auf großen Fahrgastdampfern vielfach verwendet. „George Washington“ besitzt 160 Öfen von 5 bis 25 A (Thilo, ETZ 1910, S. 5) „Columbus“ 249 Öfen von 7,5 bis 20 A, auf „Vaterland“ wird in den

Kabinen I. Kl. selbsttätig geregelte elektrische Zusatzheizung verwendet; in Konditorei und Bäckerei werden die Backöfen, in den Küchen einzelne Kocher elektrisch beheizt (Stauch, ETZ 2. 10. 1919; Manger, Am. Inst. El. Eng. 19. 5. 1914).

(900) Elektrische Hilfsmaschinen. Ankerwinden müssen Anker mit 100 m Kette mit etwa 12 m/min Geschwindigkeit heben können. Sie werden ebenso wie Verholwinden und Spills angetrieben durch umsteuerbare Verbundmotoren mit meist unter Deck aufgestellter Steuerwalze oder Schützen-schaltwerk und Überstromausschalter.

Bootswinden und Krane zum Heben der schweren Beiboote mit etwa 20 m/min Geschwindigkeit erfordern Verbundmotoren mit Haltebremse, die mit Schützensteuerung oder in Leonard-schaltung betrieben werden. Die Bootswinden auf den Handelsschiffen erhalten meist durchlaufende Motoren mit Spillköpfen oder mechanischen Kupplungen.

Steuerrudermaschinen. Die nur kurzzeitig abzugebende größte Motorleistung errechnet sich aus größtem Rudermoment (s. Hütte, Schiffselemente) und der dabei auftretenden Geschwindigkeit, die bei Motoren mit Hauptstromcharakteristik etwa 25 % geringer ist als die mittlere, welche sich aus der Bedingung ergibt, daß das Ruder in 30 s von Hart zu Hart gelegt werden soll. Bei Torpedoboote und Flußschiffen muß das Ruder rascher, in etwa 17,5 s, gelegt werden können. Größter Ruderwinkel 35° bis 42°. Beim Stützen muß der Motor das Doppelte des errechneten Drehmomentes abgeben können (Schwarz, Jahrb. Schiffbautechn. Ges. 1910, S. 694). Bei nicht selbstsperrendem Getriebe muß der Motor eine Stoppbremse erhalten. Wegen des häufigen Anlaufens ist mäßige Drehzahl und geringes Schwungmoment anzustreben und die Schaltapparate sind für sehr häufiges Schalten auszubilden. Bevorzugt wird Leonardschaltung (Stauch, Schiffbau IX, 24—24; X, 1—2). Die direkte Steuerung ohne Rückstellung des Schaltorgans durch die Rudermaschine eignet sich am besten für den elektrischen Betrieb (Hibbard, Am. Inst. El. Eng. 19. 5. 1914; Schiffbau 10. 12. 1919. The Engineer, Bd. 127, 16. 5. 19; Bahl, Schiffbau, Bd. 14, S. 6).

Ladewinden (Abb. 525). Am meisten werden benutzt Räderwinden mit doppeltem umkuppelbarem Vorgelege für 5/2 t bei 0,3/0,75 m/s, 18 kW und 3/1,2 t bei 0,3/0,75 m/s, 11 kW; Geschwindigkeit des leeren Hakens 1,5 m/s. Auch um etwa 30 % höhere Geschwindigkeiten und Leistungen lassen sich noch wirtschaftlich ausnutzen. Darüber hinaus ist der Gewinn an Ladezeit wegen der unvermeidlichen Pausen gering. (Giroux, Gen. El. Rev. Aug. 1923, S. 570). Antrieb durch Hauptstrommotor in Sicherheitssenkbrems-schaltung oder Compoundmotor. Schützensteuerung, wobei Schützen und Widerstände in einem besonderen Raume zusammengefaßt sind, wird vielfach bevorzugt. Der Geschwindigkeitswechsel kann auch elektrisch durch Feldregulierung des Motors bewirkt werden. Überstromausschalter ist vorzusehen. (Whitney, Gen. El. Rev. Febr. 1918; Bahl, Jahrb. Schiffbautechn. Ges. 1921; The Motorship [London], Juli 1921).

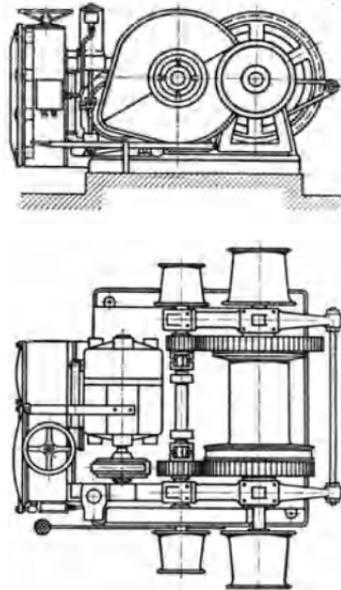


Abb. 525. Ladewinde mit angebauter Steuerwalze (Atlaswerke-SSW.)

Kohlenwinden. Auf Kriegsschiffen dienen zur schnellen Bekohlung Ladewinden oder etwa 14 bis 18 transportable Kohlenwinden mit 2 Spillköpfen für je 260 kg bei 1 m/s (Krell, ETZ 1915, Heft 32).

Munitionswinden werden entweder mit hin- und hergehendem Fahrkorb oder als Becherwerke mit dauernd durchlaufendem Motor ausgeführt. Auch Spillkopfwinden (Munitionswippen) kommen für leichte Munition in Betracht.

Für Höhen- und Seitenrichtmaschinen der schweren Geschütze ist weitgehende Geschwindigkeitsregelung, etwa 1 : 100, erforderlich, wozu sich Leonardschaltung mit besonders ausgebildeten remanenzlosen Generatoren und Schnellerregung eignet (Methling, Schiffbau 20. 10. 20).

Ventilatoren, Pumpen und Kompressoren, sowie Werkzeug- und Wirtschaftsmaschinen werden ähnlich wie in Landanlagen elektrisch angetrieben. Der elektrische Antrieb der Hilfsmaschinen im Maschinenraum ist bei Turbinen- und Motorschiffen für die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage wesentlich. (Hibbard, Am. Inst. El. Eng. Sept. 1921.)

Motoren und Apparate an Oberdeck müssen zuverlässig wasserdicht gekapselt sein; unter Deck ist ventiliert gekapselte Ausführung am zweckmäßigsten, in Ölmaschinenräumen ist wegen des Einflusses der Öldämpfe auf die Isolation u. Umlaufkühlung zu wählen. Die Isolation muß besonders widerstandsfähig gegen Feuchtigkeit sein. Die Lager müssen die zu erwartende Schräglage aushalten. Anlasser müssen bei ausbleibender Spannung selbsttätig ausschalten, dabei aber die auftretenden Erschütterungen aushalten.

(901) Schiffskreisel. Der aktive Schiffskreisel nach Sperry gestattet die Rollbewegungen eines Schiffes bis auf etwa 2° herabzusetzen. Wichtig für Kriegsschiffe, Fahrgastschiffe und Beförderung von Vieh; auch wird durch Unterdrückung des Rollens an Antriebsleistung gespart. Der Kreisel läuft im Vakuum und wird durch einen Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer unter Vermittlung eines Motorgenerators angetrieben. Die Präzessionsbewegungen, welche die zur Stabilisierung des Schiffes erforderlichen Momente hervorrufen, werden dem Kreisel durch einen Gleichstrommotor erteilt, der von einem auf die kleinsten Rollbewegungen ansprechenden Hilfskreisel gesteuert wird (El. Journ. Aug. 1921, S. 336).

(902) Die Kommandoapparate dienen zur sicheren Übermittlung der Kommandos von den Befehlsstellen. Besonders kommen in Betracht: Maschinentelegraphen, Steuertelegraphen und Ruderlagezeiger, Kesseltelographen zur Verständigung zwischen Maschinen- und Kesselraum; Verholtelegraphen zur Verständigung mit Vorder- und Hinterschiff beim Verholen; ferner Artillerie- und Torpedotelegraphen. Für den Betrieb dieser Apparate sind zahlreiche Systeme für Gleichstrom wie für Wechselstrom in Gebrauch. Letztere werden bei größeren Anlagen bevorzugt, da sie den Magnetkompaß nicht beeinflussen und gegen Isolationsfehler verhältnismäßig unempfindlich sind (Krell und Stauch, Deutscher Schiffbau 1913).

Als Richtungsweiser benutzen Kriegs- und große Fahrgastschiffe den Kreiselkompaß. Bei der Ausführung von Anschütz werden die 3 Kreisel des Mutterkompasses durch Wechselstrom von 333 Per/s angetrieben und stellen ihre resultierende Achse in den geographischen Meridian an. Diese Stellung wird elektrisch auf beliebig viele Tochterkompass übertragen (Anschütz-Kämpfe, Jahrbuch Schiffb. Ges. 1909; Brown, Engineering 13. 2. 1920; Martienssen, ETZ 1911, S. 862, 887; Nauticus, 1913).

Vermittels des Kreiselkompasses in Verbindung mit einem Fahrtmesser wird durch den Anschütz-Koppeltisch der Weg des Schiffes selbsttätig aufgezeichnet, während der Selbststeuerer durch einen vom Kreiselkompaß beeinflussten Elektromotor das Schiff selbsttätig auf geradem Kurs hält, wodurch die Fahrzeit merklich verkürzt wird (Bergener, Werft und Reederei 22. 5. 1921).

(903) Fernsprecher dienen als Schiffsfersprecher dem allgemeinen oder als Lauffersprecher dem Dienstverkehr, besonders von der Brücke nach dem Ma-

schinenraum, nach vorn und hinten. Sie werden durch Akkumulatorenbatterien von 12 V gespeist, die über einen Widerstand vom Netz oder durch Umformer geladen werden.

(904) Anlagen für Funktelegraphie erhalten alle Kriegsschiffe und Fahrgastschiffe sowie größere Frachtschiffe. Für Fahrgastschiffe ist ein vom Maschinenstrom des Schiffes unabhängiger Notsender vorgeschrieben. Hauptverkehrswellenlänge für Handelsschiffe 600 m, im Verkehr mit Küstenstationen 1800 m. Der Dampfer „Imperator“ wurde ausgerüstet mit 1 großen und 2 kleinen Antennen, 2 Empfangsanlagen, 1 Großstationssender für 1500—3000 km Reichweite, etwa 16 kW, 1 Kleinstation für 600—1200 km, 4 kW; 1 Notsender für 200 bis 400 km mit Batterie (Bredow, Jahrb. Schiffb. Ges. 1914).

(905) Unterwasserschallsignale. In dem Elektromagnetsender der Signal G. m. b. H.-Kiel werden die für Schwingungserzeugung im Wasser erforderlichen großen Drucke bei kleinen Wegen (0,01 mm) erzeugt durch Kupplung der kleinen

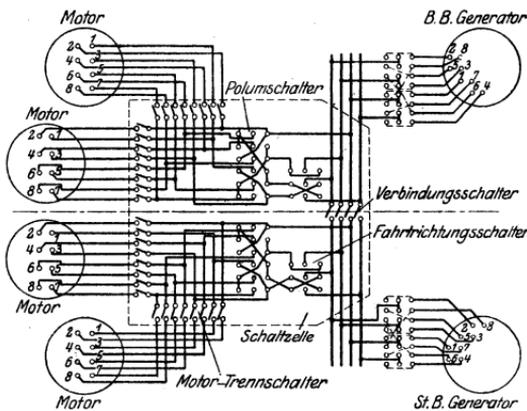


Abb. 526. Elektrischer Antrieb der Schiffschrauben.

Masse des Magnetankers mit der großen Masse der Membran durch longitudinal schwingende Stäbe und Rohre. Die Membran bildet einen Teil der Schiffswand; ihre Schwingungen werden zu Morsezeichen benutzt. Die Erregung erfolgt durch Wechselstrom von 1050 Per/s. Energiebedarf 300—800 W. Der Sender der Atlaswerke Bremen beruht auf der elektrodynamischen Wirkung der in einem Hohlzylinder erzeugten Wechselströme im magnetischen Felde. Als Empfänger dienen Mikrophone, die Geber selber in Verbindung mit Telephonen, oder mechanisch-akustische Einrichtungen (Hahnemann, Jahrb. Schiffb. Ges. 1920; Phys. Zeitschr. 1919, S. 104). Reichweite im Sommer etwa 7, im Winter 18 km (Licht, Phys. Zeitschr. 1919, S. 385). Anwendungsgebiet: Ansteuern fester Punkte und Ersatz der Positionslaternen bei Nebel, Eisberg- und Tiefenbestimmung, Signalmittel für Kriegsschiffe, Telephonie (Kunze, Werft und Reederei 7. 7. 1920).

(906) Der elektrische Propellerantrieb steht bei Turbinenschiffen in Wettbewerb mit dem Rädervorgelege. Obwohl der Wirkungsgrad etwas niedriger und das Gewicht höher, gestattet er bei Kriegsschiffen durch Polumschaltung der Drehstrommotoren höchste Wirtschaftlichkeit bei Marschgeschwindigkeit und forciert Fahrt. Durch Wegfall der Rückwärtsturbinen wird die Betriebssicherheit erhöht, die Turbinen können unabhängig von den Wellen zweckmäßig aufgestellt werden, die Wellentunnel fallen fort. Bei dem V. St. Linienschiff New Mexico (Abb. 526) werden die Schrauben durch 4 von 36 auf 24 Pole umschaltbare

Zweiphasenmotoren mit Doppelkurzschlußanker für je 5000 bis 6250 kW Wellenleistung bei 4000 V und 173. U/min angetrieben, die über Motortrennschalter, Polumschalter, Fahrtrichtungsschalter und Generatorschalter bis 17 Knoten von einem, darüber, bei geöffnetem Verbindungsschalter, von zwei 2poligen Generatoren gespeist werden. Umschaltungen erfolgen stromlos nach Unterbrechung der Generatorerregung; zur Erreichung der Zwischenstufen wird die Geschwindigkeit der Antriebsturbine verändert (Gen. El. Rev. April 1919; Stauch, ETZ 8. 4. 1920).

Auch für Handelsschiffe über 1500 PS bietet die elektrische Übertragung gegenüber doppeltem Rädervorgelege Vorteile, besonders da Zweischraubenschiffe auch mit einer Turbine beide Schrauben mit etwa $\frac{3}{4}$ Geschwindigkeit betreiben können. (ETZ 1920, S. 235; Gen. El. Rev. Febr. 1921; Journ. Am. Inst. El. Eng. Aug. 1921, S. 629).

Dieselelektrischer Propellerantrieb gestattet mehrere nicht umsteuerbare rasch laufende Dieselmotoren auf einen Propeller zu schalten. Man verwendet Gleichstromgeneratoren in Reihenschaltung mit Spannungsregulierung. Die Dieselmotoren können elektrisch angelassen werden (Mar. Engg., New York, Aug. 1921).

Unterseeboote erhalten gewöhnlich auf jeder Schraubenwelle einen Ölmotor, einen Doppелеlektromotor und Kupplungen. Die Geschwindigkeitsregulierung erfolgt im Motorfeld und durch Serien-Parallelschaltung der Motorhälften. Sämtliche Hilfsmaschinen werden elektrisch angetrieben (Berling, Jahrb. Schiffb. Ges. 1913; Krell, ETZ 1915, 32—38; Schürer, Schiffbau 25. 6. 1919; Coleman, El. Journ. Juli 1919).

Mehrfach sind Lastkähne, Fähren, Boote durch Gleichstrommotoren und Akkumulatoren angetrieben worden, die von Land oder durch Öldynamo an Bord geladen werden (Deetjen, ETZ 1908, S. 1159; Reich, ETZ 1909, S. 148). Bei elektrischer Treidelei wird das Fahrzeug durch eine elektrische Lokomotive, welche auf Schienen am Ufer fährt, gezogen (Meyer, El. Kraftbetr. u. B. 14. 11. 1908; Zehme, ETZ 1909, S. 380; Block, ETZ 1906, 22—25).

Elfter Abschnitt.

Elektrochemie.

(907) Gegenstand. Unter Elektrochemie versteht man alle Beziehungen zwischen elektrischer und chemischer Energie. Sie umfaßt daher auch elektrochemische Stromerzeugung und Stromspeicherung. Die oft mit thermischer Energie zusammenwirkenden elektrochemischen Prozesse können sowohl zerlegend als aufbauend wirken. — Der Vollständigkeit halber sind auch die Trennungen von Gemengteilen durch Kataphorese, statische und magnetische Stromwirkungen aufgenommen, obwohl wir es dabei nicht mit elektrochemischen Verfahren im eigentlichen Sinne zu tun haben.

(908) Elektrolyse. Sie bezweckt die Scheidung chemischer Verbindungen in ihre Bestandteile. — Sie bedarf eines flüssigen Elektrolyten, sei es in wässriger oder anderer kalter oder heißer Lösung, sei es im geschmolzenen Zustande. Es können die Elemente als solche gewonnen werden (z. B. Wasserzersetzung in H und O) oder es wird nur Anion oder Kation in elementarer Form gewonnen (Cl bei der Chloridelektrolyse, das Metall bei der elektrolytischen Metallgewinnung), während der andere Bestandteil andere Verbindungen eingeht (z. B. NaOH bei der Kochsalzelektrolyse, Lösen neuen Metalles aus der Anode bei elektrolytischen Raffinationsverfahren). Endlich können beide Bestandteile neue Verbindungen eingehen (z. B. Hypochlorit, Chlorat bei der Chloridelektrolyse bei bestimmter Arbeitsweise). Die Abscheidung von Ionen gleicher Art richtet sich nach ihrer chemischen Natur. Metallische Kationen scheiden sich um so leichter ab, je edler, elektronegativer das Metall ist. Die Elektrolyse bedarf in weitaus den meisten Fällen des Gleichstroms. Die Verwendung von Wechselstrom ist nur in wenigen Ausnahmefällen möglich.

Das Wesen der Elektrolyse und die günstigsten Bedingungen für ihre Ausübung sind weitgehend erforscht. Da aber die nutzbare Stromarbeit von vielen, sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren abhängt, sind bei der Ausbildung elektrolytischer Verfahren sorgfältig durchgeführte Dauerversuche erforderlich. Insbesondere sind vom technischen und wirtschaftlichen Standpunkte festzustellen: Die Spannung, welche zur Überwindung der Polarisation und der inneren und äußeren Widerstände erforderlich ist, Stromstärke, Stromdichte, Material, Form und Einbau der Elektroden, Kontakte, Temperatur, eventuelle Anwendung von Diaphragmen, Zu- und Abfluß, bzw. Zirkulation und sonstige Bewegung des Elektrolyten.

(909) Zersetzungsspannung [siehe (82) und (90)]. Die aufzuwendende elektrische Leistung ist gleich Stromstärke (I) mal Badspannung (E). Hierzu kommt die Überwindung der Leitungswiderstände. E setzt sich zusammen aus der Zersetzungsspannung ϵ und der zur Überwindung des Widerstandes R des Bades erforderlichen Spannung $e = I \cdot R$. Die Gesamtleistung ist daher $I \cdot E = I \cdot \epsilon + I^2 \cdot R$. Bezeichnet man die wirklich erforderliche, gegenüber dem theoretischen Betrag stets höhere Leistung mit N , so ist die Energieausbeute oder der gewöhnlich in Prozenten ausgedrückte Wirkungsgrad $\eta = \frac{I \cdot \epsilon}{N}$. Die Messung von I und R ist die übliche [(196) bis (203) und (193)]. — ϵ kann mit genügender Genauigkeit bei kaltflüssiger Elektrolyse und unangreifbaren Elektroden durch rasche Ermittlung

der bei verschiedenen Stromstärken auftretenden Klemmspannung bestimmt werden. Es ist $e = \varepsilon + i \cdot r$ und $e_1 = \varepsilon + i_1 \cdot r$, wobei r der Badwiderstand. ε ist dann $= \frac{e_1 \cdot i - e \cdot i_1}{i - i_1}$. Die für einen bestimmten Vorgang festliegende Zersetzungsspannung

kann in manchen Fällen (Metallraffination) durch Depolarisation erniedrigt werden (lösliche Anoden, Verwendung reduzierender oder oxydierender Zusätze an Anode oder Kathode). Von Wichtigkeit für möglichste Erniedrigung der Badspannung sind: Nutzwiderstand, Widerstand von Kontakten und Elektroden, Konzentration, Zusammensetzung, Temperatur des Elektrolyten, Elektrodenabstand. — Mechanische Depolarisation (Entfernung von Gasblasen an den Elektroden, Vermeidung von Schichtenbildung) kann durch Rühren, Einblasen von Luft oder anderen Gasen, Kreislauf des Elektrolyten erfolgen. Bei letzterem ist auf Verluste durch Nebenschluß zu achten.

(910) Stromstärke. Die günstigste Stromstärke wird als Stromdichte in der Regel auf die Flächeneinheit der Elektroden bezogen und unter Berücksichtigung schon vorliegender Erfahrungen durch Vor- und Dauerversuche ermittelt. Mit zunehmender Stromdichte steigt die Erwärmung des Bades ($I^2 R$). — Dieser Umstand wird bei Schmelzflußelektrolysen in der Regel ausgenützt, während er bei Elektrolysen in wässriger Lösung je nach dem Vorgang von Vorteil (Chloratdarstellung) oder von Nachteil (Persalze, Hypochlorit) sein kann. In letzterem Falle kann künstliche Kühlung erforderlich werden. Auch in bezug auf die elektrolytische Arbeit selbst besteht jeweils ein günstigstes Verhältnis zwischen Stromdichte und Stromausbeute. Letztere bezeichnet das Verhältnis zwischen theoretisch möglichen (Faradaysches Gesetz) und wirklich erhaltenen Mengen in der Regel auf die Ampérestunde bezogen; vgl. (78) und Tabelle (79).

(911) Elektroden. Von Einfluß ist das Elektrodenmaterial bezüglich mechanischer Festigkeit, chemischem Angriff, Leitfähigkeit und „Überspannung“ (kathodisch in verdünnter Schwefelsäure 0,005 bis 0,78 V je nach dem angewandten Metall). — Katalytische Wirkungen des Elektrodenmaterials können auftreten.

Das Material für die Elektroden hängt mit dem durchzuführenden Verfahren natürlich eng zusammen. Die am meisten verwendeten Elektrodenmaterialien sind die folgenden:

Verfahrengruppe	Anode	Kathode
A. Wässrige Elektrolyse:		
a) mit löslichen Anoden		
1. Metallraffination	das betreffende Rohmetall	das betreffende Feinmetall
2. Galvanoplastik u. Galvanostegie		
3. Herstellung unlösl. Metallverb.		
b) mit unlöslichen Anoden		
1. In alkalischer Lösung	Fe, Ni	Fe
2. In schwefelsaurer Lösung	Pt, Pb, PbO ₂ , MnO ₂ , Fe ₃ O ₄	verschiedene Metalle
3. In Chloridlösung		
a) Hypochlorit	Pt, C	Pt, C
b) Chlorat u. Perchlorat	Pt	Fe, C
c) Chlor-Alkali	C, F ₃ O ₄	Fe, Hg
B. Schmelzflußelektrolyse:		
1. Alkalimetalle aus Hydraten	Fe	Fe
2. Magnesium aus Chlorid	C	Fe
3. Aluminium aus Fluorid	C	C

Näheres siehe bei der Besprechung der einzelnen Arbeitsgebiete. Die Form der Elektroden paßt sich den Apparatformen an. Die Größe kann an beiden Polen gleich oder verschieden sein. Sie können im Apparat selbst parallel oder in Reihe geschaltet sein. Bei Anoden aus Edelmetall verwendet man zwecks Materialersparnis dünne Folien oder Netze aus dünnen Drähten. In manchen Fällen dienen die metallischen Behälter für den Elektrolyten direkt als Kathode. Bipolar geschaltete Elektroden können auch als Scheidewände für einzelne in Reihe geschaltete Apparatenelemente dienen (z. B. filterpressenartiger Aufbau bei elektrolytischen Wasserzersetzen).

(912) Diaphragmen. Bei wässrigen Elektrolysen, bei welchen die Produkte an den beiden Polen getrennt gehalten werden müssen, verwendet man in manchen Fällen poröse Scheidewände, sogenannte Diaphragmen. Man kann hier unterscheiden:

a) Diaphragmen im eigentlichen Sinne, welche den Ionen den Durchgang gestatten, aber möglichst an den beiden Polen Lösungen von verschiedener Zusammensetzung getrennt halten sollen (z. B. Diaphragmenverfahren bei der Alkali-elektrolyse).

b) Mechanisch wirkende, poröse Scheidewände, welche bei Lösungen gleicher Zusammensetzung an beiden Polen die Übertragung fester oder gasförmiger Körper von dem einen zum anderen Pol verhindern sollen (z. B. poröse Tücher bei Wasserzersetzen, poröse Platten bei der Herstellung von Elektrolyseisen behufs Abhaltung von Anodenschlamm von der Kathode usw.).

Andererseits kann man unterscheiden zwischen starren Diaphragmen (Tonplatten, Kieselgurplatten, Asbestpappe, Zementplatten, Seifenplatten usw.), Geweben (Asbest, Glaswolle usw.) und endlich plastischen Massen (z. B. Gemenge von Asbestfasern und Schwespatpulver beim Chloralkaliverfahren *Siemens-Billiter*). Letztere müssen naturgemäß in horizontaler Lage verwendet werden.

(913) Als Gefäße verwendet man in der Regel für schwefelsaure Lösungen verbleite Holzgefäße, für Chloridelektrolyse zementierte Eisenwannen, aus Granit oder Schiefer zusammengesetzte Behälter, für Schmelzelektrolyse meistens mit Kohlenstampfmasse ausgekleidete Behälter, die z. B. bei der Aluminiumdarstellung gleichzeitig Kathode sind.

(914) Schaltung. Speist eine Stromquelle mehrere elektrolytische Zersetzungsapparate, so können diese parallel, in Serie oder gemischt geschaltet werden.

Askensy, Einführung in die technische Elektrochemie, 1910. — *Billiter*, Die elektrochemischen Verfahren der chemischen Großindustrie. (Bisher erschienen Bd. I 1909, Bd. II 1911, Bd. III 1918.) — *Danneel*, Elektrochemie 1905 u. 1908. — *Förster*, Elektrochemie wässriger Lösungen 1905. — *LeBlanc*, Lehrbuch der Elektrochemie 1911. — *Lüpke-Bose*, Grundzüge der Elektrochemie 1907. — *Engelhardt's* Monographien über angewandte Elektrochemie. Halle a. S., Knapp. 45 Bände.

I. Elektrolytische Metallgewinnung.

(915) Allgemeines. Betrifft die Gewinnung reiner Metalle aus wässrigen oder geschmolzenen Elektrolyten, wobei man von natürlichen Erzen, künstlich hergestellten Metallverbindungen oder Rohmetallen ausgehen kann. In letzterem Falle spricht man von elektrolytischer „Raffination“ und verwendet das Rohmetall als Anode. Als Elektrolyt kann ein Salz des zu gewinnenden oder eines elektropositiveren Metalls dienen (Schmelzflußelektrolyse). — In wässriger Lösung (z. T. auch bei der Schmelzflußelektrolyse) können auch Säuren oder Alkalien als Elektrolyte dienen. Arbeitet man mit unlöslichen Anoden, so ist der Metallgehalt der Elektrolyte ständig, sei es durch Eintragen fester Verbindungen, sei es durch Elektrolytwechsel auf der erforderlichen Höhe zu halten. Bei löslichen Anoden muß man wegen der Aufnahme von Fremdmetallen, welche Badspannung und Qualität des Kathodenmetalles ungünstig beeinflussen können,

den Elektrolyten zeitweise erneuern. Fallweise können auch bei der elektrolytischen Metallgewinnung Diaphragmen Vorteile bieten.

Metallraffinationen erfordern eine um so geringere Badspannung, je reiner das Anodenmetall. — Depolarisatoren können die Spannung noch weiter heruntersetzen (z. B. SO_2), wodurch gleichzeitig ein Ersatz der durch Verunreinigung verbrauchten Säure (SO_3) erfolgen kann.

Die chemischen und mechanischen Eigenschaften des Kathodenmetalles können durch besondere Maßnahmen, wie Entfernung von H-Bläschen, gute Bewegung des Elektrolyten, Umhüllung der Elektroden, richtige Auswahl von Zusammensetzung, Konzentration und Temperatur des Elektrolyten, Zusatz von Kolloiden gegen grobkristallinische Niederschläge günstig beeinflusst werden.

Bei der Schmelzflußelektrolyse bleibt meistens (nicht bei Al) die Konzentration des Elektrolyten praktisch gleich. — Doch auch hier können Verunreinigungen, Spritzverluste, Wiederoxydation von bereits gefällttem Metall und „Metallnebel“ die Stromausbeute herabsetzen. Der Schmelzfluß wird in der Regel durch Joulesche Wärme (72) aufrecht erhalten, doch kann auch zusätzliche elektrische oder sonstige Heizung erforderlich werden.

Wässrige Elektrolyse stellt geringere Anforderungen hinsichtlich Material und Haltbarkeit als Schmelzflußelektrolyse. Erstere wird in der Regel für die Schwermetalle (Zn, Cu, Au, Ag, Sn, Ni, Fe usw.), letztere für die Leichtmetalle (Na, Ca, Mg, Al usw.) angewendet. — Die intermediäre Bildung von Amalgamen, wie sie ein Teil der Chlor-Alkali-Verfahren benutzt, ist für die praktische Gewinnung von Leichtmetallen nicht anwendbar.

Borchers, Elektrometallurgie 1913. — Neuburger, Handbuch der praktischen Elektrometallurgie 1907. — Peters, Elektrometallurgie und Galvanotechnik 1900. — Regelsberger, Elektrometallurgie 1910. — Winteler, Die Aluminiumindustrie 1903. — Siehe auch S. 595: Askenasy, Billiter; aus Engelhardts Monographien: Bd. 2, Minet, Aluminium; Bd. 35, Betts, Bleiraffination; Bd. 6, Borchers, Nickel; Bd. 9, Becker, Alkalimetalle; Bd. 10, Ulke, Kupfer; Bd. 16, Günther, Zink; Bd. 26, Neumann, Eisen; Bd. 39, Mennicke, Zinn; Bd. 3, Le Blanc, Chrom.

Leichtmetalle.

(916) Alkalimetalle (Na, K, Li, Rb, Cs). Es wird nur Natrium im größeren Maßstabe hergestellt. Je nach dem Elektrolyten unterscheidet man folgende Verfahrensgruppen:

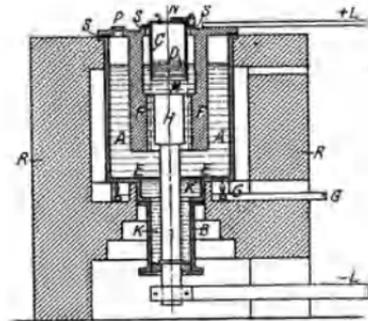


Abb. 527. Castnerscher Ofen.

a) Elektrolyt geschmolzenes wasserfreies Ätznatron. Die verbreitetste Anwendungsform, Außenheizung oder durch Stromwärme. Hohe Stromdichten $150\text{--}250\text{ A/dm}^2$. Temperatur wenig über Schmelzpunkt. Eisengefäße. Isolation durch erstarrte Schmelze. Anode Eisen oder Nickel, Kathode Eisen oder Kupfer. Geringer Karbonatgehalt günstig. Badeinheiten $100\text{--}2500\text{ A}$, $4,5\text{--}5\text{ V}$. Stromausbeute nicht über 50%. Wasserstoff verbrennt. Ausführungsformen: 1. Castner (DRP 58121) Abb. 527, A eisernes Schmelzgefäß, H Kathode, F Anode, M Drahtsieb zylinder, C Metallmantel mit

Deckel N; verbreitetste Ausführungsform. 2. Becker (DRP 104955), 3. Hulin (DRP 224853), 4. Rathenau & Suter (DRP 96672).

b) Elektrolyt geschmolzene Soda: Von Heyden-Oettel (DRP 269712).

c) **Elektrolyt geschmolzenes Kochsalz:** mit starrer Kathode Sodium Process Co (DRP 247444, 268 727), Lonza (DRP 268280), Chem. Industrie Basel (DRP 236804). Die Verfahren, welche geschmolzenes Kochsalz mit geschmolzenen Bleikathoden zerlegen, kommen in erster Linie für Gewinnung von Ätznatron und nicht Natriummetall in Frage.

d) **Elektrolyse geschmolzenen Salpeters:** Darling (DRP 83097, 97166). Hat sich nicht bewährt.

Becker, Alkalimetalle in Engelhardts Monographien. Bd. 9, 1903. — Billiter, Die Elektrolyse feuerflüssiger Schmelzen. Halle a. S. 1918, Knapp.

Erdalkalimetalle.

(917) **Kalzium, Strontium, Barium, Magnesium.** Bisher nur Ca und Mg technisch dargestellt. Elektrolyt geschmolzenes, wasserfreies Chlorid. Die Darstellung von Kalzium führten Borchers & Stockem (DRP 144667) zuerst durch. Technische Zersetzungsapparate von Seward & Kugelgen (DRP 214963). Elektrolyt von derartigem spez. Gewicht, daß das Metall aufsteigt (Abb. 528) und in einem gekühlten Metallring *f* gesammelt wird. Anode *d*, Kathode *e*, eisernes kühlbares Gefäß *a*, wodurch Isolation durch erstarrte Schmelze. Suter & Redlich (Elektrochemische Werke Bitterfeld DRP 155433) verwenden Berührungskathoden, so daß das Kathodenmetall allmählich in erstarrtem Zustande aus dem Bade herausgezogen wird.

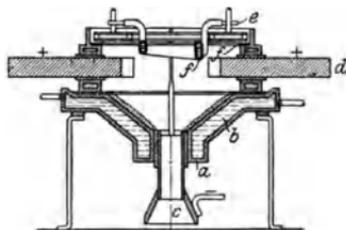


Abb. 528. Zersetzungsapparat von Seward u. Kugelgen.

Magnesium wird durch Elektrolyse von gereinigtem Carnallit dargestellt. Stromdichte 10 A/dm². 7 Volt. 60—80% Stromausbeute. Reinheit des Metalls ca. 99%. — Neuerer Zeit sind anscheinend ähnliche Verfahren wie bei Kalzium mit Berührungselektroden in Anwendung.

Billiter, Die Elektrolyse feuerflüssiger Schmelzen. Halle a. S. 1918, Knapp.

Erdmetalle.

(918) **Aluminium.** Die technische Gewinnung dieses Metalles durch Schmelzflußelektrolyse ist auf Arbeiten Héroults und insbesondere Kilianis zurückzuführen.

Zur Elektrolyse dient ein Bad aus natürlichem Kryolith oder aus Fluoraluminium und Fluornatrium, dem von Anfang an etwa 20% reine wasserfreie Tonerde beigemischt und im Verlaufe des Verfahrens entsprechend dem Stromverbrauch und unter Aufrechterhaltung der Spannung von 5,5 bis 8 V (je nach der Kapazität des Ofens) regelmäßig zugesetzt wird. Da die Schmelze bei der Temperatur der Elektrolyse (900—1000°) ein spez. Gewicht von max. 2,35, das geschmolzene Aluminium etwa 2,54 hat, so sammelt sich letzteres auf dem Boden des Ofens an, von wo aus es von Zeit zu Zeit mit eisernen Löffeln herausgeschöpft oder abgestochen wird. Die Stromdichte beträgt etwa 2,5 A auf 1 dm² Badquerschnitt.

1 kg Aluminium bedarf zu seiner Ausscheidung theoretisch 2970 Ah, die wirkliche Ausbeute beträgt bei einem Ofen, der mit 7500 A arbeitet, in 24 Stunden 43,1 kg Aluminium, also 71% der Theorie (auf den Stromverbrauch), der tatsächliche elektrische Energieverbrauch 22 bis 23 kWh für 1 kg Aluminium (bei 5,5 V). Andere Verluste bestehen in der Verdampfung der Fluorsalze der Schmelze, wobei das Fluor teils mit Natrium und Aluminium zusammen, teils in gasförmigen (Kohlenstoff-)Verbindungen weggeht, sowie auch dadurch, daß ein Teil des Alu-

miniums in Aluminiumkarbid übergeht, so daß die Schmelze von Zeit zu Zeit entfernt werden muß. Der Ofen ist ein mit zäher Kohlenpulverteermischung, die durch Ausbrennen erhärtet wird, ausgestampfter zylindrischer oder viereckiger Eisenblechkasten; im Boden sind starke eiserne Stifte, von einer eisernen Bodenplatte ausgehend, als Stromzuleiter mit eingestampft. Der Ofen (s. den schematischen Längsschnitt Abb. 529) dient somit als Kathode. Die Anoden — starke zylindrische Stangen oder vierkantige prismatische Blöcke, aus künstlicher Kohle gepreßt — müssen leicht verstellbar aufgehängt sein, und zwar derart, daß sie von der Wandung weiter entfernt sind als vom Boden. Der Verbrauch an Anodenkohlen beträgt etwa 1 kg auf 1 kg erzeugtes Aluminiummetall.

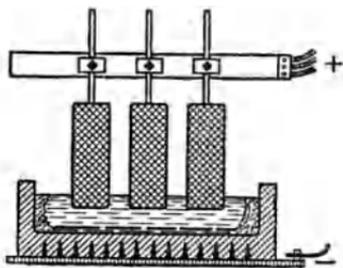


Abb. 529. Aluminiumofen.

Die Gesteungskosten des Aluminiums werden außer von der elektrischen Kraft durch den Preis der Elektrodenkohlen und der Tonerde bedingt, welche beide sehr rein, insbesondere frei von Eisen und Silizium sein müssen.

Winteler, Die Aluminium-Industrie 1903. — Minet, Aluminium 1902; aus „Monographien über angewandte Elektrochemie“. — Richards, Aluminium 1896, 3. Aufl. 1896.

Die Gewinnung des Berylliums ähnelt der des Aluminiums.

Auch die Gewinnung der Ceritmetalle, die als „Mischmetall“ Bedeutung für die zu Zündzwecken geeigneten pyrophoren Legierungen gewonnen haben, ist dem ähnlich (vgl. Liebigs Annalen der Chemie Bd. 320, 331 und 335).

Schwer- oder Erzmehalle.

(919) **Zink, Kadmium, Quecksilber.** Elektrolyse von direkt aus Erzen gewonnenen Zinksulfatlösungen hat während des Weltkrieges umfangreiche Einführung in den Vereinigten Staaten gefunden. Sie wird jetzt auch an einzelnen Stellen in Deutschland, Österreich, Italien, Japan usw. durchgeführt. Erfordert ganz reine Laugen. Gibt sehr reines Feinzeink, welches derzeit noch zu Überpreisen gehandelt wird.

Betriebsspannung 3,5—4 V, Stromdichte 1 A/dm². Stromausbeute bei reinen Lösungen hoch.

Als Anodenmaterial wird bisher hauptsächlich Blei verwendet, doch ist der anodische Verschleiß bei Gegenwart von Chloriden im Elektrolyten nicht unbeträchtlich. Erwähnenswert sind für die Verarbeitung von Zinklaugen die neueren Vorschläge von Siemens & Halske, die als Anoden solche aus dichtem Bleisuperoxyd oder Mangansuperoxyd vorschlugen, von Laczynski, der die Anoden mit einem Gewebe umhüllt, von Tossizza (Am. Pat. 703857) und von Rontschewsky (Zeitschr. f. Elektrochemie Bd. 7, S. 21), die unter Anwendung von Diaphragmen an der Anode chemische Arbeit leisten lassen und so den Spannungsverbrauch erniedrigen.

Die Elektrolyse von Kadmium- und Quecksilberlösungen (Alkalisulfidlösung) hat bisher keine technische Anwendung gefunden.

Günter, Die Darstellung des Zinks. Bd. 16 von Engelhardt's Monographien über angewandte Elektrochemie.

(920) **Kupfer.** In die Kupferhüttentechnik hat die Elektrolyse nach Erfindung der Dynamomaschine in ausgedehntestem Maßstabe Eingang gefunden, und zwar zunächst zur Raffination von Schwarz- und Garkupfer. Seitdem wird weit über die Hälfte des Weltverbrauchs an Reinkupfer durch elektrolytische Raffination gewonnen. Die Rohkupferanoden werden abwechselnd mit Feinkupferblech-Kathoden in hölzerne mit Blei ausgekleidete Bottiche gehängt. Die

Entfernung zwischen den Elektroden beträgt 50 bis 80 mm. Zur Verbindung der Elektroden mit den Leitungen dienen Kupferstreifen, welche auf den Längsleisten eines auf dem Bottichrande ruhenden, mit Öl, Paraffin oder ähnlichen Substanzen getränkten Holzrahmens liegen (Parallelschaltung). Die Anoden haben je zwei Ansätze, mit denen sie auf die Leitungen gehängt werden. Je einer dieser Ansätze ist gegen die negative Leitung durch Anstrich oder Gummipplatten isoliert. Die Kathoden hängen meist in Kupferhaken an Holzleisten. Zur Verbindung ist ein Kupferblechstreifen so über die Holzleiste gezogen, daß er mit einem oder beiden Haken und der negativen Leitung in Berührung steht. Der Elektrolyt besteht aus einer mäßig konzentrierten, sauer zu haltenden Kupfervitriollösung. Durch Einblasen eines feinen Luftstromes in ein oben und unten offenes Rohr, das die Mitte des Bodens mit einem Ende des Flüssigkeitsspiegels im Elektrolyserbottiche verbindet, erreicht man eine ideale Laugenzirkulation neben Reinerhaltung der Laugen, wenn man die Bäder mäßig warm hält. Bei Kupfersorten, welche ohne diese Laugenzirkulation höchstens mit einer Stromdichte von 30 A/m^2 verarbeitet werden konnten, kann man heute bis auf 100 A/m^2 gehen, bei reineren Kupfersorten steigert man die Stromdichte auf 150 bis 200 A/m^2 . Die erforderliche EMK beträgt für die Zelle je nach der Reinheit des Kupfers und des Elektrolyten $0,1$ bis $0,25 \text{ V}$. Außer der vorstehend geschilderten Schaltung ist in Nordamerika auch die Reihenschaltung vorübergehend in Gebrauch gewesen, wobei in jedem Bade zwischen der stromzu- und abführenden Platte ohne metallische Verbindung eine Anzahl Kupferplatten als Mittelleiter hängen; sie verlangt jedoch schon sehr gutes ($99,5\%$) Anodenkupfer.

Das Kupfer geht von der Anode zur Kathode über; einige Verunreinigungen des Rohkupfers (Fe, Ni, Co, As usw.) gehen in Lösung, ohne an der Kathode gefällt zu werden. Ag, Au, PbO_2 , Cu_2O (auch fein pulver. metall. Cu) treten nicht in die Lösung ein, sondern fallen als „Anodenschlamm“ ab. Dieser wird gesammelt und mit Blei angetrieben.

Durch Aufnahme dieser Verunreinigungen aus der Anode verarmt das Bad gleichzeitig an Kupfer und an Säure, so daß für Zufuhr beider gesorgt werden muß.

Die direkte Verarbeitung roher sulfidischer Kupfererze in elektrolytischen Kreislaufprozessen (Siemens & Halske mit Ferrisulfat, Höpfner mit Kupferchlorid) hat sich keinen Eingang in die Industrie verschaffen können. — Hingegen kommt die chemische Laugung mit Schwefelsäure und Elektrolyse der Sulfatlösungen bei natürlichen oxydischen oder gerösteten sulfidischen Erzen immer mehr zur Aufnahme, insbesondere in Amerika.

Zu erwähnen ist hier auch das Elmore'sche Verfahren, nach welchem (z. B. in Schladern a. d. Sieg) nahtlose Kupferröhren unter Verwendung eines Rohkupfers von 94 — 96% Feingehalt auf galvanoplastischem Wege mittels drehender und von hin- und hergehenden Glättwerkzeugen bearbeiteter walzenförmiger Kathoden hergestellt werden (Stromdichte 600 A/m^2); als Elektrolyt dient schwachsaure Kupferlösung; Au und Ag sammeln sich im Schlamm.

Ulke, Die elektrolyt. Raffination des Kupfers. 1904 (Bd. 10 aus Engelhardt's Monographien über angewandte Elektrochemie).

(921) Silber. Bei der Raffination gold- und platinhaltigen Silbers wird dieses an der Anode gelöst und an der Kathode niedergeschlagen. Elektrolyt: verdünnte, sauer gehaltene Lösung von AgNO_3 .

Bei Feinsilberarbeit sind die Anoden Blicksilberplatten, die an Haken auf einem auf den Leitungen ruhenden und mit der positiven Leitung in Kontakt befindlichen Bronzerahmen hängen, die Kathoden Feinsilberbleche, die mit Hilfe von Stäben und Haken ebenfalls auf die Leitungen gehängt und hierdurch mit dem negativen Pol in leitender Verbindung sind. Die Anoden sind mit Leinenbeuteln umgeben. Man arbeitet mit verhältnismäßig hohen Stromdichten (bis zu 300 A/m^2 Kathodenfläche), um die wertvollen Metalle schnell durchzusetzen. Das Silber wächst daher in Nadeln an den Kathoden an und wird fortwährend durch hölzerne, mechanisch bewegte Abstreicher abgestoßen; es sammelt sich in einem mit Leinwand aus-

gelegten und mit Lattenboden versehenen Kästen, der am Boden des Elektrolyserbottichs steht. Alle 24 h wird das abgestoßene Silber herausgehoben, gewaschen, gepreßt, getrocknet und eingeschmolzen. Die Anodenbeutel werden wöchentlich ein- oder zweimal von dem Goldschlamm entleert, der dann in bekannter Weise weiter verarbeitet wird. Bei 4 Elektrodenpaaren im Kasten beträgt die erforderliche Spannung 1,5 V. Dieses von Moebius ausgearbeitete Verfahren ist in Deutschland in der Deutschen Gold- und Silberscheidungsanstalt vorm. Röbler & Co. in Frankfurt a. M. in Betrieb. Durch die nach dem Kriege eingetretenen Verhältnisse ist in Deutschland eine große Zahl kleinerer Edelmetallneuanlagen entstanden, die in der Hauptsache von Siemens & Halske unter Verwendung einer verbesserten Möbius-Zelle gebaut worden sind.

(922) Gold. Die elektrolytische Ausfällung aus den verdünnten Cyankaliumlösungen nach Siemens & Halske ist zwar von gutem Erfolg, wird aber durch die chemische Fällung mittels Aluminium oder Zink stark verdrängt. Als Anoden dienen Eisenbleche, als Kathoden Bleibleche. An der Anode bilden sich verwertbare Eisencyanide (Berlinerblau), die mit Gold belegte Bleiplatte wird von Zeit zu Zeit eingeschmolzen und das Gold daraus abgetrieben.

Nach Wohlwill (Verfahren der Norddeutschen Affinerie) wird Rohgold als Anode gegenüber einer Feingoldkathode in verdünnter warmer Salzsäure bzw. saurer Goldchloridlösung bei hoher Stromdichte (1000 A/m² und darüber), besonders vorteilhaft mit asymmetrischem Wechselstrom (DRP. 207555), elektrolysiert, wobei ein sehr reines Gold entsteht, während Platin und Palladium in Lösung, Iridium und Silber (als Chlorsilber) in den Schlamm gehen. Das im Bad gelöste Platin muß von Zeit zu Zeit durch Ausfällen mit Salmiak entfernt werden.

(923) Zinn. Zinnerze werden elektrolytisch nicht verarbeitet. Die elektrolytische Verarbeitung von Weißblechabfällen (als Anode) in alkalischer Lösung wurde früher an mehreren Stellen betrieben, wird aber in neuerer Zeit immer mehr durch rein chemische Verfahren verdrängt (Chlorierung).

Es wurde mit warmen 10%igen NaOH-Lösungen (2% Sn) und 1,5 V Betriebsspannung gearbeitet.

Mennicke, Die Elektrometallurgie des Zinns (Bd. 39 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).

(924) Blei. Die Schwierigkeiten, die die Gewinnung von reinem, dichtem Blei aus Rohblei durch Elektrolyse der wässrigen Lösung seiner Salze bot, sind überwunden, seitdem man nach Betts (DRP. 198288) als Elektrolyt die Kieselflußsäure unter Zusatz von Gelatine benutzt. Dabei scheidet sich der nicht unbedeutende Wismutgehalt des Rohmetalls nebst anderen Fremd-(auch Edelmetallen) gänzlich im Anodenschlamm ab; auch die Verwendung der Überchlorsäure hat bei gleichzeitigem Zusatz von Kolloidsubstanzen gutes Walzblei ergeben.

Betts, deutsch von Engelhardt, Bleiraffination durch Elektrolyse. 1910. (Bd. 35 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie.)

(925) Nickel, Kobalt. Nickel läßt sich bei höherer Temperatur aus Rohnickelanoden mit Nickellösungen gut raffinieren. Um Nickelerze zu verarbeiten, werden zunächst durch Röst- und Konzentrationsarbeit Legierungen mit Kupfer hergestellt, die dann elektrolytisch bis auf 1% von Kupfer befreit werden, während der Rest an Kupfer und Eisen chemisch ausgefällt und die Nickellösung sodann elektrolysiert wird.

Borchers, Elektrometallurgie des Nickels. 1903. (Bd. 6 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie.)

(926) Eisen. Elektrolytische Verfahren zur Gewinnung reinen Eisens sind von Fischer mit den Langbein-Pfanhauser-Werken in Leipzig, in neuerer Zeit auch von Schlötter, Oettinger, Estelle, Siemens & Halske u. a. ausgearbeitet worden. Die erstgenannten arbeiten mit heißen Chlorurlösungen unter Zusatz von Erdalkali- oder Alkalichloriden. — Während des Krieges wurden von Siemens & Halske und Griesheim-Elektron große Anlagen in München und Bitterfeld für Rechnung des Reiches

gebaut, um Elektrolyseisen an Stelle von Kupfer für militärische Zwecke zu verwenden. Für Friedenszwecke sind die Gesteungskosten vorläufig noch zu hoch, wenn es sich nicht um besondere Anwendungszwecke für kleinere Mengen handelt.

Neumann, Elektrometallurgie des Eisens. 1907. (Bd. 26 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie.)

Die elektrolytische Gewinnung von Chrom, Mangan, Titan, Vanadium, Molybdän, Uran und anderer seltenerer Metalle ist zwar möglich, wird aber im technischen Maßstabe nicht durchgeführt.

II. Anwendung der Elektrolyse zur Herstellung chemischer Produkte.

Herstellung chemischer Produkte.

(927) **Allgemeines.** Die Herstellung chemischer Produkte durch Elektrolyse kann in verschiedenster Richtung, mit und ohne chemische Mitwirkung des Elektrodenmaterials erfolgen. Nachstehend einige Beispiele:

1. Gewinnung von Gasen an beiden Polen (z. B. elektrolytische Wasserzerersetzung $O + H -$).
2. Gewinnung eines Gases an einem, einer gelöst bleibenden Verbindung am anderen Pol (z. B. Chlor-Alkali-Elektrolyse $Cl + NaOH -$).
3. Gewinnung löslicher Verbindungen an beiden Polen, die sich im Elektrolyseur wieder vereinigen unter Bildung
 - a) gelöst bleibender Verbindungen (z. B. Hypochlorite bei dem Bleich-elektrolyseuren),
 - b) ausfallender unlöslicher Verbindungen (z. B. Oxyde, Sulfide, Superoxyde, Hydrate usw.).
4. Reine Oxydationsprozesse
 - a) anorganische (z. B. Chlorat, Perchlorat, Persulfat, Permanganat, Ferri-zyankalium usw.),
 - b) organische.
5. Reine Reduktionsprozesse
 - a) anorganische (z. B. Hydrosulfite),
 - b) organische.

Löb, Die Elektrochemie der organischen Verbindungen. 1905. — Moser, Die elektrolytischen Prozesse der organischen Chemie (Bd. 36 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie). 1910. — Peters, Angewandte Elektrochemie. Bd. II (2 Abt.). Anorganische Elektrochemie Bd. III. Organische Elektrochemie und die bei den folgenden Einzelfällen angegebene Spezialliteratur.

Elemente und anorganische Verbindungen.

(928) **Sauerstoff und Wasserstoff.** Der Wasserstoff wird in der elektrolytischen Alkaliindustrie als Nebenprodukt gewonnen oder neben Sauerstoff durch Elektrolyse von Wasser, das mit Alkali oder Säure leitend gemacht worden ist, hergestellt. Er kommt, wie Sauerstoff, in Stahlflaschen komprimiert in den Handel.

Apparate zur gleichzeitigen Entwicklung von Sauerstoff und Wasserstoff sind zahlreich konstruiert worden, z. B. von Latschinoff, O. Schmidt, Garuti, Schoop, der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co.; sie alle fußen auf der Elektrolyse von Natronlauge zwischen Eisen- oder Nickelelektroden oder von verdünnter Schwefelsäure zwischen Eisen- und Bleielektroden. Die Gase werden gesondert aufgefangen. Mit den Apparaten der Elektrizitäts-A.-G. vorm. Schuckert & Co. lassen sich in 24 Stunden 103 m^3 Sauerstoff und 212 m^3 Wasserstoff mit ca. 70 kW in 40 Zersetzungszellen zu 600 A und 2,8—3 V (bei 70°C) erzeugen.

Schoop, Die industrielle Elektrolyse des Wassers. Stuttgart 1901, und Engelhardt, Elektrolyse des Wassers. Halle 1902 (Bd. 1 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).

(929) Überführung des Chromoxyds in Chromsäure. Es handelt sich im wesentlichen um die Regenerierung der Abfallaugen der Alizarinfabriken. Aus diesen soll die in Chromalaun oder Chromsulfat übergegangene Chromsäure wieder zurückgebildet werden. — Das Verfahren ist technisch durchgebildet und wirtschaftlich durchführbar, wenn die zu regenerierenden Laugen keinen zu hohen Gehalt an organischen Substanzen haben und für deren vorausgehende Oxydation nicht zu hohe Energiemengen erfordern. Stromdichte bis zu 6 A/dm^2 bei 3—3,5 V Betriebsspannung.

Le Blanc, Die Darstellung des Chroms und seiner Verbindungen auf elektrischem Wege. 1902. (Bd. 3 aus Engelhardt's Monographien über angewandte Elektrochemie.)

(930) Alkalipermanganat. Nach einem Verfahren der Chemischen Fabrik auf Aktien (vorm. Schering) in Berlin wird durch Einleiten des Stromes in zwei getrennte Zellen mit poröser Scheidewand, die eine mit Alkalilösung und der negativen Elektrode, die andere mit Manganatlösung und der positiven Elektrode beschickt, an der letzteren das Permanganat, an der negativen Elektrode neben Alkali Wasserstoff erhalten. Auf ähnlichem Wege kann man anodisch Ferrizyankalium zu Ferrizyankalium oxydieren.

(931) Perkarbonat. Wird eine gesättigte, durch Diaphragma in Anoden- und Kathodenraum getrennte Lösung von Kaliumkarbonat bei etwa -15° zwischen Platinelektroden mit hoher Stromdichte elektrolysiert, so erhält man im Anodenraum Kaliumperkarbonat neben Karbonat und Bikarbonat.

Die Perkarbonate finden in der Photographie Verwendung oder zur Herstellung von Wasserstoffsperoxyd.

(932) Persulfosäure und deren Salze. Bei der Elektrolyse von Schwefelsäure, bzw. Alkalisulfaten mit hohen Stromdichten und niederen Temperaturen erhält man Überschwefelsäure und deren Salze. — Anode Platin, Kathode meistens Blei. — Technisch werden die Persulfate des Ammoniums, Kaliums und Natriums hergestellt. — Sie sind starke Oxydationsmittel.

(933) Elektrolyse der Alkalichloride. Je nach den Arbeitsbedingungen kann man bei der elektrolytischen Zerlegung der Alkalichloride (bzw. Bromide und Jodide) zu ganz verschiedenen Produkten kommen. — Man kann die nachstehenden Arbeitsgruppen unterscheiden:

a) Die Produkte der Elektrolyse, Halogen und Alkali werden durch Diaphragmen oder durch andere Maßnahmen getrennt gehalten: Darstellung von Chlor und Alkali.

b) Die Produkte vereinigen sich im Apparat selbst wieder und werden daher nicht getrennt. Elektrolyse erfolgt bei Zimmertemperatur: Darstellung von Hypochlorit (Bleichflüssigkeit).

c) Wie bei b, die Elektrolyse erfolgt aber bei höherer Temperatur: Darstellung von Chlorat.

d) Schon fertig vorliegendes, auf rein chemischem oder elektrolytischem Wege erhaltenes Chlorat wird bei sehr niedriger Temperatur der Elektrolyse unterworfen: Darstellung von Perchlorat.

a) Chlor und Alkali. Die Elektrolyse wird in gesättigten Chloridlösungen von höherer Temperatur (ca. $60-70^\circ$) durchgeführt. Betriebsspannung 3,5—4 V. Die meisten Verfahren verwenden verhältnismäßig große Einheiten von 2000 bis 6000 A und darüber. Die Größe der Einheiten wird in der Regel danach gewählt, wie viel Bäder man bei einer bestimmten Produktion einrichten muß, um durch Serienschaltung auf normale Betriebsspannungen an den Dynamos zu kommen. In letzterer Beziehung geht man in der Regel nicht über 220 V hinaus. Anoden meistens graphitiierte Kohlen, zum Teil auch Magnetit. — Kathoden meistens Eisen.

Je nach der Arbeitsweise lassen sich verschiedene Verfahrensgruppen unterscheiden, die in den nachfolgenden schematischen Skizzen dargestellt sind:

I. Diaphragmenverfahren. Anoden- und Kathodenraum sind durch Diaphragmen voneinander getrennt. Man erhält daher im Anodenraum Chlorgas, im Kathodenraum eine Ätzalkali enthaltende Chloridlösung, die außerhalb des Bades eingedampft wird. Das Chlorid fällt aus und geht in den Betrieb zurück, während die alkalische Dicklauge entweder als solche verwendet oder durch weiteres Eindampfen und Schmelzen auf festes Alkali verarbeitet wird. — Die Diaphragmenverfahren lassen sich in zwei Gruppen unterscheiden:

a) Verwendung von starren porösen, meist senkrecht angeordneten Diaphragmen. — Das bekannteste und verbreitetste Verfahren ist das von *Grieseheim-Elektron* (Abb. 530). — Die Diaphragmen werden aus Zement unter Zusatz von Salz geformt und letzteres nach dem Binden ausgelaugt.

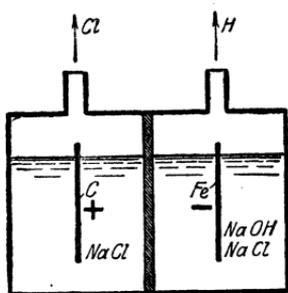


Abb. 530.
Altes Diaphragmenverfahren
(festes stehendes Diaphragma).

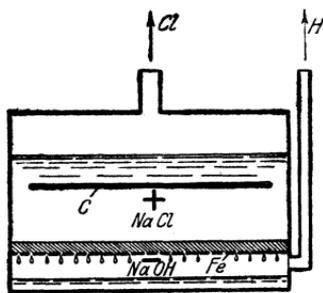


Abb. 531. Filter-Diaphragma
(pulverig-faserig).

b) Verwendung loser, aus faserigem und pulverigem Gemengter horizontaler Diaphragmen. — Das verbreitetste Verfahren ist das von *Siemens-Billiter*. Als Diaphragma dient ein Gemenge von Schwespat und Faserbest. Der ganze Elektrolyt wird vom Anodenraum durch das Diaphragma gedrückt, welches auf einem als Kathode geschalteten eisernen Drahtnetz aufliegt. Der Katolyt tritt also nur tropfenweise in den Kathodenraum. Dieser ist also nicht mit Flüssigkeit gefüllt (Abb. 531).

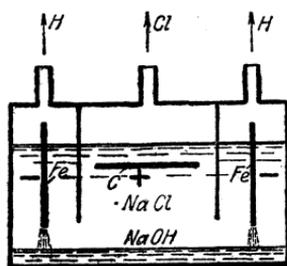


Abb. 532. Schichtungsverfahren.

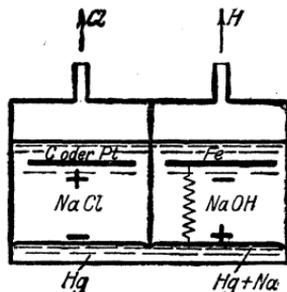


Abb. 533. Quecksilberverfahren.

II. Schichtungsverfahren. Das Elektrolysiergefäß enthält nur in seinem oberen Teile durch nichtleitende starre Wände geteilte Elektrodenräume. Der Katolyt sammelt sich infolge seines höheren spezifischen Gewichtes am Boden des Zersetzers. — Das bekannteste Verfahren ist das sog. „*Aubiger Glockenverfahren*“ (Abb. 532).

III. Quecksilberverfahren. Diese verwenden eine Quecksilberschicht als Mittelleiter, so daß primär Chlorgas und Alkali amalgam gebildet wird, welches letzteres als Anode gegen eine Eisenkathode wirkt und seinen Gehalt an Alkalimetall als Hydrat abgibt. Die Ätznatronlösung ist daher bei diesen Verfahren praktisch chloridfrei (Abb. 533). Die bekanntesten Verfahren dieser Gruppe sind die von Castner, Kellner-Solvay und Wildermann.

Lucion, Elektrolytische Alkalichloridzerlegung mit flüssigen Metallkathoden (Bd. 23 von Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie). — Billiter, Die elektrolytische Alkalichloridzerlegung mit starren Metallkathoden. I. u. II. Teil. (Bd. 41 u. 43 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie). — Schlötter, Über die elektrolytische Gewinnung von Brom und Jod. Bd. 27 von Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).

b) Hypochlorit. Trennt man die bei der Elektrolyse der Halogenide entstehenden Produkte im Elektrolyseur nicht, sondern läßt man sie wieder aufeinander einwirken, so entstehen bei gewöhnlicher Temperatur in der Hauptsache Halogenite neben etwas Halogenat. — Das wichtigste bezügliche Verfahren ist die Herstellung von Hypochlorit, welches zum Bleichen in der Textil-, Papier- und Zellstoffindustrie und in neuerer Zeit auch zur Desinfektion von Trinkwasser an Stelle von Chlorkalk oder komprimiertem Chlor verwendet wird. Man verwendet heute wohl ausnahmslos Apparate mit doppelpolig wirkenden Elektroden, so daß der Anschluß an normale Gleichstromspannungen von 110 bzw. 120 V möglich ist.

Je nach dem verwendeten Elektrodenmaterial unterscheidet man:

1. Reine Platinapparate (Kellner-Siemens & Halske).
2. Reine Kohlenapparate (Haas & Stahl, Siemens & Halske).
3. Gemischte Platin-Kohlenapparate (Schuckert-Siemens & Halske).

Die Leistung der Apparate richtet sich, da die Stromausbeute mit der Konzentration an Bleichchlor abnimmt, nach letzterer; so weisen z. B. die Apparate von Siemens & Halske bei 15—20 g Bleichchlor im Liter und 10 Proz. Salzlösung auf 1 kg Bleichchlor einen Energieverbrauch von 5,7—5,9 kWh und 6,0—7,5 kg Salzverbrauch, dagegen für 30 g Bleichchlor im Liter auf 1 kg Bleichchlor einen Energieverbrauch von 6,5 kWh und 5,0 kg Salzverbrauch bei Anwendung einer 15 Proz. Salzlösung auf.

Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. Bd. 8: Engelhardt, Hypochlorite u. elektrische Bleiche, technisch-konstruktiver Teil. 1903. Bd. 17: Abel, desgl., theoretischer Teil. Bd. 38: Ebert u. Nubbaum, desgl., prakt. angewandter Teil.

c) Chlorat. Arbeitet man wie unter b) aber bei höherer Temperatur, so tritt die Bildung von Hypohalogenit zurück und wird die Halogenatbildung zum Hauptprozeß. — Man verwendet in der Regel Platinanoden und Eisen- oder Kohlenkathoden bei sehr hoher Stromdichte, um die erforderliche höhere Temperatur durch Stromwärme zu erreichen. — Am verbreitetsten ist die Darstellung von chlorsaurem Kali. — Da dieses in der Kälte schwer löslich ist, so wird es aus den elektrolysierten Chloridlösungen durch einfaches Abkühlen erhalten, während die Mutterlaugen wieder in den Betrieb zurückkehren.

Kerschaw, Die elektrolytische Chloratindustrie (Bd. 19 von Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).

d) Perchlorat. Wird schon vorliegendes Chlorat bei tiefer Temperatur der Elektrolyse unterworfen, so erhält man Perchlorat. Anode in der Regel Platin, Kathode Eisen.

(934) Elektrolytische Darstellung unlöslicher anorganischer Verbindungen. Durch Verwendung von Metallanoden und Alkalisalzelektrolyten ohne Diaphragma lassen sich eine Reihe von Oxiden und Hydroxyden darstellen. Auf ähnliche Weise lassen sich elektrolytisch Bleiweiß, Bleisuperoxyd, Chromgelb, Schwefelkadmium, Zinnober und andere Verbindungen darstellen.

Organische Verbindungen.

Die Elektrolyse hat bis jetzt für die organische Chemie hauptsächlich wissenschaftliches Interesse. Die Anwendung in der Praxis ist sehr beschränkt, da die einfachen chemischen Reaktionen meist billiger und glatter verlaufen als die mit unerwünschten Nebenwirkungen verknüpften, im Energiebedarf teuren elektrochemischen Reaktionen.

(935) **Jodoform.** Die chemische Fabrik auf Aktien in Berlin vorm. E. Schering hat ein Verfahren zur elektrolytischen Darstellung von Chloroform, Jodoform und Bromoform patentiert erhalten. Die Darstellung des Jodoforms geschieht durch Einwirkung des Stromes auf eine an der Anode mit Alkohol versetzte Lösung von Soda und Jodkalium; das Jodoform entsteht an der Anode.

Moser, Die elektrolytischen Prozesse der organischen Chemie (Bd. 36 aus Engelhardt's Monographien über angewandte Elektrochemie).

III. Weitere Anwendungen der Elektrolyse.

(936) **Elektrolytische Verfahren zum Färben, Bleichen, Reinigen usw.** Im Vorstehenden wurden Verfahren angeführt, bei welchen durch Elektrolyse ganz bestimmte, wohl definierte Stoffe gewonnen werden sollen. Es wurde nun auch versucht, durch Strom eine Reihe elektrolytischer Wirkungen zu erzielen, die keine so einfachen und leicht definierbare Vorgänge darstellen, sondern bei welchen eine ganze Reihe von Reaktionen nebeneinander auftritt und nur ein bestimmter Enderfolg in bezug auf Veränderung des Rohmaterials angestrebt wird. — Es handelt sich hierbei meistens um Reinigungs- oder Konservierungsverfahren, welche aber zum großen Teil nicht über das Versuchsstadium hinausgekommen sind. Einige der wichtigsten Verfahrengruppen seien nachstehend angeführt:

1. Färbungen auf der Faser.
2. Direkte Bleichverfahren, bei welchen im Gegensatz zur gesonderten Darstellung des Bleichmittels das Bleichgut direkt in den elektrolytischen Zersetzer gebracht wird.
3. Direktes Aufschließen von Holz zu Zellstoff, Konservierung von Holz.
4. Entfetten und Entschweißen von Wolle.
5. Elektrolytisches Gerben.
6. Elektrolytische Reinigung von Trink- und Abwasser.
7. Verhinderung von Kesselsteinbildung.
8. Reinigung zuckerhaltiger Flüssigkeiten (Rübensaft, Rohrzuckersaft, Melasse).
9. Reinigung von Alkohol, Wein, Essig.
10. Reinigung von Ölen und Fetten usw.

IV. Elektrothermisch-chemische Vorgänge und Einrichtungen hierzu.

Allgemeines.

(937) Die **elektrothermische Wirkung** des elektrischen Stromes entsteht durch den Leitungswiderstand der von ihm durchflossenen Körper und wird, außer bei der schmelzflüssigen Elektrolyse behufs Aufrechterhaltung des Schmelzflusses, benutzt, wenn es sich, auch ohne gleichzeitige Elektrolyse, um die Erzeugung sehr hoher Temperaturen behufs Ausführung von chemischen Umsetzungen und Zersetzungen handelt, die sich sonst nur schwer durchführen lassen. Sie unterliegt dem Jouleschen Gesetze und ist (72)

$$Q = 0,239 \cdot I^2 R t.$$

(938) Erhitzungsarten. Man unterscheidet verschiedene Erhitzungsarten, je nachdem der Heizstrom das Material selbst als Widerstand durchströmt (direkte Heizung) oder einen benachbarten Widerstand z. B. die Ofen- oder Tiegelwandung, oder auch einen frei im Ofenraum angeordneten Widerstand, durchfließt, in welchem letzteren Fällen die erzeugte Wärme durch Leitung oder Strahlung auf das zu erhitzende Gut übertragen wird (indirekte Heizung). In beiden Fällen kann man noch unterscheiden a) reine Widerstandsheizung, und zwar durch primären Strom, b) Erhitzung durch Sekundärstrom (Induktionsheizung) und c) Lichtbogenheizung, bei der im Falle der direkten Erhitzung das Material selbst einen Pol des Lichtbogens bildet oder auch — bei Gasen — vom Lichtbogen durchzogen wird. Man benutzt übrigens auch elektrisch erhitzte Gase sowie verschiedene Erhitzungsarten neben- oder nacheinander (kombinierte Heizung). Bei der direkten Heizung muß das Material den erforderlichen Widerstand bieten; dieser läßt sich häufig — bei an sich schlecht leitenden Massen — durch Zumischung besser leitender Stoffe, die den Prozeß nicht stören oder sogar, wie bei metallurgischen Reduktionsprozessen Kohle oder Silizium u. a., im Prozeß erforderlich sind, regeln. Ist dies nicht angängig, wie z. B. bei der Raffination von Stahl, so kann man häufig durch Querschnittsverengerungen des Metallbades, etwa rinnenartige Anordnungen, zum Ziele gelangen.

Bei der Induktionsheizung ist es ein transformierter Strom, der durch den Heizwiderstand geht. Sein primärer Strom hat hohe Spannung und entsprechend geringe Stärke; die Transformierung wie die Gesamtenergie muß unter Abrechnung der Transformierungsverluste durch Selbstinduktion und Streuung dem gegebenen Widerstand entsprechen.

Während für die Schmelzelektrolyse das Bad selbst als Erhitzungswiderstand dient, verwendet man in Fällen, wo das Erhitzungsgut den Strom nicht leitet oder dadurch nachteilig beeinflußt würde, die Erhitzung durch Wärmeleitung oder -strahlung. Für die Heizung eignet sich jede Stromart, doch nimmt man meist mehrphasigen Wechselstrom.

Elektrische Öfen.

(939) Arten der Öfen. Die elektrischen Öfen lassen sich systematisch in folgende Gruppen teilen:

A. Lichtbogenöfen.

- I. Indirekte Lichtbogenöfen (Strahlungsöfen). — Der Einsatz wird nur durch die strahlende Wärme des Lichtbogens geheizt, welcher also nicht zum Einsatz überspringt. Bekannteste Systeme: Stassano (Abb. 534), de Laval, Bonner Maschinenfabrik, Rennerfeldt. Hauptsächlich in der Metallindustrie verwendet (Elektrostahl, Zinkdestillation, Schmelzen von Schwermetallen und Legierungen).
- II. Direkte Lichtbogenöfen. Der Lichtbogen springt zu dem Einsatz direkt über.
 - a) Die Heizung erfolgt nur durch den Lichtbogen, der von allen Elektroden zum Einsatz überspringt. Bekannteste Systeme: Héroult (Abb. 535), ältere Keller-Öfen. — Hauptsächlich in der Elektrostahlindustrie verwendet.
 - b) Ein in der Regel metallischer Pol liegt im Ofenboden und ist direkt mit dem Einsatz in leitender Verbindung. Bekannteste Systeme: Girod (Abb. 536), neuerer Keller-Ofen. Hauptsächlich in der Elektrostahlindustrie verwendet.
 - c) Die Heizung erfolgt durch zwei Stromkreise, einerseits durch direkte Lichtbogenheizung wie Abb. 535, andererseits durch Widerstandsheizung mit

Bodenpolen, die mit Stampfmasse überdeckt sind. Diese wirkt bei höherer Temperatur als Leiter zweiter Klasse. — Bekanntestes System: Nathusius (Abb. 537). Hauptsächlich in der Elektrostahlindustrie verwendet.

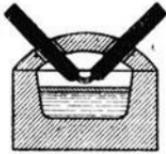


Abb. 534.
Nach Stassano,
indirekt

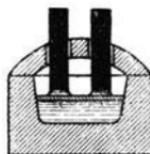


Abb. 535.
Nach Héroult,
direkt

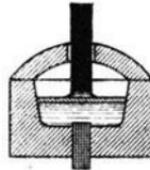


Abb. 536.
Nach Girod,
direkt

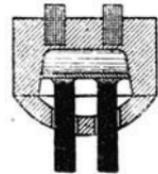


Abb. 537.
Nach Nathusius,
direkt

-  Kohlenelektrode
-  metallische Elektrode
-  feuerfester Körper
-  flüssige Schlacke
-  körniges Schmelzgut

Abb. 534 bis 537.
Lichtbogenöfen.

B. Direkte Widerstandsöfen.

I. Kanalöfen (Abb. 538). Herd in horizontaler, langgestreckter Form und Anschluß des Einsatzes an die Stromquelle durch entsprechende Kontaktkörper. Sowohl für flüssige als feste Leiter verwendet. Bekannteste Systeme: Taussig,

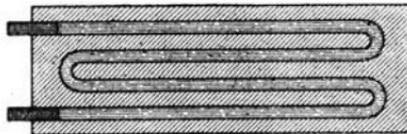


Abb. 538. Kanalöfen.
(Erklärung zur Darstellung s. bei Abb. 534.)

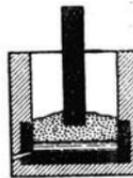
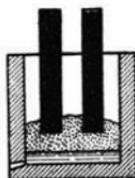


Abb. 539 und 540. Schacht- und Tiegelöfen.
(Erklärung zur Darstellung s. bei Abb. 534.)

de Laval, Gin, Acheson. Derartige Öfen werden heute hauptsächlich bei der Herstellung des künstlichen Graphits und des Karborundums verwendet, während sie sich für flüssige Leiter nicht bewährt haben.

II. Schacht- bzw. Tiegelöfen (Abb. 539/40). In der Hauptsache vertikale Ausbildung des Ofens.

- a) Ofenwand nicht leitend, also alle Pole getrennt vom Ofenschacht. Bekannteste Systeme: Grönwall, Helfenstein. Hauptsächlich bei der Herstellung von Elektro-roheisen und der elektrothermischen Zinkgewinnung verwendet.
- b) Teile der Ofenwand als ein Pol. Bekannteste Systeme: Héroult, Keller, Lorentzen. — Werden verwendet zur Herstellung von Elektro-roheisen, Ferrolegierungen, Karbiden, Siliziden usw.

C. Indirekte Widerstandsöfen. (Induktionsöfen.)

- I. Einrinnenöfen mit röhrenförmiger Primärspule (Schmelzrinne) System Kjellin (Abb. 541).
- II. Einrinnenöfen mit scheibenförmiger Primärspule System Frick (Abb. 542).
- III. Mehrrippenöfen mit zentralem Arbeitsherd System Röchling-Rodenhauser (Abb. 543).

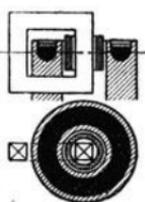


Abb. 541.
Einrinnenofen
nach Kjellin.

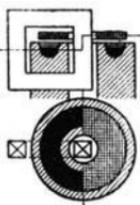


Abb. 542.
Einrinnenofen
nach Frick.

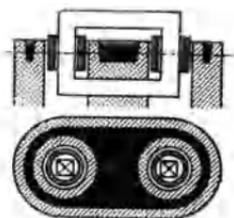


Abb. 543.
Mehrrippen-Induktionsofen
nach Röchling-Rodenhauser.

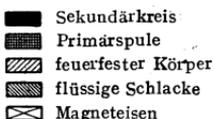


Abb. 541 bis 543.

Öfen mit indirekter Widerstandsheizung,
Induktionsöfen.

Sämtliche Bauarten von Induktionsöfen werden hauptsächlich in der Elektro-stahlindustrie, ferner zur Darstellung und zum Umschmelzen von Schwermetallen und Legierungen (Ferromangan, Bronze, Messing) verwendet.

Borchers, Entwicklung, Bau und Betrieb der elektrischen Öfen. 1897. Knapp. — Borchers, Elektrometallurgie. 1903. Hirzel. — Borchers, Die elektrischen Öfen. 1907. Knapp. — Escard, Les fours électriques et leurs applications industrielles. 1905. Dunod. — Georges, Elektrische Öfen. 1914. Göschen. — Lyon, Keeney & Cullen, The Electric Furnace in Metallurgical Work. 1914. Government Printing Office, Washington. — Millan, A Treatise on Electrometallurgy. 1910. Griffin & Co. — Moissan, Der elektrische Ofen. 1897. Krayn. — Neuburger, Handbuch der praktischen Elektrometallurgie. 1907. Oldenbourg. — Ponthière, Traité d'électrometallurgie. 1910. Gauthier-Villars. — Regelsberger, Elektrometallurgie. 1910. Göschen. — Stansfield, The Electric Furnace. 1914. Mc. Graw-Hill Book Co. — Wright, Electric Furnaces and their industrial Applications. 1904. Constable & Co.

(940) **Elektrodenmaterial.** Die Induktionsöfen arbeiten natürlich ohne Elektroden. — Bei den Lichtbogen- und Widerstandsöfen kann man nur in den seltensten Fällen Metalle als Elektrodenmaterial verwenden. — Bei einzelnen Elektrostahlöfen liegt ein — meistens mit Wasser gekühlter — Pol aus Stahl im Ofenfutter und ist entweder in direktem Kontakt mit dem flüssigen Einsatz oder mit einem in der Hitze leitend werdenden Leiter zweiter Klasse (Dolomit-Teer, Magnesit-Teer) überstampft.

Wo es irgend angeht, benutzt man die fabrikmäßig hergestellten Kohlenelektroden, die, da sie einerseits die Wärme sehr stark ableiten und sich dabei ihrer ganzen Länge nach sehr stark erhitzen, andererseits dem Abbrand unterworfen sind, bei großen Systemen in gekühlten Fassungen, die auch gleichzeitig der Stromzuleitung dienen können, gehalten oder geführt werden. Um abgebrannte Kohlen zu ergänzen und möglichst weit aufzubrechen, schraubt man sie häufig mittels der bei der Herstellung vorgesehenen Schrauben bzw. Innengewinde aneinander. Sehr wichtig ist ein guter und sicherer Kontakt; es existieren dafür zahlreiche Vorschläge. In neuester Zeit werden speziell bei Elektrostahlöfen mit direkter Lichtbogenheizung die — in der Regel graphitischen Elektroden in gasdicht schließende Mäntel eingekapselt, wodurch ein rascheres Einschmelzen und ein geringerer Elektrodenabbrand erzielt wird. (Bauarten: Fiat, Tagliarferri, Siemens & Halske u. a.).

(941) Stromart und Schaltung. Man verwendet in der Regel Wechselstrom, meistens Drehstrom und schaltet diesen in den an sich aus der Beleuchtungstechnik bekannten Weisen an die im Ofen verteilten Elektroden.

Gleichstrom wird für den elektrischen Ofenbetrieb nicht gerne genommen. Abgesehen von den Übelständen in rein elektrotechnischer Beziehung kann die Verwendung von Gleichstrom Störungen durch elektrolytische Vorgänge hervorrufen, da wir es bei den hohen Temperaturen nur mit leitenden Körpern, seien es metallische Leiter (Einsatz) oder Elektrolyte (Schlacken), oder Leiter zweiter Klasse (Zustellungsmaterialien) zu tun haben.

Man hat bei dem Betrieb elektrischer Öfen stets mit einer gewissen Phasenverschiebung zu rechnen. Bei Lichtbogenöfen mittlerer Fassung wird man bei 50 Perioden mit einem $\cos \varphi = 0,8$ meistens auskommen. — Bei Induktionsöfen größerer Fassung muß man zur Erreichung einer annehmbaren Phasenverschiebung mit der Periodenzahl heruntergehen, so daß dann die Aufstellung besonderer Periodenumformer erforderlich wird.

(942) Der Betrieb der elektrischen Öfen ist entweder kontinuierlich, d. h. das Produkt wird unter regelmäßiger Zufuhr der Beschickung seiner Bildung entsprechend abgestochen oder diskontinuierlich, d. h. jede Beschickung wird für sich fertig gemacht. Diese letztere Art wird hauptsächlich bei der Stahlraffination ausgeführt, wo es auf sehr genaue Überwachung des Prozesses ankommt; die hier gebrauchten Öfen sind auch, gleichgültig, ob Elektroden- oder Induktionsöfen, kippbar (Abb. 544) eingerichtet, um das Schmelzgut nach Beendigung des Raffinationsprozesses in Tiegel oder Formen ausgießen zu können. Bei Reduktionsprozessen sowie Karbidherstellung mit Widerstands- oder Lichtbogenheizung hat man neben Abstich auch Blockbildung, zu welchem Zweck der Ofenherd senkbar und auf Wagen fahrbar angebracht ist, um nach Ansammlung einer genügenden Menge des Produktes den etwas abgekühlten Ofen leicht auseinandernehmen und das auf dem Herd in Form eines Blocks liegende Produkt entfernen zu können. Mit Blockbildung arbeitet man auch bei der Graphit- und Karborundumfabrikation.

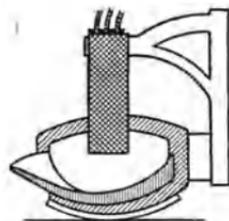


Abb. 544. Héroults kippbarer Elektrostahlöfen.

Anwendungen der elektrischen Öfen in der chemischen und metallurgischen Industrie.

(943) Allgemeines. Die elektrische Erhitzung läßt sich an Stelle jeder andern Erhitzungsart gebrauchen; sie bietet beträchtliche Vorteile durch das Wegfallen der sonst häufig unvermeidlichen Verunreinigungen durch das Brennmaterial, durch die einfachere Ofenanlage, durch Erzielung höchster Temperaturen in Verbindung mit der Lokalisierung der Erhitzung und anderes.

Deren wichtigste Anwendungen auf die Erzeugungen von Metall, Metalloiden sowie von chemischen Produkten — abgesehen von den schon besprochenen schmelzelektrolytischen Produkten — sollen in nachstehendem kurz besprochen werden.

(944) Karbide. Dies sind Verbindungen der Metalle mit Kohlenstoff; sie sind fast von jedem Metall bekannt und entstehen leicht, wenn Metalle oder ihre oxydischen Verbindungen bei hoher Hitze mit Kohle zusammentreffen. Es haben jedoch nur das Kalziumkarbid und das Siliziumkarbid größere technische und wirtschaftliche Bedeutung erlangt.

Kalziumkarbid, CaC_2 , wird erhalten durch Erhitzen eines Gemisches von grobkörnigem Kalk mit grobkörnigem Koks im Verhältnis von 100 : 70—90 im elektrischen Lichtbogen- oder Widerstandsofen, der wegen der starken Verstäubung von Kalk und Kohle zweckmäßig mit Deckel und Gasabzug versehen ist. Über die Betriebsweise (942). Man rechnet für 1 kW und 24 Stunden eine Produktion von 6 kg Karbid von durchschnittlich 300 l Azetylgaslieferung auf 1 kg (0° und 760 mm Barometerstand).

Beim Überleiten von Stickstoff über elektrisch erhitztes Karbid nimmt dieses Stickstoff auf unter Bildung von Kalziumcyanamid, CaCN_2 , das ein wertvolles Düngemittel ist, aber auch dadurch, daß es mit Wasserdampf in Ammoniak übergeht, Wichtigkeit besitzt.

Siliziumkarbid (Karbörundum, Siloxikon, Silundum) entsteht bei elektrischer Erhitzung von Kieselsäure (Quarz) mit Kohle, entspricht in reinem Zustand der Formel SiC , enthält aber wechselnde Mengen von Silizium, Kohlenstoff und Sauerstoff, je nach den Mischungsverhältnissen und der angewendeten Temperatur. Verfahren und Ofen sind im Prinzip von Acheson angegeben. Wegen seiner Härte ist es geschätzt als Schleifmittel, wegen seiner Feuerbeständigkeit und chemischen Widerstandsfähigkeit zur Bekleidung von Elektroden und Auskleidung von Retorten und Öfen für starke Erhitzung.

Nimmt man entsprechend weniger Kohlenstoff auf die angewandte Menge Kieselerde, so kann man auch Silizium, jedoch nicht kohlenstoffrei, erhalten. Bei Zusatz von Metalloxyden und der für deren Reduktion erforderlichen Menge Kohle entstehen deren Silizide, von denen hauptsächlich das Ferrosilizium ausgedehnte Verwendung findet.

Hönigschmid, Karbide und Silizide (Bd. 45 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie).

(945) Eisen und Stahl. Der elektrische Ofen wird in immer größerem Umfange in der Eisenindustrie, sei es zum Erschmelzen von Elektroheisen, sei es im Stahlwerk verwendet.

Eine elektrische Roheisendarstellung ist wirtschaftlich nur in jenen Ländern durchführbar, in welchen man über billige Kraft verfügt und der Koks teuer ist.

Man muß nach den neuesten Ergebnissen schwedischer Öfen mit einem Verbrauch von rund 2000 kWh, 300 kg Koks und 5 kg Elektroden auf die Tonne Elektroheisen rechnen.

Die elektrischen Hochöfen lassen sich unterscheiden in

a) Hochschächtofen, welche dem rein thermischen Hochofen nachgebildet sind (Bauart Grönwall),

b) Niederschächtofen, welche mehr elektrisch geheizten, den Karbidöfen nahestehenden, Tiegelöfen entsprechen (Bauarten Helfenstein, Lorentzen).

Die Verwendung des elektrischen Ofens in der Stahlindustrie schwankt in weiten Grenzen je nachdem, welchen Teil der Arbeiten man dem elektrischen Ofen überträgt und welchen Teil man den rein thermischen Einrichtungen (der Birne, dem Siemens-Martinofen) überläßt, bzw. ob man nur den Tiegelprozeß ersetzen will.

Die wichtigsten Operationen, zu welchen der elektrische Ofen im Stahlwerk herangezogen werden kann, sind die folgenden:

1. Das Einschmelzen von Schrott, Roheisen oder anderem kalten Einsatz.

2. Die Oxydationsperiode, in der alle jene Verunreinigungen aus dem flüssigen Schmelzgut entfernt werden, die durch Oxydation beseitigt werden können. Dazu ist auch das Herausfrischen des Kohlenstoffs und vor allem die Oxydation des besonders gefürchteten Phosphors zu rechnen.

3. Die Desoxydationsperiode, in welcher es sich darum handelt, die während der Oxydationsperiode vom Eisen aufgenommenen Oxyde und auch den Schwefel zu entfernen.

4. Das Fertigmachen des Stahles, also die Aufkohlung zur Erreichung des gewünschten Kohlenstoffgehaltes sowie der event. Zusatz von Legierungsmetallen.

Je nachdem, ob der elektrische Ofen diese Operationen ganz oder nur teilweise durchzuführen hat, kann man folgende mittlere Kraftverbrauchszahlen annehmen.

Annähernder Kraftverbrauch beim elektrischen Stahlschmelzen.

Vorgänge im Elektroofen		kWh/t
Stahl aus kaltem Roheisen allein		1500
Stahl aus flüssigem Roheisen allein		1100
Stahl aus kaltem Schrott allein		900
Stahl aus kaltem Roheisen und kaltem Schrott		700
Stahl aus flüssigem Roheisen und kaltem Schrott		600
Nachreinigung von flüssigem Flußeisen	Auf hochwertigem Stahl mit weitgehender chemischer Reinigung (Tiegelstahlqualität)	250
	Auf bessere Siemens-Martinqualität	120

Elektrostahlöfen werden schon bis zu 30 t Einsatz gebaut, doch geht man in der Regel wegen der anzustrebenden Gleichmäßigkeit des Materials nicht über 12—15 t Einsatz hinaus.

An Ofensystemen verwendet die Elektrostahlindustrie sowohl Strahlungs-, als direkte Lichtbogenöfen mit und ohne zusätzliche Bodenheizung und endlich Induktionsöfen. Letztere haben insbesondere in den eigentlichen Edelfabrikanten Eingang gefunden.

Bonini, I processi termoelettrici della siderurgia moderna. 1914. Hoepli. — Eichhoff, Die elektrische Erzeugung von Stahl und Eisen. 1914. Hansa-Druckerei. — Engelhardt, Elektrische Induktionsöfen und ihre Anwendung in der Eisen- und Stahlindustrie. 1907. Springer. — Guarini, L'Etat actuel de l'Electrometallurgie du Fer et de l'Acier. 1905. Dunot. — Haanel, Kanadischer Regierungsbericht über die in Europa benutzten Ofen und Verfahren. 1904. Ottawa, Department of the Interior. — Haanel, Kanadischer Regierungsbericht über Elektroroheisenversuche in Sault St. Marie 1907. Ottawa, Department of the Interior. — Keller, Contribution à l'étude des Fours électriques, appliqués à la Fabrication des Fers et des Aciers. 1909. Imprimerie générale. — Kershaw, The Electric Furnace in Iron and Steel Production. 1907. Printing and Publishing Co. — Kershaw, Electro-thermal Methods of Iron and Steel Production. 1913. Constable & Co. — Leffler & Odelberg, Bericht des schwedischen Jernkontorets über elektrisches Roheisenschmelzen. 1911. Norstedt & Söner. — Leffler & Nyström, Fortsetzung hiervon. 1912. Norstedt & Söner. — Maignon, L'Electrometallurgie des Fontes, Fers et Aciers. 1906. Dunot & Pinot. — Meyer, Geschichte des Elektroeisens. 1914. Springer. — Neumann, Elektrometallurgie des Eisens (Bd. 26 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie) 1907. — Neumann, Die technische Gewinnung von Eisen und Stahl im elektrischen Ofen. 1910. Vieweg. — Norwegisches Komite, Elektrisches Eisen- und Stahlschmelzen. 1911. Aschehong & Co. — Puccinelli, I Forni Elettrici nella Siderurgia. 1913. Avalle. — Rodenhäuser & Schönawa, Elektrische Öfen in der Eisenindustrie. 1911. Leiner. — Ruß, Die Elektrostahlöfen. 1918. Springer.

Ferrolegerungen. Diese werden heute zum großen Teil im elektrischen Ofen dargestellt, bzw. in diesem umgeschmolzen, um sie im schmelzflüssigen Zu-

stande (für Desoxydationszwecke) zuzusetzen, was technische und wirtschaftliche Vorteile bietet. Wichtige Desoxydationsmittel sind das Ferrosilizium und das Ferromangan. Eine Reihe sonstiger Ferrolegierungen werden ferner in der Stahlindustrie verwendet, um dem Stahl gewisse chemische oder mechanische Eigenschaften zu erteilen, also bei der Herstellung der Edelmehle. Die wichtigsten bezüglichen Legierungen sind die des Eisens mit Chrom, Wolfram, Nickel, Molybdän, Vanadium und Titan.

Die wichtigsten Ferrolegierungen.

Legierung	Gehalt		Herstellungsweise	Kraftverbrauch auf 1 t Legierung	Legierung	Gehalt		Herstellungsweise	Kraftverbrauch auf 1 t Legierung
	an	%				an	%		
Ferromangan	Mn	30 bis 80	Reduktion von Mn-Erzen im Hochofen, seltener im elektr. Ofen	5500 bis 8500 kWh	Ferro-nickel	Ni	—	Zusammenschmelzen von Eisen u. Nickel oder durch Reduktion im elektr. Ofen	11000 bis 15000 kWh
		60 bis 70							
Ferromolybdän	W	70 bis 85	Reduktion von Wolframit od. Scheelit im elektr. Ofen	6000 bis 7000 kWh	Ferro-molybdän	Mo	50 bis 85	Reduktion von Molybdänit im elektr. Ofen	6600 bis 13000 kWh
		50 bis 95							

Helfenstein, Der elektrische Ofen, mit besonderer Berücksichtigung der technischen Ferrosiliziumerzeugung. 1910. Vieweg. — Pick & Conrad, Die Herstellung von hochprozentigem Ferrosilizium im elektrischen Ofen. 1909. Halle. — Rodenhäuser, Ferromangan als Desoxydationsmittel. 1915. Leiner. — Pinoff, Die Herstellung der Ferrolegierungen im elektrischen Ofen. 1922. Heidelberg. Selbstverlag.

(946) **Zink.** In der Elektrometallurgie des Zinks wird der elektrische Ofen nach zweierlei Richtung angewendet. Einerseits als Widerstandsofen zur direkten Reduktion von Zinkerzen, wobei ein mehr oder weniger verunreinigtes Rohzink gewonnen wird (Kraftverbrauch etwa 8000 kWh/t), andererseits als Strahlungsofen, in welchem Rohzink zu Feinzink umdestilliert wird (1000—2000 kWh/t).

Askenasy, Die elektrothermische Zinkgewinnung. 1910. Vieweg.

(947) **Kupfer.** In der direkten Reduktion des Kupfers aus den Erzen, welche technisch ohne weiteres möglich ist, hat der elektrische Ofen bisher nicht Fuß fassen können, hauptsächlich wegen des hohen Kraftverbrauches (5—20000 kWh auf die Tonne Kupfer, je nach dem Gehalt des Erzes). Hingegen wird der elektrische Ofen immer mehr zur Darstellung und zum Umschmelzen von Kupferlegierungen (Bronze, Messing) herangezogen. Hierbei hat der Induktionsofen entschiedene Vorteile (geringerer Abbrand). 300—450 kWh sind zum Umschmelzen einer Tonne Messing im Induktionsofen erforderlich, je nachdem ob man gutes, stückiges oder verunreinigtes, leichtes Rohmaterial (Spähne, Patronenhülsen) einschmilzt. Als Lichtbogenöfen werden speziell die Strahlungsofen verwendet und zwar meistens in

besonderen Ausführungen, bei welchen der Lichtbogen in einem schaukelnden oder langsam rotierenden trommelförmigen Ofenkörper brennt (Bauarten: Detroit, Humboldt, Weeks, Booth, Ruß, Rheinmetall, Siemens & Halske u.a.). Ruß: Die Elektrometallöfen. 1922, Oldenbourg.

(948) Sonstige Metalle und Verschiedenes. In der Elektrometallurgie des Nickels, Bleis, Antimons, Zinns, Goldes und anderer Metalle ist der elektrische Ofen nur vereinzelt und meistens nur versuchsweise zur Anwendung gekommen.

Er wird auch zur Herstellung von Phosphor, Schwefel-Kohlenstoff, Natriumsulfid, Bariumoxyd usw. benutzt, doch handelt es sich auch hier nur um vereinzelt ausgeführungen.

V. Wirkungen elektrischer Entladungen.

(949) Arten der Entladung. Man unterscheidet die stille elektrische Entladung und die Funken- und Flammbogenentladung. Wenn es sich auch bei deren Verwendung um Reaktionen mit innerem Wärmeverbrauch (endothermische Reaktionen) handelt, die sich entweder zwischen gasförmigen oder doch während der Reaktion vergasteten Stoffen abspielen, so sind sie doch — abgesehen von inneren Verschiedenheiten — in ihrer Wirkungsweise und mithin auch in ihrer Technik dadurch verschieden, daß die Reaktionen in stiller elektrischer Entladung infolge der großen Verdünnung und des verhältnismäßig geringen Energieverbrauchs auf die Flächeneinheit im Gegensatz zu den Flammbogenreaktionen sich leichter auf der Umgebungstemperatur erhalten lassen. Da aber bei beiden neben der thermischen Wirkung offenbar noch andere Umstände, z. B. Ionisierungserscheinungen, eine Rolle spielen, Bedingungen, die auch bei der Konstruktion der Apparate zu berücksichtigen sind, so wird dieses Gebiet elektrothermischer Reaktionen, das man auch unter dem Namen der Gasreaktionen zusammenfaßt, zweckmäßig getrennt von den anderen elektrothermischen Prozessen behandelt.

(950) Die stille elektrische Entladung, ein fortwährendes Übergehen von Elektrizität zwischen Leitern (Belegungen), welche durch einen Gasraum und eine dielektrische Schicht oder zwei dielektrische Schichten (Glas, Glimmer) getrennt sind, vermag elementare Gase zu vereinigen und gasförmige Verbindungen zu trennen. Auch eine Reihe interessanter organischer Synthesen sind damit ausgeführt worden. Die wichtigste Anwendung ist die der Darstellung von Ozon aus dem Sauerstoff der Luft.

Man arbeitet dabei mit hohen Spannungen (sekundäre Ströme) und entweder mit unterbrochenem Gleichstrom oder mit Wechselstrom. Von der großen Anzahl Ozonapparate hat der von Siemens & Halske wohl die meiste Anwendung gefunden.

Deren neuester Apparat, s. Abb. 545, wie er vorzugsweise für Bereitung des Ozons zur Wasserreinigung dient, besteht aus einem die eine Elektrode bildenden Aluminiumzylinder (Al), welcher in einem Abstand von wenigen Millimetern von einem Glasrohr (Gl) umgeben ist. Das letztere ist in einem mit Wasser (W), das die andere Elektrode bildet, gefüllten Eisenkasten flüssigkeitsdicht eingesetzt; zwischen Glaszylinder und Aluminiumrohr strömt die Luft (L) durch, deren Sauerstoffgehalt unter der Einwirkung der von einem hochgespannten Strom (8500 V) ausgelösten dunklen (bläuliches Licht) elektrischen Entladung zu einem hohen

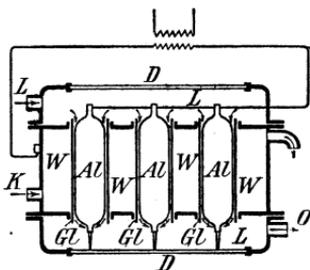


Abb. 545.

Siemens & Halske, Ozonapparat.

Grade in Ozon (O) verwandelt wird. Je 6—8 solcher Glasrohre sind in einem Apparate und diese wieder zu mehreren in einem System sowohl für den Strom wie für die Luft parallel geschaltet. (D ist ein Glasdeckel, K bedeutet Kühlwasser.)

Weiterhin sind Ozon-Apparate ausgeführt von T i n d a l, der ohne Dielektrikum, aber mit vorgeschaltetem Glycerinalkohol-Widerstand zur Vermeidung von Funken arbeitet, von A b r a h a m und M a r m i e r, die große metallisch belegte Glasplatten verwenden, von O t t o, der in einem Metallkasten isoliert auf einer Welle dünne Aluminiumscheiben rotieren läßt.

Man bedient sich der ozonbildenden Wirkung der dunklen Entladungen zur Wasserreinigung im großen, hat aber auch geeignete Apparate für den Kleinbedarf geschaffen (unter anderen die F e l t e n & G u i l l e a u m e - L a h m e y e r - W e r k e), welche leicht an die Pumpe oder Wasserleitung angeschlossen werden können und im letzteren Falle so eingerichtet sind, daß die Ozonisation mit dem Öffnen des Wasserhahns in Tätigkeit tritt und so lange und in dem Verhältnis arbeitet, als Wasser entnommen wird.

Das Ozon findet, außer zur Sterilisation von Trinkwasser, noch eine ganze Reihe industrieller und gewerblicher Anwendungen. Lüftung, Waschbleiche, Fleischkonservierung, Altern von Spirituosen und Holz, Synthese von Vanillin usw.)

F o x, Ozone and Antozone. 1873. London. — E n g l e r, Historisch-kritische Studien über das Ozon. 1879. Engelmann. — F r ö l i c h, Über das Ozon, dessen Herstellung und Anwendungen. 1891. Springer. — D e l a C o u x, L'Ozone et ses applications industrielles. 1910. Dunot & Pinot. — V o s m a e r, Ozone, its manufacture, properties and uses. 1916. Constable & Co. — F o n r o b e r t, Das Ozon. 1916. Enke.

(951) Funkenentladungen und Flammenbogen (Hochspannungsbogen). Hier finden die Reaktionen infolge der auf einen kleinen Raum konzentrierten großen Energiemengen bei sehr hoher Temperatur statt. Die in den Lichtbogen eingeführten Gasteilchen erleiden durch die plötzliche Temperatursteigerung eine ebenso plötzliche Drucksteigerung, die auch für die Reaktion wieder von Bedeutung wird. Außerdem aber wird durch die Temperatursteigerung der Gleichgewichtszustand der in Reaktion tretenden Stoffe steigend im Sinne der Bildung der endothermischen Verbindung geändert, so daß diese bei der hohen Temperatur des Bogens sich im beträchtlichen Maße in dem Gemenge anhäuft. Nun verläuft aber die Kurve des Gleichgewichtszustandes bei Temperaturabnahme bis zu einem gewissen, für jede Verbindung verschiedenen Temperaturpunkt in gleicher Weise umgekehrt. Es würde deshalb die durch die Entladung entstandene Verbindung überhaupt nur in der diesem Punkt entsprechenden Menge, unter Umständen also überhaupt nicht, gewonnen werden können, wenn nicht diese Gleichgewichtsänderungen, da sie auf Reaktionsgeschwindigkeiten beruhen, von der Zeit, innerhalb deren die Temperaturabnahme verläuft, abhängig wären. Für die technisch wichtigste der so endothermisch zu gewinnenden Verbindungen, das aus Luft erhaltliche Stickoxyd, hat es sich nun herausgestellt, daß die Reaktionsgeschwindigkeit, welche bei etwa 4000° unmeßbar groß ist, je weiter nach unten um so geringer und bei etwa 600° Null wird, bei welcher Temperatur also weder eine Bildung noch eine Zersetzung von Stickoxyd stattfindet. Für den Techniker ergibt sich hieraus die wichtigste Regel, das Reaktionsgemisch so rasch als möglich von seiner Bildungstemperatur auf seine Beständigkeitstemperatur abzukühlen, was man als Arbeiten im heißkalten Raum zu bezeichnen pfllegt.

Mit Funkenentladung wurde anfangs viel gearbeitet; insbesondere hatte ein Apparat der A t m o s p h e r i c P r o d u c t s C o. an den Niagarafällen, die aus 2 konzentrischen Zylindern bestand, die mit vielen im Ringraum radial zueinander im Kreise gestellten und so vielfach übereinander angeordneten Platinspitzen besetzt waren, und deren innerer rotierte, wodurch ein ständiges Abreißen und Bilden von Stromübergängen in Funkenform eintrat, mit guten Ergebnissen hinsichtlich der Konzentration des erhaltenen Stickoxyd-Luftgemenges gearbeitet, erwies sich aber im Vergleich zur Gesamtausbeute als zu kompliziert und unwirtschaftlich, besonders nachdem zunächst B i r k e l a n d und E y d e gelehrt hatten, den Flam-

menbogen künstlich auszubreiten und so weitaus bedeutendere Energiemengen auf verhältnismäßig kleinerem Raum zu verwenden und gleichzeitig größere Luftmengen durchzusetzen.

Zu diesem Zwecke werden von Birkeland und Eyde mitten durch die Breitseiten eines hohen, sehr schmalen Ofens aus feuerfestem Tone zwei große kräftige Elektromagnetpole geführt, die den durch gekühlte, auf der Schmalseite senkrecht zu ihnen in das Ofeninnere ragende Elektroden gebildeten Lichtbogen zu einer Scheibe von etwa 1,5 m Durchmesser auseinanderziehen, während gleichzeitig durch die Wandung in den schmalen Ofenraum Luft hineingepreßt wird. Die entstehenden Stickoxydverbindungen werden abgeleitet und geben bei der darauffolgenden Abkühlung mit dem überschüssigen Luftsauerstoff Stickstofftetroxyd (NO_2), das in Rieseltürmen z. T. in Salpetersäure übergeführt wird, während die entweichenden Gase von Kalkmilch oder Alkalilaugen absorbiert werden und damit zunächst Nitrate und Nitrite bilden. Ein einziger Ofen kann bis zu 500 kW aufnehmen und gibt in 24 Stunden etwa 1300 kg Salpetersäure (als HNO_3 berechnet). Dabei ist die Bedienung sehr einfach, da es sich nur um die Beaufsichtigung und Regelung des Stromes und Luftzufuhr handelt; 4 Arbeiter kann daher 3 Öfen bedienen.

Nach anderen Konstruktionen läßt man den Lichtbogen im Kreise oder in einer Schraube u. a. rotieren oder bläst ihn mittels der zu behandelnden Gase selbst zwischen Hörerelektroden aus, wobei Vorkehrungen getroffen sind, daß er sich sofort wieder unten an den engsten Stellen der Elektroden entzündet.

Ganz abweichend hiervon ist das Verfahren der Badischen Anilin- und Sodafabrik (Schönherr), welches sich durch seine große Einfachheit, vor allem Vermeidung besonderer Magnete zur Verbreiterung des Lichtbogens auszeichnet. Es werden nämlich in langen eisernen Röhren dauernde Lichtbogen von großem Energieinhalt mittels je oben und unten (isoliert) eingesteckter Elektroden unter gleichzeitigem Durchstreichen von Luft, die den dicken Lichtbogenkern mantelförmig umhüllt, erzeugt.

Die neuen Lichtbogenverfahren arbeiten mit Stromstärken von 50—300 A bei 3000—5000 V und Luft von etwa Atmosphärendruck. Die den Lichtbogen verlassende Luft hat zwischen $1\frac{1}{2}$ und 3 Vol.-Proz. NO .

Donath & Frenzel, Die technische Ausnutzung des atmosphärischen Stickstoffs. 1907.

Außer der Salpeter- und Salpetersäureerzeugung hat man die Funkenentladung auch zum Altern und Veredeln des Weins und alkoholischer Flüssigkeiten überhaupt, zum Bleichen und Sterilisieren von Mehl, zur Reinigung von Filterkohle und anderem vorgeschlagen.

(952) Elektrokultur. Wenn auch die Art der Einwirkung der Elektrizität auf die Beförderung des Pflanzenwachstums noch nicht geklärt ist, so mag sie hier doch ihre Stätte finden, da sie sich vorzüglich in Form der Bestrahlung wirksam zeigt, wenn gleich auch das verschiedene Verhalten der Pflanzen, je nachdem sie mit dem positiven (anscheinend günstiger, vielleicht durch elektrosmotischen Wassertransport (?)) oder negativen Pol in Berührung kommen, auf eine elektrolytische, verbunden mit elektrosmotischer Wirkung hindeutet.

Das Gebiet ist über das Versuchsstadium noch nicht hinausgekommen.

VI. Elektroendosmose.

(953) Allgemeines. Die elektrosmotische oder k a t a p h o r e t i s c h e Wirkung beruht auf der Eigenschaft fein verteilter, fester oder kolloider Stoffe, die in einer leitenden Flüssigkeit suspendiert bzw. kolloidal gelöst sind, unter der Ein-

wirkung einer genügend großen, in einer Richtung wirkenden Potentialdifferenz dem einen Pole zuzuwandern und sich dort anzuhäufen, während die Flüssigkeitsteilchen nach dem anderen Pole hin abgestoßen werden; diese Wanderung der Flüssigkeit läßt sich auch bei festen (porösen) Diaphragmen beobachten, welche ähnlich wie fein verteilte suspendierte Stoffe wirken, und bei denen sich dann zu beiden Seiten ein der Potentialdifferenz proportionaler Niveauunterschied ergibt. Die Richtung, in der die Flüssigkeitsteilchen bzw. die losen festen Stoffe wandern, hängt ab von der Natur beider. Bei wässriger Flüssigkeit wandert diese meist in der Richtung des positiven Stromes (zur Kathode), die suspendierten Stoffe dagegen gehen an die Anode; in *sauerer* Lösung wandern viele Kolloide nach der Kathode, in *alkalischer* nach der Anode.

Die kataphoretische Wirkung hängt nicht ab von dem Faradayschen Gesetze; die diesem entsprechenden elektrolytischen Wirkungen gehen vielmehr nebenher, doch beträgt die auf die Elektrolyse entfallende Energie wegen der meist hohen für die Elektromose erforderlichen Spannung nur einen geringen Bruchteil der Gesamtenergie. Um elektrosmotische Wirkungen rein durchzuführen, sind hohe Spannungen erforderlich und daher gut leitende Lösungen sowie etwa der Zusatz von Leitsalzen zu vermeiden.

Für den durch Elektromose hervorgerufenen Niveauunterschied H zwischen den beiden Seiten eines porösen Diaphragmas gilt die Gleichung

$$H = K \cdot \frac{I \cdot \rho \cdot d}{q} = K \cdot E,$$

wo ρ der spezifische Widerstand der Lösung, E der Spannungsabfall zwischen den beiden Seiten des Diaphragmas, d die Dicke und q der Querschnitt des Diaphragmas ist. S. Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik, IV. Bd. 1, 1909, S. 615 u. f.

Die Elektromose hat große Bedeutung für die Lebenserscheinungen tierischer und pflanzlicher Organismen. Sie hat ferner Anwendung in verschiedenen technischen Gebieten gefunden.

(954) Anwendungen. Die Anwendungen der Elektromose betreffen teils Hilfsverfahren (Zusatz von Kolloiden bei der elektrolytischen Raffination von Blei, Silber, Bronze), teils selbständige Gebiete. — Letztere hat besonders die *Elektromose* (Graf Schwerin) A.-G. ausgebildet. Die wichtigsten Anwendungsgebiete sind: Entwässerung breiiger Stoffe (Ton, Alizarinpaste, Torf, Seeschlick), Auslaugung von Rübenschneitzeln, Reinigung von Zuckerlösungen, Konzentration von Kolloidlösungen, Entfernung schädlicher Bestandteile aus Serum, Reinigung von Fasermaterial, Entölung von Kondenswasser usw. Auch die verschiedenen, sogenannten elektrischen Schnellgerbeverfahren, welchen insbesondere während des Weltkrieges erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt wurde, sind im wesentlichen auf kataphoretischen Vorgängen begründet.

Galvanotechnik.

(955) Allgemeines. Stromquellen. Als Stromquellen kommen Dynamomaschinen, Akkumulatoren, galvanische Elemente und Thermosäulen in Betracht. Je nach der erforderlichen Spannung und Stromstärke werden die Akkumulatoren oder galvanischen Elemente hintereinander oder nebeneinander geschaltet.

Schaltung der Bäder. Auch die Bäder können sowohl hintereinander als auch nebeneinander geschaltet werden. Bei gleichem Stromstärkebedarf schaltet man die Bäder hintereinander, bei gleichem Spannungsbedarf nebeneinander.

Regulierung des Stromes. Den Stromregulatoren (Drahtwiderständen, Rheostaten) fällt die Aufgabe zu, die Stromspannung in einem Stromkreis zu regulieren. Die Regulatoren können, je nach dem Zwecke, dem sie zu dienen haben,

entweder nach dem Schema der Hintereinander- oder dem der Parallelschaltung in den Stromkreis eingeführt werden. Bei der Hintereinanderschaltung vermindert der Widerstand die Spannung, da er dem Bade vorgeschaltet wird. Bei der Parallelschaltung wird eine bestimmte dem Widerstande entsprechende Stromstärke durch ihn fließen, während ein Zweigstrom in das Bad eintritt.

Zur Beurteilung von Stromstärke und Stromspannung benutzt man Strommesser (Amperemeter) und Spannungsmesser (Voltmeter). Der erstere wird in die Hauptleitung eingeschaltet, der letztere in eine Zweigleitung (197, 198).

Erzielung brauchbarer Metallniederschläge. Neben der genauen Regulierung des Stromes müssen sich Anoden und Waren an allen Stellen in gleicher Entfernung befinden. Gegenstände mit starken Profilierungen und Unterschneldungen entfernt man möglichst weit von den Anoden und arbeitet gleichzeitig mit Handanoden. Es ist ferner eine Bewegung des Elektrolyten, unter Umständen auch der Waren im Auge zu behalten. Für viele Zwecke, besonders die Erzielung starker galvanischer Niederschläge, ist die Erwärmung des Elektrolyten nötig.

Galvanostegie.

(956) Vorbehandlung der Gegenstände. Bevor die Gegenstände mit einem galvanischen Überzuge versehen werden können, müssen sie fettfrei und frei von Oxydschichten sein. Die Behandlung ist teils eine mechanische, teils chemische, teils kombinierte. Bei Versilberungen und Vergoldungen hat der Reinigungsarbeit eine Verquickung zu folgen, bevor der Elektroplattierprozeß begonnen werden kann.

(957) Versilberung. Anoden aus Silber. — Zimmertemperatur. Die Bäder bestehen in der Regel aus Lösungen von Cyansilber und Cyankalium von verschiedenem Gehalt, je nachdem es sich um leichte oder starke Versilberung handelt. Badspannung 1,2—0,9 V, Stromdichte 0,3 A/dm². Kupfer und dessen Legierungen werden nach erfolgter Verquickung direkt versilbert, Gegenstände aus sonstigen Metallen in der Regel vorher verkupfert oder vermessingt.

Aus alten Bädern kann das Silber durch Fällung mit Eisen oder Zink wiedergewonnen werden.

(958) Vergoldung. Anoden löslich (Gold) oder aus Ersparnisgründen unlöslich (Platin, Kohle). Zimmertemperatur oder 50—60°. — In der Regel cyanalkalische Bäder, die entweder auf elektrolytischem Wege aus Goldanoden oder durch Lösen von Knallgold in Cyankalium hergestellt werden. Man arbeitet je nach der Badtemperatur mit 1,0—1,2 V bei Goldanoden und Stromdichten 0,1—0,07 A/dm².

Silber, Kupfer, Nickel und deren Legierungen vergoldet man direkt, die übrigen Metalle nach vorheriger Verkupferung oder Vermessingung.

Das Gold aus alten Bädern kann durch Fällung mit Zinkstaub wiedergewonnen werden.

(959) Verkupferung. Anoden Elektrolytkupferplatten oder ausgeglühtes, nicht zu dünnes Kupferblech. Man verkupfert entweder bei Zimmertemperatur oder in der Kälte. — Die Bäder sind in der Regel cyanalkalisch und enthalten das Kupfer als essigsaureres Kupfer unter Beifügung von saurem, schwefligsaurem Natrium zugesetzt. Badspannung etwa 3 V bei 0,3—0,4 A/dm². — Die Wiedergewinnung des Kupfers aus aufgebrauchten Bädern lohnt in der Regel nicht.

(960) Vermessingung. Anoden nicht zu dünnes, ausgeglühtes und wieder blank gemachtes Messingblech. — Zimmertemperatur. Ebenfalls cyanalkalische Bäder, die man entweder aus den Sulfaten der Metalle und Cyankalium oder direkt aus den Zink- bzw. Kupferkaliumdoppelcyaniden unter Zusatz von Cyankalium herstellt. Man gibt dann noch Zusätze verschiedener Alkalisalze, wie saurer Sulfite, Sulfate, Karbonate usw. Badspannung etwa 3 V bei 0,3 A/dm². — Die Anodenfläche soll größer als die Warenfläche sein.

(961) Vernickelung. Anoden aus gewalzten oder gegossenen Nickelplatten. — Zimmertemperatur oder in der Wärme (70—80°). Zur Herstellung der Nickelläder verwendet man in der Regel Nickelsulfat oder Nickelammoniumsulfat, mitunter auch Chlornickel oder äthylschwefelsaures Nickel unter Zusatz verschiedener Alkalisalze; wie Salmiak, zitronensaures Natrium, Natrium- oder Magnesiumsulfat. Bei einzelnen Bädern wird auch Borsäure zugesetzt. Je nach der Badzusammensetzung und dem Metall, welches vernickelt wird, wird die Anodenfläche größer oder kleiner als die Warenfläche genommen. — Bei kalten Bädern hat man 2—3 V bei Stromdichten von 0,3—0,5 A/dm², bei warmen Bädern von 1,3 V bei 2 bis 2,5 A/dm².

(962) Verkobaltung. Anoden aus gegossenen oder gewalzten Kobaltplatten. Das Bad besteht aus Kobaltammoniumsulfat und Borsäure. Spannung 2,75 V bei 0,4 A/dm².

(963) Verstählung. Anoden aus Stahlblech. — Die Verstählung wird meistens bei höherer Temperatur durchgeführt.

Als Elektrolyt verwendet man meistens Eisenchlorid mit oder ohne Zusatz sehr hygroskopischer Chloride, wie z. B. Chlorkalzium. — Je nach der Temperatur und den zugesetzten Leitsalzen kann man Stromdichten bis zu 20 A/dm² erreichen.

(964) Verzinkung. Zinkanoden von möglichst großer Oberfläche. Bei flachen Gegenständen 18—20°, bei stark profilierten 40—45°. — Für Herstellung der Bäder verwendet man meistens Zinkvitriol und setzt in der Regel Ammonsalze (Sulfat, Citrat, Chlorid) zu. — Je nach der Badzusammensetzung und Temperatur 0,75—3,5 V bei 0,3—4,3 A/dm².

(965) Verzinnung. Anoden gegossene Zinkplatten. Anwendung kalt oder in der Wärme. Die Bäder werden in der Regel aus Zinnchlorid unter Verwendung verschiedener Zusätze (Natriumpyrophosphat, Cyankalium, Alkalikarbonate, Ätzalkalien) hergestellt. 0,8—1,25 V bei 0,25—1 A/dm².

(966) Verbleiung. Anoden gegossene oder gewalzte Bleiplatten. — In neuerer Zeit verwendet man meistens kieselfluorwasserstoffsäure Bleibäder.

(967) Verplatinierung. Anoden aus Platinblech. Anwendung in der Wärme. Die Bäder werden meistens aus Alkaliplatindoppelchloriden hergestellt. Als Zusätze verwendet man Zitronensäure, Chlorwasserstoffsäure und milchsäure Alkalien. Bei den milchsäuren Bädern 1,6 V bei 0,15—2 A/dm².

Aus aufgebrauchten Bädern wird das Platin durch Fällung mit Zinkstaub wiedergewonnen.

(968) Verantimonierung. Anoden aus metallischem Antimon. Bäder aus Schlipfchem Salz und Natriumkarbonat. 1,9—3,2 V bei 0,35 A/dm². — Auch bei Antimon werden milchsäure Bäder empfohlen.

(969) Aluminium. Das galvanische Niederschlagen von Aluminium aus wässrigen Lösungen ist nicht möglich. Auch das galvanische Überziehen von Aluminium mit anderen Metallen macht Schwierigkeiten und erfordert besondere Maßnahmen, über welche eine ganze Reihe von Vorschriften besteht.

Galvanoplastik.

(970) Allgemeines. Die Galvanoplastik bezweckt die Erzeugung von Metallen auf galvanischem Wege in einer solchen Stärke, daß sie sich ohne Unterlage gebrauchen lassen. Während die Galvanostegie sich bestrebt, einen festhaftenden Metallüberzug auf einem anderen Metall hervorzubringen, fällt diese Forderung bei den galvanoplastischen Erzeugnissen nicht nur weg, sondern man verlangt im Gegenteil,

daß die Metallablagerung sich bequem abnehmen lasse. Während es zudem durch die bisher besprochenen Verfahrungsweisen nur möglich war, Metallabscheidungen auf einem Metalle hervorzubringen, müssen galvanoplastische Reproduktionen von Gegenständen jeglichen Materials möglich sein. Hierbei erzeugt man entweder von einem Gegenstand auf galvanischem Wege das Spiegelbild in Metall, oder man überzieht die Gegenstände allseitig mit Metall. Man spricht deshalb auch von einer eigentlichen Galvanoplastik und einer Überzugsgalvanoplastik. Da aber die Ausführung in beiden Fällen die gleiche ist, so sind hier diese Unterschiede nicht weiter zu beachten. Bei der Ausführung von galvanoplastischen Arbeiten sind 3 Momente als gleich wichtig zu berücksichtigen: 1. die Herstellung der Formen, 2. ihre Leitendmachung und 3. die Ausführung der galvanoplastischen Reproduktion.

(971) Die Formen erzeugt man

1. aus Metall, a) durch Anwendung leicht schmelzbarer Legierungen, b) durch Abdruck in Blei, c) durch galvanoplastische Reproduktion,
2. aus Guttapercha,
3. aus Wachsguß,
4. aus Gips,
5. aus Leim, der durch chemische Mittel (Chromsäure-Belichtung, Formalin oder Tannin) unlöslich gemacht wird.

(972) Leitendmachen der Formen. Wo nichtleitende Formen vorliegen, werden diese in den meisten Fällen mit reinstem Graphit leitend gemacht. Außerdem können in Frage kommen: Pulver von Metallen und Legierungen, Blattmetalle, leitende Schwefelmetalle, wie Schwefelsilber, durch Belichtung aus Jodsilber erhaltene Silberschichten usw.

(973) Ausführung der Galvanoplastik. Man arbeitet entweder mit dem sog. einfachen Apparate oder mit einem Apparate mit äußerer Stromquelle. Das letztere Verfahren ist wegen der leichteren Beaufsichtigung und der Gewähr, jederzeit eine tadellose Arbeit zu vollbringen, der ersteren entschieden vorzuziehen.

Beim Betriebe mit einfachem Apparate (Zellen- oder Trogepparat) wird wie bei der Instandsetzung einer Daniellschen Kette verfahren. In ein größeres äußeres Gefäß kommt die Kupfervitriollösung (1 l Wasser, 250 g Kupfervitriol); in die innere poröse Tonzelle verdünnte Schwefelsäure (1 : 30) und ein Zinkzylinder. Zweckmäßig ist es auch, etwas Amalgamiersalz (Merkurosulfat) hinzuzugeben. An den Zinkzylinder wird ein Kupfering gelötet, welcher zur Aufnahme der Formen, die in die Kupferlösung tauchen, dient. Für größere Anlagen verwendet man Wannen, bei welchen eine den vorangeschickten Ausführungen entsprechende Anordnung getroffen wird. Beim Betriebe mit äußerer Stromquelle verwendet man ein Bad aus 1 l Wasser, 30 g Schwefelsäure und 200 g Kupfervitriol, 0,5—2,8 V, 0,5—3 A/dm².

Für Schnellgalvanoplastik liegen verschiedene Vorschläge bezüglich der Badzusammensetzung, Betriebsspannung und Stromdichte vor. Für dauernde Bewegung des Elektrolyten ist mit Rücksicht auf eine gleichmäßige Metallabscheidung zu sorgen.

Die Galvanoplastik in Eisen, Nickel, Silber und Gold kann in analoger Weise wie die in Kupfer erfolgen; es kommen dabei gleiche oder ähnliche Bäder zur Anwendung, wie sie bei galvanostegischen Arbeiten verwendet werden.

(974) Herstellung von Druckplatten, Klischees, Stereotypen usw. Diese werden meistens aus Kupfer auf galvanoplastischem Wege gewonnen. Um sie weniger der Abnutzung und der Einwirkung der Druckfarben zu unterwerfen, verstäht, vernickelt, verkobaltet man sie, oder man überzieht sie mit einem Hartnickelüberzug (Nickel mit 25—30 % Kobalt). Diese Überzüge dürfen nur verhältnismäßig dünn erzeugt werden, weil sonst die Feinheit der Zeichnung stark beeinträchtigt würde; denn bei galvanoplastischen Überzügen ist die letzte und grobkörnigste Metallschicht die Druckfläche. Um galvanoplastische Reproduktionen, bei welchen die

erste und feinste Metallabscheidung Druckfläche wird, äußerst dauerhaft herzustellen, erzeugt man solche von Eisen oder Nickel.

(975) Irisierung, Brünierung, Patinierung auf galvanischem Wege. Die Anodenarbeit oder das sogenannte Arbeiten mit umgekehrtem Strom findet noch Anwendung zur Ausführung der galvanischen Ätzung, Irisierung, Brünierung und ähnlicher Metallfärbungen sowie der künstlichen Patinabildung.

Literatur: Hering, A., Die Galvanoplastik u. ihre Anwendung in der Buchdruckerkunst. 1898. — Jenisch, P., Handbuch für alle galvanosteg. u. galvanoplast. Arbeiten. 1905. — Kempe, C., Die Galvanoplastik. 1897. — Konwieszka, H., Galvanoplast. Apparate nebst Anleitung zum galvan. Verkupfern, Vernickeln, Versilbern u. Vergolden. 1909. — Krause, Galvanotechnik (Galvanosteg. u. Galvanoplastik). 1908. — Langbein, G., Handbuch d. elektrolyt. (galvan.) Metallniederschläge. 1906. — Langbein u. A. Friebner, Galvanoplast. u. Galvanostegie. 1904. — Lange, W., Die gesamte Galvanostegie. Die galvan. Verkupferung, Vernickelung, Versilberung usw. 1899. — Levett & Findeisen, Der Galvaniseur u. Metallschleifer. 1903. — Peters, F., Elektrometallurgie u. Galvanotechnik. 1900. — Pfannhauser, W., Die Herstellung von Metallgegenständen auf elektrolytischem Wege und die Elektrogravüre. 1903. — Pfannhauser, W., Die Galvanoplastik. 1904. Bd. 11 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. — Fitz-Gerald, Elektrolytische Verfahren zur Herstellung parabolischer Spiegel. 1904. Bd. 14 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. — Fitz-Gerald, Elektrolytische Verzinkung. Bd. 18 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. — Schlötter, M., Über die elektrolyt. Metallniederschläge. I. Teil 1910. II. Teil 1911. Bd. 37 u. 40 aus Engelhardts Monographien über angewandte Elektrochemie. — Steinach, H. & G. Buchner, Die galvan. Metallniederschläge. 1896. — Stockmeier, H., Handbuch der Galvanostegie u. Galvanoplastik. 1899. — Taucher, K., Handbuch der Galvanoplastik. 1900. — Trost, G., Galvanoplastik und Galvanostegie. 1900. — Weiß, J., Die Galvanoplastik. Lehrbuch der Galvanoplastik und Galvanostegie. 1909.

Zwölfter Abschnitt.

Leitungsblitzableiter oder Blitzschutzvorrichtungen und Spannungssicherungen.

(976) **Atmosphärische Ladungen** können auf verschiedene Weise in die Leitungen elektrischer Anlagen gelangen: a) durch direkte Blitzentladungen, welche die Leitungen treffen und in der Regel die Drähte oder Isolatoren oder Leitungsmaste oder alles zugleich beschädigen¹⁾; wegen der großen Energie dieser direkten Blitzschläge gibt es kein Schutzmittel dagegen; b) durch Teilentladungen und Rückschläge, die weniger Energie führen; c) durch langsame Influenz heranziehender Gewitterwolken; d) durch Aufladung der Drähte aus der mit freien Ionen erfüllten umgebenden Atmosphäre; e) infolge des Durchschneidens der Niveauflächen der Erde, wenn eine Luftleitung große Höhenunterschiede überwindet; f) durch Reibung von Sand und trockenen Schneeteilchen an den Leitungsdrähten bei heftigem Winde. Die unter d) genannten sind die häufigsten. Sie können bei trockenem und trübem Wetter im Sommer und im Winter vorkommen. Die Potentialdifferenz aller atmosphärischen Ladungen besteht zwischen **L e i t u n g** und **E r d e**. Daher erfolgt auch die Durchbrechung der Isolation immer gegen **E r d e**, sei es unmittelbar oder mittelbar.

(977) **Wirkungsweise.** Um die Durchbrechung der Isolation der Leitung zu verhüten, muß den atmosphärischen Ladungen ein **u n s c h ä d l i c h e r** Ausgleichsweg über Funkenstrecken (F in Abb. 546 a u. b) oder unmittelbar zur Erde geboten werden. Die unter 976, a) und b) genannten Ladungen können oszillatorisch oder intermittierend oder kontinuierlich sein. Aber auch wenn sie nicht oszillatorisch sind, bestehen sie aus einem oder mehreren **r a s c h** zu- und abnehmenden Stromstößen. Daher wird ihnen der Zutritt zu den Maschinen oder Apparaten erschwert, wenn zwischen diese und den Ausgleichsweg eine Drosselspule geschaltet wird. Die unter (976) c) bis f) genannten Ladungen entstehen allmählich und bleiben längere oder kürzere Zeit konstant, so daß sie als **statische** Ladungen bezeichnet werden können. Solchen bietet also die Drosselspule keinerlei Hindernis; Spannung und Energie sind erheblich kleiner als bei den unter a) und b) genannten Ladungen.

Die Funkenstrecke muß um so kürzer eingestellt werden, je empfindlicher die Schutzvorrichtung sein soll. Dazu dienen die Kurven in Abb. 547 und 548, welche die Überslagsspannungen für verschiedene Elektrodenformen angeben.

Für **T e l e g r a p h e n -** und **T e l e p h o n -** (Schwachstrom-) **L e i t u n g e n** ist damit alles gegeben. Die konstruktiven Einzelheiten beziehen sich dabei nur auf geeignete Herstellung einer möglichst kurzen und widerstandsfähigen Funken-

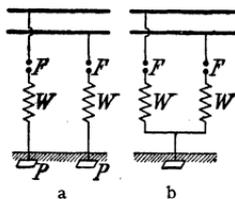


Abb. 546. Schaltungsarten.

¹⁾ Vgl. die Berichte über die Fragebogen des Elektr. Vereines: ETZ 1903, S. 812; 1904, S. 287; 1907, S. 90; 1909, S. 1110.

strecke. Anders ist es bei den Starkstromanlagen, wo durch gleichzeitige Entladung an verschiedenen Polen (Phasen) ein Nebenschluß über die Erde hergestellt wird, so daß das Netz mehr oder weniger kurzgeschlossen ist. Die Funkenstrecken können durch die Kurzschlußlichtbogen zerstört werden. Daher sind diese Lichtbogen entweder zu schwächen, zu verhindern oder möglichst rasch zu beseitigen. Zu diesem Zwecke wird jeder Funkenstrecke ein induktionsloser Widerstand W vorgeschaltet, falls nicht die Erdplatten P (Abb. 546 a) soweit auseinander liegen, daß schon die dazwischenliegende Erde einen Kurzschluß verhindert. Es können dann nur solche Lichtbogen entstehen, welche keinen Schaden verursachen. Um auch diese noch zu verhindern oder möglichst rasch zu unterbrechen, müssen die Schutzvorrichtungen besonders eingerichtet sein.

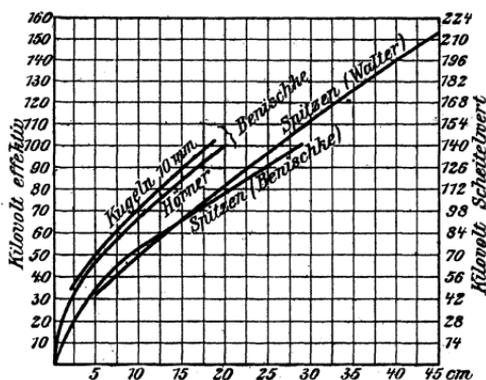
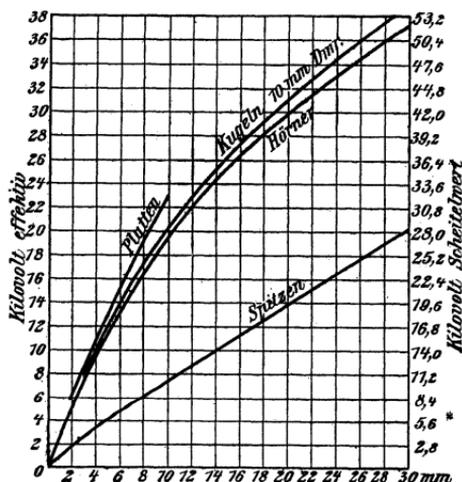


Abb. 547 und 548. Überschlagespannungen für verschiedene Elektrodenformen.

gängen und Erdschlüssen vorkommen. Für eine Resonanz der Grundwelle (Betriebsfrequenz) sind aber Kapazität und Selbstinduktion der jetzigen Elektrizitätswerke zu klein, so daß praktisch nur die Resonanz eines Gliedes höherer Ordnung zu befürchten ist. Durch sekundäre Ströme (belastete Transformatoren) wird eine Resonanz beinahe unmöglich gemacht, so daß sie auch für höhere Glieder nur bei leerlaufenden Transformatoren zu befürchten ist¹⁾. 2. Extrastrom und -spannung beim plötzlichen Unterbrechen

stand W vorgeschaltet, falls nicht die Erdplatten P (Abb. 546 a) soweit auseinander liegen, daß schon die dazwischenliegende Erde einen Kurzschluß verhindert. Es können dann nur solche Lichtbogen entstehen, welche keinen Schaden verursachen. Um auch diese noch zu verhindern oder möglichst rasch zu unterbrechen, müssen die Schutzvorrichtungen besonders eingerichtet sein.

Die Anordnung nach Abb. 546 a kann vierfüßigen Tieren, allenfalls auch Menschen gefährlich werden, wenn das Spannungsgefälle in der Erde groß ist. Daher darf diese Anordnung nur angewendet werden, wenn es möglich ist, jeder Platte einen sehr kleinen Übergangswiderstand zur Erde zu geben, oder wenn die nächste Umgebung unzugänglich ist.

(978) Überspannungen im engeren Sinne sind alle jene Spannungserhöhungen, welche durch Vorgänge in der elektrischen Anlage selbst erzeugt werden. Das sind: 1. Resonanzspannung in Wechselstromkreisen mit Kapazität und Selbstinduktion in Reihenschaltung. Diese Reihenschaltung kann bei einpoligen Schaltvor-

¹⁾ ETZ 1916, S. 82.

eines kapazitätslosen, aber induktiven Stromkreises; 3. Oszillierende Überspannung beim Schließen eines Stromkreises mit Kapazität und Selbstinduktion. Diese kann niemals das Doppelte der EMK (Scheitelwert) der Stromquelle übersteigen. Ist die Isolation der Anlage danach bemessen, so kann aus dieser Ursache ein Durchschlag der Isolation zwischen Leitungen verschiedener Pole nicht vorkommen. Es bleibt dann nur die Gefahr, daß beim Eindringen einer solchen Spannung (fortschreitende Welle) in eine Wicklung die innere Isolation durchbrochen wird (146). Sie besteht besonders bei intermittierenden Erd- und Kurzschlüssen wegen der oftmaligen Wiederholung, denn dabei ist es möglich, daß sie in jeder Halbwellen auftritt. 4. Transformierte Dauerschwingungen. Dauernde Schwingungen entstehen in einem Lichtbogen, wenn er sich in der Nähe seines labilen Zustandes befindet. Sie haben von vornherein nur die Spannung, welche zwischen den Elektroden des Lichtbogens besteht. Wenn aber mit ihrem Stromkreis ein anderer Stromkreis auf höheres Übersetzungsverhältnis magnetisch gekuppelt ist, so tritt in diesem die Schwingung mit entsprechend höherer Spannung auf. 5. Überspannungen, welche in einem ungleich belasteten mehrphasigen Stromerzeuger entstehen. Wird eine Phase mit viel mehr Strom belastet als die anderen (z. B. bei einem Kurzschluß), so tritt eine derartige unsymmetrische Stauung der magnetischen Kraftlinien ein, daß die EMK der überlasteten Phase sinkt, während die der anderen Phasen auf den 2- bis 3-fachen Wert ansteigen kann. Andere Überspannungen kommen hier nicht in Betracht, weil entweder ihre Spannung oder ihre elektrische Energie zu klein ist, um normale Isolationen durchbrechen zu können. Das Unterbrechen eines Stromkreises mit Kapazität und Selbstinduktion erzeugt keine Überspannung. Die dabei auftretende Spannungsamplitude kann keinen größeren Wert als die EMK der Stromquelle erreichen.

Über die dabei entstehenden fortschreitenden Wellen vgl. (982).

Die Potentialdifferenz der Überspannungen besteht zwischen Leitungen oder Windungen verschiedener Polarität (Phase). Daher erfolgt die etwaige Durchbrechung der Isolation zwischen solchen Leitungen oder zwischen verschiedenen Windungen derselben Wicklung (146) S. 116/7. Im allgemeinen kommen gefährliche Überspannungen nicht so häufig vor, als es nach der theoretischen Literatur den Anschein hat. Die meisten Isolationsdurchschläge sind nicht auf Überspannungen, sondern auf fehlerhafte Stellen in der Isolierung, auf Überbeanspruchung bei der Isolationsprüfung und auf atmosphärische Entladungen zurückzuführen¹⁾.

(979) Spannungssicherungen. Grob- und Feinschutz. Die Vorrichtungen, welche Überspannungen unschädlich machen sollen (Spannungssicherungen), haben einen Ausgleichsweg zwischen den Leitungen verschiedener Polarität (Phase) herzustellen. Wie man sofort sieht, ist dies auch bei den durch Abb. 546a u. b dargestellten Schaltungen der Blitzschutzvorrichtungen der Fall, so daß auch die Spannungssicherungen so geschaltet werden können. Bei reinen Kabelnetzen, wo atmosphärische Ladungen nicht vorkommen, genügt die Schaltung der Abb. 546 b ohne Erdschluß. Alle Blitzschutzvorrichtungen können grundsätzlich als Spannungssicherungen verwendet werden. Jedoch besteht ein wesentlicher Unterschied in der Einstellung der Funkenstrecke und in der Größe des Vorschaltwiderstandes. Da die Überspannungen im allgemeinen viel kleinere Spannung haben als die atmosph. Ladungen, müssen die Spannungssicherungen empfindlicher eingestellt werden. Andererseits haben die Überspannungen kleinere Energie als atmosph. Ladungen, so daß der Ausgleichsweg einen größeren Widerstand (Vorschaltwiderstand W) enthalten darf. Das hat weiter zur Folge, daß die Funkenstrecke noch

¹⁾ Näheres über Entstehung, Energie, Spannung, Frequenz und Dämpfung der Überspannungen vgl. B e n i s c h k e, „Die Schutzvorrichtungen der Starkstromtechnik gegen atmosphärische Entladungen und Überspannungen“. Braunschweig, 3. Aufl. 1923.

kürzer eingestellt werden kann, ohne daß deren Zerstörung zu befürchten ist. Man kann daher unterscheiden zwischen Grobschutz (längere Funkenstrecke mit kleinerem Vorschaltwiderstand zur Ableitung stärkerer atmosph. Ladungen) und Feinschutz (kürzere Funkenstrecke mit größerem Vorschaltwiderstand oder unmittelbare Erdverbindung über einen induktionslosen Widerstand, (990), (993), zur Ableitung von Überspannungen und statischen Ladungen).

(980) Vorbeugende Mittel gegen atmosph. Ladungen. Es gibt Anlagen, die keiner Schutzvorrichtungen gegen atmosph. Entladungen bedürfen. Das sind alle jene, die nur unterirdische Leitungen haben, und bis zu einem gewissen Grade auch jene, deren Luftleitungen nur zwischen überragenden Gebäuden und Bäumen verlaufen. Leitungen, die in tiefen, schmalen Tälern verlaufen, sind wenig gefährdet. In manchen Fällen kann also schon durch geeignete Führung der Freileitungen ein vorbeugender Schutz gewonnen werden.

Da der Durchbruch einer in eine Leitung gelangten atmosph. Ladung immer gegen Erde hin stattfindet, so bildet die isolierte Aufstellung der Maschinen und Apparate ein wirksames vorbeugendes Mittel, das allerdings nicht immer ausführbar ist oder doch erhebliche Schwierigkeiten macht.

Die atmosph. Ladungen sind von der Betriebsspannung ganz unabhängig. Da die Isolierung einer elektrischen Anlage in allen ihren Teilen um so stärker ist, je höher die Betriebsspannung ist, so ist sie durch atmosph. Ladungen um so weniger gefährdet, je höher die Betriebsspannung ist. Anlagen für mehr als 50 kV haben fast nur die unter a) und b) (976) genannten direkten Blitzschläge und Teilentladungen zu fürchten. Daher werden solche Anlagen häufig ohne Blitzschutzvorrichtungen ausgeführt und nur ein oder mehrere Schutzseile aus Eisen parallel über die Stromleitungen gespannt¹⁾. Neuerdings zeigt sich wieder eine Abneigung gegen Schutzseile wegen der hohen Kosten²⁾. Tatsächlich kann man bei richtiger Anwendung genügender Schutzvorrichtungen darauf verzichten. Andererseits besteht aber auch kein Zweifel, daß sie Teilentladungen eines Blitzes, die sonst einen Leitungsdraht treffen würden, auf sich lenken, also vorbeugend wirken³⁾.

(981) Vorbeugende Mittel gegen Überspannungen. Da die Überspannungen im engeren Sinne ihre Ursache in der Anlage selbst haben, sind sie in den meisten Fällen der Betriebsspannung proportional; eine Abnahme der Gefährdung mit wachsender Betriebsspannung besteht also da nicht.

Die durch das Schließen eines Stromkreises, durch intermittierende Erd- und Kurzschlüsse entstehenden oszillierenden Überspannungen sowie die Resonanzspannungen sind nur bei Kapazität möglich. Eine möglichste Vermeidung der Kapazität bedeutet also eine Verminderung der Überspannungsgefahr, und zwar auch dann, wenn die Höhe der Überspannung von der Größe der Kapazität unabhängig ist, weil dann wenigstens die Energie der Überspannung um so kleiner ist, je kleiner die Kapazität ist.

Sollen die beim Ein- und Ausschalten möglichen Überspannungen vermieden werden, so muß das Ein- und Ausschalten allmählich oder stufenweise über induktionslose Widerstände (Schalter mit Vorkontakt) erfolgen⁴⁾ (146), S. 117.

Resonanzspannungen kommen fast nur durch Glieder höherer Ordnung in der Wellenform der EMK zustande (978). Daher ist ihre Vermeidung durch genügend großen Luftzwischenraum zwischen Polrad und Gehäuse des Stromerzeugers oder Unterdrückung durch Käfigdämpfung⁵⁾ wie zur Bekämpfung des Pendelns von Wichtigkeit.

¹⁾ Vgl. ETZ 1908, S. 218; 1910, S. 1024, 1257; 1913, S. 1242; 1919, S. 143.

²⁾ Schrottke, ETZ 1922, S. 1429. Creighton, Journ. of Am. Inst. Electr. Eng. 1922, S. 21. ETZ 1922, S. 1164.

³⁾ ETZ 1922, S. 1164.

⁴⁾ Über die Verwendung eines streuungslosen Transformators als induktionsloser Anlasser vgl. Elektr. Kraftbetr. u. Bahnen 1907, S. 408.

⁵⁾ ETZ 1915, S. 396.

(982) Fortschreitende Wellen. Stehende Wellen (146). Durch Schaltvorgänge jeder Art, intermittierende Erd- und Kurzschlüsse, sowie durch Induktion bei Blitzschlägen in der Nähe einer Leitung entstehen in den Leitungsdrähten **fortschreitende Wellen** (Wanderwellen), für welche die allgemeinen Gesetze der Wellenlehre gelten. Entstehen sie durch **Schließen** eines Stromkreises, so bleibt der größtmögliche Scheitelwert (Amplitude) unter der doppelten EMK der Stromquelle. Entstehen sie durch **Öffnen** eines Stromkreises, so kann ihre EMK die der Stromquelle nicht übersteigen. Der **äußeren** Isolation sind also diese Wellen unter gewöhnlichen Umständen nicht gefährlich. Hingegen sind sie der **inneren** Isolation einer Wicklung, d. h. der Isolation zwischen benachbarten Windungen und Windungslagen derselben Spule gefährlich, weil diese nur aus einer dünnen Schicht Baumwolle, Seide, Papier, Emaille oder Oxyd besteht. Die Gefahr besteht aber nur während jener kurzen Zeit, während deren die Welle in die Wicklung eindringt. Die Spannung zwischen zwei benachbarten Windungen ist dabei um so größer, je steiler die Stirn der fortschreitenden Welle ist. Senkrechte Wellenstirnen gibt es aber nicht, weil das Öffnen und Schließen eines Stromkreises fast immer mit Funkenbildung verbunden ist, und weil der Ohmsche Widerstand sowie Hysterese und Wirbelströme dämpfend wirken, indem sie die Wellenstirnen erniedrigen und abflachen. Zum Teil schützt sich jede Wicklung dadurch schon selbst, daß sie den größten Teil der ankommenden Welle reflektiert. Der reflektierte Teil ist um so größer, je größer der Unterschied zwischen den induktiven Widerständen (genau genommen zwischen den Wellenwiderständen $\sqrt{L/C}$) aufeinanderfolgender Leitungsstücke ist. Die Wicklung wird noch mehr geschützt, wenn die Reflektion schon vor der Wicklung durch eine vorgeschaltete Drosselspule bewirkt wird. Dabei kommt es nicht so sehr auf die gesamte Selbstinduktion der Drosselspule, sondern darauf an, daß der induktive Widerstand einer Windung möglichst groß ist. Daher empfiehlt sich die Anwendung einer Drosselspule mit Eisenkern. Der nicht reflektierte Teil der Welle dringt weiter vor. Dabei wird er durch Hysterese und Wirbelströme stark gedämpft, weil die Frequenz der Welle im allgemeinen sehr groß ist. In ähnlicher Weise, aber weniger stark wirkt eine Drosselspule ohne Eisenkern, aber aus Eisendraht. Der reflektierte Teil einer Welle bildet auf der Leitung mit den noch ankommenden Schwingungen eine **stehende Welle**, die so lange besteht, bis die Schwingung durch Dämpfung aufgezehrt ist. Eine fortschreitende Welle wird auch durch einen im Nebenschluß liegenden Kondensator reflektiert. Der Stromverbraucher oder Stromerzeuger wird aber dadurch nicht geschützt, weil der Kondensator eben nicht **vor** ihm liegt, so daß der größte Teil der fortschreitenden Welle an diesem vorbei zur Wicklung gelangt (991).

(983) Verminderung des Erdschlußstromes durch Löschrösseln und Lösctransformatoren. Erdschlüsse, die aus irgendeiner Ursache nicht einen **andauernden** Strom durchlassen, sondern **intermittierend** sind, bewirken in schneller Folge abwechselndes Schließen und Öffnen desjenigen Stromkreises, der von den Erdkapazitäten der gesunden Leitungen und der Selbstinduktion des Stromerzeugers (Maschine oder Transformator) gebildet wird. Daraus ergeben sich die in (978, 3) und (982) besprochenen Gefährdungen der Isolation. Dagegen hilft die Erdung des Sternpunktes (Wicklungsmitte) des Stromerzeugers, weil dann der betreffende Wicklungszweig kurzgeschlossen ist. Das hat aber andererseits den Nachteil, daß meistens ein starker Kurzschlußstrom entsteht, der den weiteren Betrieb sogleich unmöglich macht, was bei ungeeignetem Stromerzeuger nicht der Fall ist. Daher ist die Erdung über eine Drosselspule vorzuziehen. Beim Eintritt eines Erdschlusses verläuft dann über die Fehlerstelle nicht nur der voreilende Kapazitätsstrom (wie bei ungeeignetem Sternpunkt), sondern auch der nacheilende Induktionsstrom der Drosselspule. Sie heben sich daher teilweise oder bei richtiger Abgleichung der Drosselspule ganz auf, so daß nur die Wirkkomponenten des Erdschlußstromes und der Drosselspule übrigbleiben und der Erdschlußlichtbogen

erlischt („Löschdrossel“¹⁾). Diese Abgleichung kann aber zur Folge haben, daß bei erdschlußfreiem Betrieb eine Spannungsresonanz an der Drosselspule und an den Leitungsisolatoren (bzw. Kabeln) eintritt, wenn der Sternpunkt nicht auch Spannungsnullpunkt ist, sondern eine Spannung zwischen ihm und Erde (Unsymmetrienspannung) besteht²⁾. Diese Resonanzspannung wird allerdings kaum jemals ausreichen, um eine gesunde Isolation zu durchschlagen, denn sie besteht nur außerhalb des Stromerzeugers³⁾. Es besteht aber auch die Möglichkeit, daß Oberschwingungen der EMK im Stromerzeuger selbst zur Resonanz kommen, so daß die Anwendung einer Löschdrossel nur dann unbedenklich ist, wenn die Wellenform der EMK keine merklichen Oberschwingungen enthält⁴⁾. Außerdem besteht die Möglichkeit einer Spannungsresonanz, wenn eine Leitung reißt, und ein Ende auf die Erde fällt.

Statt einer einzigen Löschdrossel zwischen Sternpunkt und Erde (Sternpunktssdrossel) können auch Drosseln zwischen jeder Leitung und Erde geschaltet werden (Poleordnungsdrösseln). Damit diese beim Eintritt eines Erdschlusses genügend Strom durchlassen, werden sie mit sekundären Wicklungen versehen (Löschtransformatoren⁵⁾, die bei Dreiphasenstrom hintereinandergeschaltet werden, so daß sie im störungsfreien Betrieb stromlos sind und die primären Wicklungen nur den Leerlaufstrom durchlassen. Wenn aber durch einen Erdschluß die Symmetrie gestört wird, treten sekundäre Ströme auf und vermindern den äquivalenten scheinbaren Widerstand der primären Wicklungen derart, daß genügend Induktionsstrom durchgelassen wird. Die Möglichkeit von Spannungsresonanz besteht auch da wie bei den Sternpunktsdrosseln. Deswegen und wegen der großen Kosten sind die Ansichten über die Zweckmäßigkeit von Löschdrosseln und Löschtransformatoren noch geteilt⁶⁾.

(984) Schutzvorrichtungen mit mehreren in Reihe geschalteten Funkenstrecken.

Wenn soviel Funkenstrecken hintereinander geschaltet werden, daß auf eine weniger als 25 V entfallen, so kann ein Lichtbogen nicht bestehen. Das wäre aber eine zu unempfindliche Schutzvorrichtung, da jede Funkenstrecke nicht kürzer als 0,5 mm eingestellt werden darf, um Überbrückung durch Staub und dgl. zu vermeiden. Schaltet man jedoch einen genügend hohen Widerstand W (Abb. 549) vor und stellt die Elektroden aus massiven Metallwalzen her, welche die Fußpunkte der Lichtbogen stark abkühlen, so lassen sich bei Wechselstrom 100 V auf jede solche Funkenstrecke anwenden, ohne daß ein dauernder Lichtbogen entsteht. Der hohe Vorschaltwiderstand ist auch deswegen nötig, weil sonst Überspannungen durch hintereinander geschaltete intermittierende Entladungen entstehen können. Wegen des hohen Vorschaltwiderstandes sind diese Schutzvorrichtungen nicht als Grobschutz, sondern nur als Feinschutz geeignet.

(985) Schutzvorrichtungen mit magnetischem Gebläse im Nebenschluß.

Zwischen den Polen eines hufeisenförmigen Magnets (Abb. 550) befindet sich die Funkenstrecke F . Sobald einer Entladung ein Strom aus dem Netze nachfolgt, muß er die Magnetwicklung M passieren. Das dadurch erzeugte magnetische Feld löscht den Lichtbogen sofort aus. Damit oszillierende Entladungen einen induktionsfreien Weg zur Erde finden, ist der Magnetwicklung M ein Karborundumstab W_1 parallel geschaltet. Damit der Strom aus dem Netze nicht zu stark wird, ist dem Ganzen noch der Karborundumstab W_2 vorgeschaltet.

1) Petersen, E. u. M. 1918, S. 297. ETZ 1919, S. 5.

2) Jonas, E. u. M. 1920, S. 453; 1921, S. 80. ETZ 1921, S. 239, 1115. — Roth, ETZ 1921, S. 674, 989.

3) Benischke, ETZ 1921, S. 695; 989.

4) Benischke, „Schutzvorrichtungen der Starkstromtechnik“, 3. Aufl. Braunschweig 1923.

5) Bauch, ETZ 1920 S. 200; 1921, S. 588, 616.

6) Vgl. Bericht mitteldeutscher Betriebsleiter ETZ 1922, S. 1091. — Conwell u. Evans, Journ. of Am. Inst. Electr. Eng. 1922, S. 140.

Abb. 551 zeigt eine ähnliche Einrichtung. Hier befinden sich zwei hintereinander geschaltete Funkenstrecken $A-B$ und $A-C$ im magnetischen Felde der vom Netzstrom durchflossenen Magnetspule M . Das zu starke Anwachsen dieses Stromes wird teils durch die der Spule M vorgeschaltete Funkenstrecke

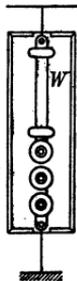


Abb. 549. Mehrere Funkenstrecken in Reihe.

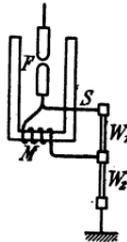


Abb. 550. Magnetisches Gebläse.

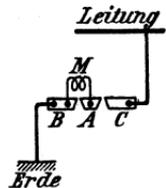


Abb. 551. Magnetisches Gebläse.

$A-C$, teils durch einen besonderen Vorschaltwiderstand verhindert. Wegen der kurzen Funkenstrecken eignet sich diese Vorrichtung nur bis etwa 275 V Netzspannung. Für höhere Spannungen (bis etwa 1200 V) wird die eine Funkenstrecke von Hörnern gebildet (Abb. 552). Die Entladung muß auf dem Wege zur Erde die Funkenstrecken i und k hintereinander überschlagen. Der etwa nachfolgende Strom verläuft über i , den Blasmagnet und den Widerstand W .

(986) Schutzvorrichtungen, bei welchen der Lichtbogen durch seine Eigenwirkung erlischt. Für hohe Spannungen wird am häufigsten die nur aus 2 hörnerförmigen Elektroden gebildete Schutzvorrichtung Abb. 553 verwendet. Der an der engsten Stelle bei a entstehende Lichtbogen wird durch den Auftrieb der heißen Luft und die elektrodynamische Eigenwirkung nach oben getrieben und dadurch so weit verlängert, bis er erlischt. Bei der Montage ist also darauf Rücksicht zu nehmen, daß der Lichtbogen oben genügend freien Raum findet. Für sehr hohe Spannungen empfiehlt es sich, zwei oder auch mehrere solche Hörnerschutzvorrichtungen

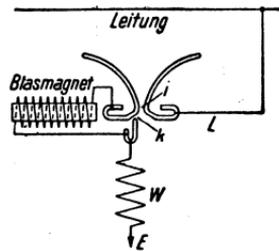


Abb. 552. Magnetisches Gebläse für höhere Spannungen (SSW).



Abb. 553. Hörnerableiter.

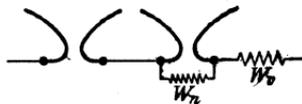


Abb. 554. Doppelter Hörnerableiter.

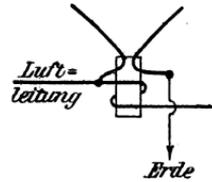


Abb. 555. Hörnerableiter mit Blasmagnet.

hintereinander zu schalten (Abb. 554), damit der Lichtbogen nicht so hoch wird und eher erlischt. Zweckmäßig ist es dabei, einer dieser Schutzvorrichtungen einen induktionslosen Widerstand W_n parallel und vor das ganze den Vorschaltwiderstand W_v zu schalten. Ladungen von sehr hoher Spannung durchschlagen die

beiden hintereinander geschalteten Funkenstrecken, während solche von kleinerer Spannung nur die erste Funkenstrecke zu durchschlagen brauchen und dann weiterhin den Weg über W_n nehmen können.

(987) Hörnerschutzvorrichtungen mit magnetischem Gebläse in Reihenschaltung. Bei Hörnerschutzvorrichtungen für niedrige und mittelhohe Spannungen, deren Funkenstrecke eng eingestellt ist, dauert es einige Augenblicke, bis sich der Lichtbogen aus der engsten Stelle entfernt hat. Während dieser Zeit besteht ein unangenehmer Spannungsabfall im Netz und die Gefahr, daß die Hörner stark verbrannt werden. Schaltet man, um das zu vermeiden, einen großen Widerstand vor, so besteht die Gefahr, daß der Auftrieb zu gering ist, weil dieser der Stromstärke proportional ist. Daher empfiehlt sich die Anwendung eines magnetischen Gebläses, das in die vom Stromerzeuger herkommende Arbeitsleitung derart eingeschaltet ist (Abb. 555), daß der Lichtbogen nach oben getrieben wird. Bei Wechselstrom ändert sich die Richtung dieses Auftriebes nicht, weil der Strom im Lichtbogen und im magnetischen Gebläse gleichzeitig sein Vorzeichen wechselt. Dient die Vorrichtung zum Schutz von Stromerzeugern (sekundäre Transformatorwicklung, Kabelende), so wirkt die Magnetwicklung gleichzeitig als Drosselspule.

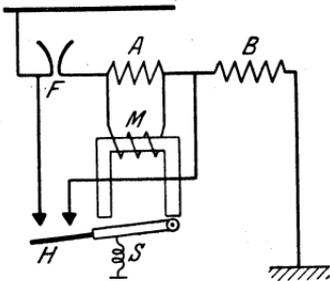


Abb. 556. Funkenlöschung durch Kurzschluß (Emag).

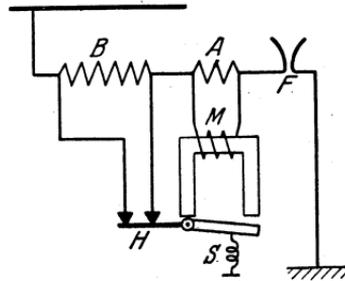


Abb. 557. Funkenlöschung durch Unterbrechung (SSW).

Bei Stromverbrauchern (primäre Transformatorwicklung, Kabelanfang) liegt die Gebläsewicklung vor der Funkenstrecke, so daß noch eine besondere Drosselspule vor dem zu schützenden Objekte nötig ist. Bei großen Stromstärken, wo die Gebläsewicklung aus einem großen Kupferquerschnitt hergestellt werden müßte, wird sie in die Erdleitung eingeschaltet und aus dünnem Drahte hergestellt. Da sie nun aber einen beträchtlichen induktiven Widerstand enthält, so wird ihr, ein Karborundumstab oder bei großem Vorschaltwiderstand eine kurze Funkenstrecke parallel geschaltet, damit oszillierende Entladungen an der Gebläsewicklung vorbei zur Erde gelangen können.

(938) Schutzvorrichtungen mit selbsttätigen Hilfsschaltern. Dasselbe Ziel, schnellere Löschung des Lichtbogens, als sie beim reinen Hörnerableiter (Abb. 553) erfolgt, wird nach Abb. 556 (B e n d m a n n; El. Ges. Emag) erreicht, indem der einer Entladung über F, A, B folgende Strom zum Teil die Magnetentwicklung M durchfließt und den Schalter S schließt. Dieser überbrückt durch H zwei Kontakte, so daß die Funkenstrecke F und der Widerstand A kurzgeschlossen werden und der Lichtbogen an F erlischt. Sogleich wird der Anker durch die Feder S abgerissen, und der Strom bei H wieder unterbrochen, so daß der frühere Zustand wiederhergestellt ist. Die ganze Vorrichtung mit Ausnahme von F befindet sich unter Öl.

Eine ähnliche Einrichtung zeigt Abb. 557. Hier wird bei Anziehung des Ankers durch den nachfolgenden Strom der Kontakt H geöffnet, und der Widerstand B eingeschaltet. Dieser ist so groß, daß der Lichtbogen bei F erlischt und der Anker durch die Feder S wieder abgerissen wird.

(989) Verstärkte Glimm- und Büschelentladungen als Überspannungsschutz.

Überspannungen gleichen sich von selbst aus, wenn die Spannung zwischen spitzen Elektroden einen gewissen Wert (etwa 5000 V) übersteigt. Unter gewöhnlichen Verhältnissen ist aber die Wirkung zu gering. Sie wird bedeutend verstärkt, wenn zwischen Elektroden mit vielen Spitzen oder Kanten zwei Stoffe von sehr verschiedener Dielektrizitätskonstante (Luft und Glas) angeordnet werden, wie es bei dem „Glimmschutz“ der A.G. Dr. P. Meyer (Abb. 558) der Fall ist. Bei einer solchen Hintereinanderschaltung ist die elektrische Kraft in der Luftschicht bedeutend größer, in der Glasschicht bedeutend kleiner, als wenn nur ein Stoff vorhanden ist. In der Luftschicht wird daher die Glimmentladung sehr verstärkt, während die Durchschlagsfestigkeit der ganzen Anordnung bedeutend größer geworden ist, weil die elektrische Kraft im Glas so vermindert ist, daß die zu einem Durchschlag nötige Ionisierung nicht zustande kommt¹⁾. Das Glas ist mit einem hohen Rand versehen, damit auch dann kein Lichtbogen zustande kommt, wenn bei sehr hoher Überspannung lange Büschelentladungen und Gleitfunken auftreten. Infolgedessen ist kein Vorschaltwiderstand erforderlich. Um stärkere Überspannungen schnell abzuführen, empfiehlt es sich, 2 oder 3 solche Apparate parallel zu schalten, allenfalls unter Zwischenschaltung von Drosselspulen gemäß Abb. 560.



Abb. 558. Glimmentladung als Überspannungsschutz (Dr. Paul Meyer A. G.).

(990) Unmittelbare Erdung, Wasserstrahlerder. Die empfindlichste Schutzvorrichtung (Feinschutz) besteht aus einer unmittelbaren Verbindung jeder Leitung mit der Erde über einen induktionslosen Widerstand. Weil das aber einen dauernden Stromverlust bedeutet, muß der Widerstand verhältnismäßig groß gewählt werden, was zur Folge hat, daß starke Ladungen nicht rasch genug abgeleitet werden. Wo solche in Frage kommen (bei längeren Luftleitungen), müssen also unbedingt noch Grobschutzvorrichtungen vorgesehen werden.

Am einfachsten läßt sich die Erdung durch Wasserstrahlen herstellen, weil diese auch die Stromwärme mit fortführen. Solche Wasserstrahlen können fallende oder steigende sein. Im ersten Falle muß das Ausflußgefäß mit der Leitung verbunden, also von Erde isoliert werden, dagegen das Aufnahmefäß geerdet werden. Im zweiten Falle muß das Ausflußgefäß geerdet und der Prellbecher *B* (Abb. 559) mit der Leitung verbunden werden, was sich bei hohen Spannungen leichter ausführen läßt. Wo die Kosten des Wasserverbrauches erheblich sind, werden Metalldrahtwiderstände mit Ölkühlung oder Drähte mit Emailleüberzug oder Karborundumstäbe oder Gefäße mit pulverisierten Widerstandsmaterialien verwendet. Zur Ableitung statischer Ladungen können auch induktive Widerstände (Drosselspulen) zwischen Leitung und Erde oder zwischen Wicklungspunkt (Sternpunkt bei Drehstrom) und Erde verwendet werden, was außerdem bei einem Erdschluß in der Fernleitung noch eine Verminderung des Erdschlußstromes zur Folge hat (983).



Abb. 559.

Abb. 559. Wasserstrahlerder.

¹⁾ Benischke, ETZ 1907, S. 95. — Wiss. Grundlagen d. Elektrot. § 253.

(991) **Kapazitätswiderstände, Aluminiumzellen.** Um den Stromverlust, der mit der Anwendung induktionsloser Widerstände verbunden ist, zu vermeiden, wurde wiederholt die Einschaltung eines Kondensators zwischen Leitung und Erde als Ausgleichswiderstand vorgeschlagen. Soweit der wattlose Kapazitätsstrom in Betracht kommt, beruht das auf einem grundsätzlichen Irrtum¹⁾. Nur der Leitungsstrom, der durch den Kondensator hindurchgeht, wenn das Dielektrikum kein vollkommenes ist, wirkt ableitend (ausgleichend). Je schlechter also ein solcher Kondensator ist, desto eher ist er als Spannungsableiter brauchbar. Daneben kann aber die vorhandene Kapazität insofern schädlich wirken, als sie Überspannungsmöglichkeiten erzeugt oder die elektrische Energie solcher Überspannungen vergrößert. Dasselbe gilt von den Aluminiumzellen. Sie haben sich im Betriebe als gefährliche Überspannungserzeuger erwiesen²⁾.

(992) **Erdleitung.** Die Leitung von der Funkenstrecke zur Erde soll den kürzesten Weg einschlagen. Merkliche Selbstinduktion darf sie nicht enthalten, weil diese im Falle oszillatorischer Entladung einen großen induktiven Widerstand darstellt. Dagegen empfiehlt es sich, einen gewissen, von der Länge der Funkenstrecke, also von der Betriebsspannung abhängigen induktionsfreien Widerstand in die Erdleitung zu legen, um heftige Kurzschlüsse zu vermeiden (990). Für den Übergang zur Erde ist eine möglichst großflächige Berührung mit dem Erdreich

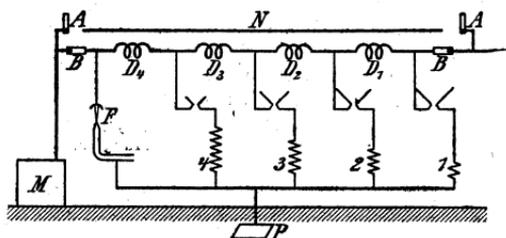


Abb. 560. Schutzeinrichtung gegen atmosphärische Entladungen und Überspannungen auf sehr gefährdeten Strecken.

notwendig. Bei feuchtem (Humus-) Boden genügt eine Blechplatte von 1 m². Bei Sand- und Steinboden empfiehlt es sich, strahlenförmig ausgehende Drähte oder Bänder bis zu 10 m Länge zu verlegen. Vgl. auch die Leitsätze für Schutzordnungen des V.D.E.: ETZ 1922, S. 559, 744; 1923, S. 1063, 1081.

(993) **Örtlichkeit, Schaltung.** Um die Funkenstrecke möglichst empfindlich einstellen zu können, empfiehlt es sich, die Vorrichtung vor Niederschlägen geschützt, also unter Dach anzubringen. Statt mehrere Blitzschutzvorrichtungen auf die ganze Leitungslänge zu verteilen, ist es auf sehr gefährdeten Strecken besser, vor dem zu schützenden Objekt mehrere hintereinander, durch Drosselspulen getrennt (Abb. 560), anzubringen. Ist die erste Funkenstrecke nicht in der Lage, die ganze von außen kommende Ladung abzuleiten, so bietet die nächstfolgende nochmals einen Weg zur Erde usw. Als letzte, empfindlichste Schutzvorrichtung dient der Wasserstrahler *F*. Durch diese Anordnung wird gleichzeitig verhindert, daß bei etwaigem Auftreten stehender Schwingungen die einzige Blitzschutzvorrichtung zufälligerweise in einen Schwingungsknoten zu liegen kommt, und dadurch der Schutz nicht eintritt. Der Wasserstrahler kann bei mangelndem Wasser wegbleiben, wenn die letzte Vorrichtung (4) empfindlich genug ist. Anderer-

¹⁾ Vgl. Benischke, ETZ 1906, S. 490; 1915, S. 34. — Döry, Elektr. u. Maschinenbau, Wien 1909, S. 137. — Schrottko, ETZ 1908, S. 798; 1910, S. 444. — Prehm, ETZ 1914, S. 417, 629, 1921, 395.

²⁾ ETZ 1920, S. 1016.

seits können (3) und (4) wegbleiben, wenn der Wasserstrahler keinen zu hohen Widerstand hat. Um die Funkenstrecken, Widerstände usw. untersuchen zu können, empfiehlt es sich, die ganze Schutzeinrichtung mittels des Nebenschlusses *N* und der Schalter *A* und *B* abschaltbar zu machen.

In gleicher Weise ist natürlich nicht nur die Zentralstation, sondern auch jede Unterstation und jedes zwischen Luftleitungen liegende Kabel zu schützen. Bei kurzen Kabelstücken, die nur zu Unterführungen notwendig sind, würde das teuer sein. Man verwendet daher zu solchen kurzen Stücken besonders stark isolierte Kabel. Sind alle Stellen in solcher Weise hinreichend geschützt, so brauchen auf der Leitungsstrecke keine Schutzvorrichtungen angebracht zu werden; es sei denn, daß eine Stelle (Bergrücken) vorhanden ist, welche besonders häufig atmosphärische Ladungen aufnimmt. Über Schutzdrähte vgl. (980).

Anhang.

(999) Einheits- und Formelzeichen. Sätze und einige Entwürfe des Ausschusses für Einheiten und Formelgrößen (AEF).

(994) Zeichen für Maßeinheiten.

(Nur in Verbindung mit Zahlen; gerade lateinische Buchstaben.)

Meter m	Zentiliter cl	Celsiusgrad °
Kilometer. km	Milliliter ml	Kalorie cal
Dezimeter. dm	Kubikmeter m ³	Kilokalorie kcal
Zentimeter cm	Kubikdezimeter dm ³	Ampere A
Millimeter mm	Kubikzentimeter. cm ³	Volt V
Mikron μ	Kubikmillimeter. mm ³	Ohm Ω
<hr/>		
Ar a	Tonne t	Siemens S
Hektar ha	Gramm g	Coulomb C
Quadratmeter m ²	Kilogramm kg	Joule J
Quadratkilometer . km ²	Dezigramm dg	Watt W
Quadratdezimeter . dm ²	Zentigramm cg	Farad F
Quadratzentimeter . cm ²	Milligramm mg	Henry H
Quadratmillimeter . mm ²	Stunde h	Milliampere mA
<hr/>		
Liter l	Minute m	Kilowatt kW
Hektoliter. hl	Minute alleinsteh. . min	Megawatt MW
Deziliter dl	Sekunde s	Mikrofarad μ F
	Uhrzeit: Zeichen erhöht	Megohm M Ω
		Kilovoltampere kVA
		Amperestunde Ah
		Kilowattstunde kWh

(995)

Formelzeichen.

(Lateinische Kursiv- und griechische Buchstaben.)

Länge <i>l</i>	Umlaufzahl, Drehzahl (Zahl der Umdrehungen in der Zeiteinheit) <i>n</i>
Masse <i>m</i>	Schwingungszahl in der Zeiteinheit <i>n</i>
Zeit <i>t</i>	Periodendauer <i>T</i>
Halbmesser <i>r</i>	Kreisfrequenz ω
Durchmesser <i>d</i>	Frequenz (bei Wechselstrom) <i>f</i>
Wellenlänge λ	Fallbeschleunigung <i>g</i>
Fläche. <i>F</i>	Kraft <i>P</i>
Rauminhalt, Volumen <i>V</i>	Druck (Druckkraft durch Fläche) <i>p</i>
Winkel α, β, \dots	Elastizitätsmodul. <i>E</i>
Voreilwinkel, Phasenverschiebung φ	Arbeit <i>A</i>
Geschwindigkeit <i>v</i>	Energie <i>W</i>
Winkelgeschwindigkeit ω	

Moment einer Kraft	M	Wärmeausdehnungskoeffizient	α
Leistung	N	Verdampfungswärme	r
Wirkungsgrad	η	Heizwert	H
Trägheitsmoment	J	Brechungsquotient	n
Zentrifugalmoment	C	Hauptbrennweite	f
Schubmodul	G	Lichtstärke	J
Zug- oder Druckspannung (Normalspannung)	σ	Magnetischer Fluß	Φ
Spezifische Dehnung	ε	Magnetisierungsstärke	\mathfrak{J}
Schubspannung	τ	Magnetische Feldstärke	\mathfrak{H}
Schiebung (Gleitung)	γ	Magnetische Induktion	\mathfrak{B}
Spezifische Querkontraktion $\nu = 1/m$ (m Poissonsche Zahl)	ν	Magnetische Durchlässigkeit (Permeabilität)	μ
Reibungszahl	μ	Magnetische Aufnahmefähigkeit (Suszeptibilität)	χ
Temperatur, absolute	T	Spezifischer Widerstand	ρ
Temperatur, vom Eispunkt aus	t	Dielektrizitätskonstante	ε
Temperatur, vom Eispunkt aus (mit der Zeit zusammentreffend) ϑ	ϑ	Elektrostatische Induktion	D
Wärmemenge	Q	Elektromotorische Kraft	E
Arbeitswert der Kalorie	J	Stromstärke, elektrische	I
Entropie	S	Widerstand, elektrischer	R
Spezifische Wärme	c	Leitwert	G
Spezifische Wärme bei konstantem Druck	c_p	Elektrizitätsmenge	Q
Spezifische Wärme bei konstantem Volumen	c_v	Induktivität (Selbstinduktionskoeffizient)	L
		Gegeninduktivität	M
		Elektrische Kapazität	C

(996) **Mathematische Zeichen s. (5).**(997) **Sätze.****Satz I. Der Wert des mechanischen Wärmeäquivalents.**

1. Der Arbeitswert der 15°-Grammkalorie ist $4,189 \cdot 10^7$ Erg.
2. Der Arbeitswert der mittleren (0° bis 100°)-cal ist dem Arbeitswert der 15°-Kalorie als gleich zu achten.
3. Der Zahlenwert der Gaskonstante ist:
 $R = 8,316 \cdot 10^7$, wenn als Einheit der Arbeit das Erg gewählt wird; $R = 1,985$, wenn als Einheit der Arbeit die Grammkalorie gewählt wird.
4. Das Wärmeäquivalent des internationalen Joule ist $0,23865$ 15°-Grammkalorie.
5. Der Arbeitswert der 15°-Grammkalorie ist $0,4272$ kg/m, wenn die Schwerkraft bei 45° Breite und an der Meeresoberfläche zugrunde gelegt wird.

Infolge neuerer sorgfältiger Messungen wird es nötig, die Zahlen des Satzes I zu ändern; der AEF hat dafür folgenden Entwurf aufgestellt (November 1921):

1. Der Arbeitswert der 15°-cal ist $4,184$ internationale Joule = $4,186 \cdot 10^7$ Erg.
2. Der Arbeitswert der mittleren (0° bei 100°)-cal ist dem Arbeitswert der 15°-Kalorie als gleich zu erachten.
3. Der Zahlenwert der allgemeinen Gaskonstante R ist $8,316 \cdot 10^7$, wenn als Einheit der Arbeit das Erg, $8,312$, wenn als Einheit der Arbeit das internationale Joule, $1,987$, wenn als Einheit der Arbeit die Kalorie, $0,08207$, wenn als Einheit der Arbeit die Literatmosphäre gewählt wird.
4. Das Wärmeäquivalent des internationalen Joule ist $0,2390$ 15°-cal
5. Der Arbeitswert der 15°-cal ist $0,4269$ kg/m, wenn die Schwerkraft bis 45° Breite und an der Meeresoberfläche zugrunde gelegt wird.

Satz II. Leitfähigkeit und Leitwert.

Das Reziproke des Widerstandes heißt *Leitwert*, seine Einheit im praktischen elektromagnetischen Maßsystem *S i e m e n s*; das Zeichen für diese Einheit ist *S*.

Das Reziproke des spezifischen Widerstandes heißt *Leitfähigkeit* oder *spezifischer Leitwert*.

Satz III. Temperaturbezeichnungen.

1. Wo immer angängig, namentlich in Formeln, soll die absolute Temperatur, die mit *T* zu bezeichnen ist, benutzt werden.

2. Für alle praktischen und viele wissenschaftlichen Zwecke, bei denen an der gewöhnlichen Celsiusskala festgehalten wird, soll empfohlen werden, lateinisch *t* zu verwenden, sofern eine Verwechslung mit dem Zeitzeichen *t* ausgeschlossen ist.

Wenn gleichzeitig Celsiustemperaturen und Zeiten vorkommen, so soll für das Temperaturzeichen das griechische ϑ verwendet werden.

Beispiel.

So soll man bei der Verwendung des *C a r n o t - C l a u s i u s* schen Prinzips statt $Q \frac{dt}{t+273} \dots Q \frac{dT}{T}$ schreiben, andererseits soll die Längenänderung eines Stabes ausgedrückt werden durch die Formel: $l = l_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$.

Satz IV. Einheit der Leistung.

Die technische Einheit der Leistung heißt *Kilowatt*. Sie ist praktisch gleich 102 Kilogrammeter in der Sekunde und entspricht der absoluten Leistung 10^{10} Erg in der Sekunde. Einheitsbezeichnung *kW*.

Als Ergänzung zu diesem Satz hat der AEF folgenden Entwurf aufgestellt; Für die Umrechnung von Leistungsangaben aus Pferdestärken in Kilowatt und umgekehrt werden folgende Zahlen festgesetzt:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kW} &= 1,360 \text{ PS} \\ 1 \text{ PS} &= 0,735 \text{ kW.} \end{aligned}$$

Für diese Umrechnung dient die Tafel (4).

Satz VI¹⁾. Durchflutung und Strombelag.

1. Die algebraische Summe aller durch eine beliebige Fläche fließenden Ströme heißt *elektrische Durchflutung*. Dimension: *Stromstärke*.

2. Bei einer elektrischen Strömung, die man als *zweidimensional* (flächenhaft) ansehen kann und will, heißt der Strom oder die Durchflutung durch eine zu den Stromlinien senkrechte Längeneinheit *S t r o m b e l a g*. Dimension: *Stromstärke* durch *Länge*.

Satz VII. Normaltemperatur.

Die Eigenschaften von Stoffen und Systemen sind tunlichst bei einer bestimmten einheitlichen Temperatur zu messen oder für eine solche zu berechnen und anzugeben. Als *Normaltemperatur* ist $+20^\circ \text{C}$ zu wählen, sofern nicht besondere Gründe für die Wahl einer anderen Temperatur vorliegen.

Unberührt bleiben

die Temperatur 0° in der Festlegung der Maßeinheiten „Meter“ und „Ohm“, der Druckeinheit „Atmosphäre“ sowie bei Barometerangaben

die Temperatur $+4^\circ$, in der Festlegung der Maßeinheit „Liter“ und für Wasser als Vergleichskörper bei Dichtebestimmungen.

¹⁾ Die Nr. V ist für einen bestimmten Entwurf vorbehalten worden.

Satz VIII. Feld und Fluß.

1. Den Raum, in welchem sich elektrische und mechanische Erscheinungen abspielen, bezeichnet man allgemein als elektromagnetisches Feld. Beschränkt sich die Betrachtung im besonderen auf die elektrischen oder auf die magnetischen Erscheinungen, so spricht man von einem elektrischen oder magnetischen Felde.

2. Das Integral der Normalkomponente eines Feldvektors über eine Fläche bezeichnet man als Fluß der Vektors durch die Fläche.

Im besonderen bezeichnet man das Integral der Normalkomponente der magnetischen Induktion über eine Fläche als Induktionsfluß und das Integral der Normalkomponente der dielektrischen Verschiebung als Verschiebungsfluß.

3. Den Induktionsfluß durch eine von allen Windungen einer Spule umrandete Fläche bezeichnet man als Spulenfluß. Der Fluß durch die Fläche einer einzelnen Windung heißt Windungsfluß.

Satz IX. Masse und Gewicht.

1. Die Masse eines Körpers ist das Maß seiner Trägheit, das ist seines Widerstandes gegen Beschleunigung. Die Masse ist gleich dem Quotienten der auf den Körper wirkenden Kraft durch die von ihm erzeugte Beschleunigung, also z. B. gleich dem Gewicht des Körpers geteilt durch die Fallbeschleunigung an dem Ort.

2. Die Schwerkraft eines Körpers an einem Ort ist die an diesem Ort auf ihn ausgeübte gesamte Massenanziehungskraft. Sie ist gleich dem Produkt der Masse des Körpers und der Schwerebeschleunigung an dem Ort.

3. Das Gewicht eines Körpers an einem Ort der Erde ist die an diesem Ort auf den ruhenden Körper im luftleeren Raum wirkende Mittelkraft aus der Schwerkraft und der gesamten durch die Drehung und Wanderung der Erde bedingten Scheinkraft. Das Gewicht ist gleich dem Produkt aus der Masse des Körpers und der Fallbeschleunigung an dem Ort und ändert sich somit im gleichen Verhältnis wie die Fallbeschleunigung.

4. Die Last eines Körpers ist die Kraft, die der ruhende Körper im luft erfüllten Raum auf die Wage ausübt. Die Last ist gleich dem Gewicht vermindert um den Betrag des Luftauftriebs.

5. Das Sichtgewicht eines Körpers ist das auf einer Wage im luft erfüllten Raum unmittelbar abgesehene Gewicht. Die Abweichung des Sichtgewichts von dem Gewicht des Körpers beruht auf dem Unterschiede des Auftriebs des Körpers und der Gewichtsstücke. Das Sichtgewicht ist mit der Dichte der Luft veränderlich.

6. Die Schwerebeschleunigung ist die einem Körper durch seine Schwerkraft erteilte Beschleunigung. Sie ändert sich daher mit dem Ort und mit der Zeit im gleichen Verhältnis wie die Schwerkraft.

7. Die Fallbeschleunigung g ist die einem Körper durch sein Gewicht — also durch das Zusammenwirken von Schwerkraft und gesamter Scheinkraft — im luftleeren Raum erteilte Beschleunigung. Die Fallbeschleunigung ist gleich der geometrischen Summe aus der Schwerebeschleunigung und der Scheinkraftbeschleunigung und ändert sich mit dem Ort und mit der Zeit im gleichen Verhältnis wie das Gewicht des Körpers.

8. Als Normalwert der Fallbeschleunigung gilt $g = 980,665 \text{ cm/s}^2 = 9,80665 \text{ m/s}^2$. Häufig genügt es, für g die abgerundeten Werte 9,81 oder 9,8 oder 10 m/s^2 je nach der verlangten Genauigkeit zu setzen.

(998)

Entwürfe.

Von den noch in Bearbeitung befindlichen Entwürfen werden einige wichtigere, gegen deren Verwendung keine wesentlichen Bedenken bestehen, mitgeteilt.

Entwurf XVI. Energieeinheit der Wärme.

Die Energieeinheit der Wärme ist das internationale Kilojoule oder die internationale Kilowattsekunde.

Entwurf XXIV. Wert der Valenzladung.

Die elektrochemische Einheit der Elektrizitätsmenge, d. h. die Ladung, welche im Grammäquivalent eines Ions an positiver bzw. negativer Elektrizität trägt und die mit dem Buchstaben *F* bezeichnet wird, beträgt 96 500 Coulomb.

Von besonderer Wichtigkeit sind folgende Entwürfe: Entwurf I. Spannung, Potential und elektromotorische Kraft. Siehe ETZ 1920, Heft 32 und 33.

Entwurf V. Wechselstromgrößen. A. Begriffe und Namen, B. Bedeutung der Größen. Siehe ETZ 1920, Heft 32 und 33.

Alphabetisches Register.

(Die Zahlen bedeuten Seiten.)

- Ableitung 60.
Abraumlokomotiven 598.
Absorption 605.
Abspannisolatoren 492.
Akkommodation 601.
Akkumulatoren 419; s. Bleisammler und Sammler.
Akkumulatorentriebswagen 599.
Alkali, el. Gew. 690.
Alkalichloride, Elektrolyse 690.
Alkalimetalle, el. Gewinnung 684.
Alkaliperchlorat, el. Gew. 692.
Alkalipermanganat, el. Gew. 690.
Aluminium, el. Gew. 685.
—, galvanischer Überzug 706.
—, Leitungen 504.
Aluminiumofen 686.
Aluminiumzellen 718.
Anfangspermeabilität 40, 183.
Anker s. Dynamomaschinen.
Ankerwinden 677.
Anlagen, el., Ausführung 490.
Anlasser 381, 385.
—, Bau 385.
—, Flüssigkeitsanlasser 386.
—, selbsttätige 386.
—, Walzenschalter 386.
Anleger von Dietze 201.
Anschlußbatterien 483.
Antriebsmaschinen 440.
Aperiodischer Grenzfall 122.
Apparate für Hochspannung 525.
— in el. Anlagen 515.
— —, Normen des VDE 515.
Äquivalente, elektrochemische 67.
Äquivalentgewichte 67.
Äquivalentleitvermögen 66.
Arbeit, magnetische 36.
Arbeitsmessung bei Sammlern 213.
Arbeitsverlust 458.
Arbeitswirkungsgrad 458.
Aronsche Schaltung 165.
Artefaktor 471.
Astasie 124.
Atomgewichte 67.
Audion 77.
Aufhängung, bruchssichere 506.
Aufzüge 554.
Auge und Sehen 601.
Ausgleichsvorgänge 111, 115.
Ausgleichstransformator 241.
Auslaufkurve 195.
Ausschlag, Ablesung 121.
—, ballistischer 123.
Ausschuß für Einheiten u. Formelgrößen 720.
Aus- u. Umschalter 516.
Ayrtonscher Nebenschluß 151.
- Bahnen, el. 565.
—, —, Adhäsionsgewicht 594.
—, —, Akkulatorentriebswagen 599.
—, —, Anfahrbeschleunigung 594.
—, —, Antrieb 569.
—, —, Arbeitsbedarf für Nebenleistungen 595.
—, —, Beleuchtung 579, 595.
—, —, Beschleunigung 595.
—, —, Betriebsarten 565.
—, —, Betriebsmittel 568.
—, —, Bremsarbeit 596.
—, —, Bremsung 595.
—, —, Bremsverzögerung 594.
—, —, Drehstrom 567, 575, 584.
—, —, dritte Schiene 567, 580, 582.
—, —, Einheitstypen der Reichsbahn 570.
—, —, Einphasenstrom 567, 574, 584.
—, —, Eislast 582.
—, —, Fahrdiagramm 595, 596.
—, —, Fahrdraktquerschnitt 582.
—, —, Fahrdraktspannung 565.
—, —, Fahrzeug, Antrieb 569.
—, —, —, Ausrüstung 576.
—, —, Festigkeit 582.
—, —, Gleichstrom 567, 572, 584, 585.
—, —, Gleichstromwiderstände 587.
—, —, gleislose Bahnen 598.
—, —, Grubenbahnen 598.
—, —, Heizung 579, 595.
—, —, Hochspannung 579.
—, —, Industriebahnen 598.
—, —, Isolationswiderstand 590.
—, —, Kettenaufhängung 580, 581.
—, —, Kraftwerk 590, 592.
—, —, Kuppelrahmen 569.
—, —, Leistung der Motoren 596.
—, —, Lokomotivzüge 568.
—, —, Luftpumpe 579.
—, —, Motoren 572.
—, —, —, Erwärmung 597.
—, —, —, Geschwindigkeitsreglung 566.
—, —, —, Nutzbremung 567.
—, —, —, Reglung 572.
—, —, Motorwagenzüge 568.
—, —, Nutzbremung 567.
—, —, Oberleitung 580.
—, —, —, einpolige 567.
—, —, Pantographenabnehmer 578.
—, —, Piranische Anordnung 592.
—, —, Pufferanlagen 591.
—, —, Radkastenabstand 569.
—, —, Rollenstromabnehmer 578.
—, —, Saugtransformator 586.
—, —, Schaltwalzen 576.
—, —, Scherenstromabnehmer 578.
—, —, Schienenverbindungen 583, 587.
—, —, Schleifstück 578.

- Bahnen, el., Schüttelerscheinungen 572.
 —, —, Schütze 576.
 —, —, Schwachstromstörungen 583.
 —, —, Spannungsabfall 585, 586.
 —, —, Speisung u. Verteilung 566, 580.
 —, —, Steuerung 576, 595.
 —, —, Stromabnehmer 578.
 —, —, Stromverbrauch 595.
 —, —, Stromzuführung, Systeme 580.
 —, —, —, unterirdische 583.
 —, —, Systeme, Kritik 565.
 —, —, Thermitverfahren 583.
 —, —, Triebwagen 599.
 —, —, Unterwerke 590.
 —, —, Verteilungsnetz 583.
 —, —, Wahl der Motorleistung 568.
 —, —, Wahl der Zugeinheit 568.
 —, —, Wechselstrom 585.
 —, —, Wechselstromwiderstände 587.
 —, —, Wendepolmotoren 572.
 —, —, Widerstand für Gleichstrom 587.
 —, —, —, Wechselstrom 587.
 —, —, Widerstandsschaltungen 573.
 —, —, Winddruck 582.
 —, —, Wirtschaftlichkeit 567.
 —, —, Zahnradvorgelege 569.
 —, —, Zugförderung, Mechanik 592.
 —, —, Zugkraft 593.
 —, —, Zugwiderstand 593.
 —, —, Zusatzmaschinen 585.
 Barium, el. Gew. 685.
 Barretter 132.
 Bechsteinscher Beleuchtungsmesser 613.
 Beglaubigungsfehlergrenzen der Zähler 211.
 Belastung von Maschinen bei Prüfung 189.
 — v. Wechselstrommasch. b. Prüfung 196.
 Beleuchtung, el. 601.
 —, Blendung 631.
 —, direkte 639.
 — v. Eisenbahnwagen s. Zugbeleuchtung.
 —, Gleichmäßigkeit 630.
 —, Güte 630.
 —, halbindirekte 639.
 —, indirekte 639.
 — von Innenräumen 640.
 —, Lichtfarbe 631.
 —, Ruhe 632.
 —, Schattigkeit 631.
 Beleuchtungsanlagen 630.
 —, Projektierung 634, 635.
 —, Stärke 630.
 —, Wirkungsgrad 635.
 —, Wirkungsgradtabelle 637.
 Beleuchtungskörper 639.
 Beleuchtungsmesser 613.
 Beleuchtungsproben 641.
 Beleuchtungsstärke, Berechnung 632.
 — eines Raumes 634.
 Bergwerke, el. betriebene 546.
 Berichtigungsgrößen 120.
 Beruhigung 121.
 Beryllium, el. Gew. 686.
 Betriebskapazität, Messung 161.
 Betriebsmaschinen, Wahl 435.
 Bezeichnungen 13.
 Biegebeanspruchung 27.
 Biegefestigkeit 26.
 —, Bestimmung 144.
 Bimetalldraht 504.
 Biot-Savart, Gesetz 80.
 Blei, el. Gew. 688.
 Bleichen, elektrolyt. 693.
 Bleikabel, Strombelastung 493.
 Bleisammler 419; s. a. Sammler.
 Bleisammler., Akkumulatorenraum 423.
 —, Aufbau 419, 422.
 —, chem. Vorgang 419.
 —, Elektrolyt 420.
 —, elektromotorische Kraft 420.
 —, Entladung 425.
 —, Garantie 427.
 —, Holzbrettchen 422.
 —, Inhalt 422.
 —, innerer Widerstand 422.
 —, Isolation 424.
 —, Kapazität 422.
 —, Klemmenspannung 420.
 —, Kurzschluß 426.
 —, Ladung 421, 425.
 —, Parallelschaltung 425.
 —, Plattenarten 419.
 —, Plattenaufhängung 422.
 —, Schlamm 422.
 —, Schwefelsäure 425.
 —, tragbare 423.
 —, Verbindung der Elemente 423.
 —, — der Platten 423.
 —, Verdunstung der Säure 423.
 —, Versprühen der Säure 423.
 —, Wirkungsgrad 422.
 Blenden, verstellbare 609.
 Blendung 601, 631.
 Blindgrößen 104.
 Blindverbrauch, Berechnung 456.
 —, Zähler 209.
 Blitzschutzvorrichtungen 709.
 Blochsches Photometer 612.
 Bogenlampen 628.
 —, Arten 629.
 — mit Kohlenstiften 628.
 — mit Lichtbogen im luftleeren Raum 628.
 — u. Spiraldrahtlampen 629.
 Bohrmaschinen 549.
 Bootswinden 677.
 Braunsche Röhre 174.
 Brechungsgesetz 604.
 Bremsdynamo 193.
 Bremse 554.
 Bronzeleitungen 504.
 Bruchsicherheit 26.
 Brücke, Thomsonsche 142.
 —, Wheatstonsche 140.
 Brünierung 708.
 Bügeleisen 662.
 Bühnenbeleuchtung, Regulierung 644.
 Bühnenbeleuchtungskörper 643.
 Bühnenregulatoren, Berechnung 645.
 Ceritmetalle, el. Gew. 686.
 Chaperonsche Wicklung 122.
 Charakteristik el. Maschinen 288, 318.
 — —, Bestimmung 196.
 Chemische Produkte, el. Herstellung 689.
 Chlor, el. Gew. 690.
 Chlorat-Alkali, el. Gew. 692.
 Chromsäure, el. Gew. 690.
 Dampfkondensator 438.
 Dampfturbinen 436.
 Dämpfung 121, 122.
 Dämpfungsexponent 110.
 Dämpfungskonstante 122.
 Dämpfungsverhältnis 122.
 Dauerschwingungen 711.
 Dehnung 26.
 Deklination 47.
 Dekrement, logarithm. 110, 122.
 Depolarisatoren 68.

- Detektor 77.
 Diagrammvektoren 103.
 Diaphragmen 683.
 Dichte, magnetische 37.
 —, Zahlentafel 29.
 Dielekt. Energieverlust 49.
 Dielektrizitätskonstante 48.
 —, Messung 162.
 —, unvollkommener Isolatoren, Mess. 163.
 Dieselmotoren 438.
 Differentialgalvanometer 128.
 Differentialschutzsystem 201.
 Diopterglocke 638.
 Dissoziation, elektrolyt. 66.
 Divisor 626.
 Doppelsieb 118.
 Doppeltarifzähler 210.
 Doppelzellenschalter 479.
 Dosenschalter 516.
 Drahttafeln 1, 2, 3.
 Dreheisenapparate 127.
 Drehfeldmeßgeräte 169.
 Drehfestigkeit 27.
 Drehmoment, Messung 194.
 Drehrichtung, positive 103.
 Drehspiegel 619, 620.
 Drehspule 181.
 Drehspulengalvanometer 125, 128.
 —, Ausführungsformen 126.
 —, Empfindlichkeit 127.
 Drehstrommagnet 224.
 Drehstrommotoren s. Wechselstrominduktionsmotoren.
 Drehstromsternschaltung 475.
 Drehstromzähler 209.
 Drehtransformator, ausgeführter 417.
 Drehzahl, Messung 191.
 Dreileitermaschinen 291.
 Dreileitersystem 474.
 Dreileiterttransformator 241.
 Dreschen 559.
 Drosselkette 118.
 Drosselspule 225, 532.
 —, Berechnung 226.
 — parallel zu einem Kondensator 104.
 —, Vektordiagramm 225.
 Druckknopfsteuerung 555.
 Druckplatten, Herstellung 707.
 Duboissche Wage 182.
 Durchbruchfeldstärke 55.
 —, feste Körper 57.
 —, Flüssigkeiten 56.
 —, Gase 55.
 —, Spitzenfunkenstrecke 56.
 Durchflutung 16, 722.
 Durchführungsisolator 510.
 Durchgangswiderstand 72.
 — von Isolierstoffen 146.
 Durchschlagsspannung s. Durchbruchfeldst.
 —, Zahlenwerte 57, 58.
 Dynamoblech, Untersuchung 184.
 Dynamomaschinen 245.
 —, Abschluß 246.
 —, Anker 251.
 —, —, aufgeschnittene Wicklung 256.
 —, —, Befestigung 254.
 —, —, Durchmesserwicklung 255, 257.
 —, —, geschlossene Wicklungen 255.
 —, —, hohe Spannung 252.
 —, —, Induktivität der kurzgeschlossenen Spulen 274.
 —, —, Käfigwicklung 255.
 —, —, Kommutatorwicklung 256.
 —, —, Luftschlitz 254.
 Dynamomaschinen, Anker, Phasenwicklung 255.
 —, —, Reihenparallelwicklung 260.
 —, —, Reihenwicklung 260.
 —, —, Schleifenwicklung 256, 258.
 —, —, Sehnenwicklung 256, 257.
 —, —, Temperatur 254.
 —, —, Umfangsgeschwindigkeit 282.
 —, —, Wellenwicklung 256, 258.
 —, —, Zylinderwicklung 260.
 —, Ankerfeld, Kompensierung 268.
 —, Ankerisolation, Prüfung 252.
 —, Ankerlüftung 254.
 —, Ankerknoten 253.
 —, Ankerrückwirkung 265.
 —, Ankerstreuung 268.
 —, Ankerwicklung 251; s. a. Anker.
 —, —, Anordnung 255.
 —, —, Ausgleichleitungen 260.
 —, —, Darstellung 256.
 —, —, Feldverschiebung 256.
 —, —, Formeln 258.
 —, —, Gangzahl 257.
 —, —, Isolation 252.
 —, —, Material 252.
 —, —, parallel arbeitende Teile 260.
 —, —, Schritt 256.
 —, —, Stirnverbindungen 260.
 —, —, Stromverdrängung 279.
 —, —, Zahl der Umgänge 258.
 —, Arten 245.
 —, Aufbau, mechanischer 245.
 —, Ausnutzungsgrad 280.
 —, Bürsten 261, 262.
 —, —, Übergangswiderstand 263.
 —, Bürstenhalter 263.
 —, Bürstenträger 264.
 —, Feld, magnetisches 266.
 —, Felderregung 250.
 —, Feldmagnete für Turbodynamos 250.
 —, Flanschenschluß 246.
 —, Frequenz 282.
 —, Funkenbildung, Kommutator 262.
 —, Gehäuse 247.
 —, Grundplatten 246.
 —, Induktion, magnetische 283.
 —, Induktionsfluß, Bestimmung 267.
 —, Klemmen 265.
 —, Kommutator 261.
 —, —, Umfangsgeschwindigkeit 282.
 —, Kommutatormaschinen 265.
 —, —, Drehmoment 278.
 —, —, Verluste 279.
 —, —, Wirkungsgrad 279.
 —, kommutierendes Feld 274.
 —, Kommutierung 269.
 —, —, mechanische Bedingungen 277.
 —, —, mit Bürstenverschiebung 275.
 —, —, ohne Bürstenverschiebung 276.
 —, —, lineare 270.
 —, —, verfrühte 271.
 —, —, verspätete 271.
 —, —, bei Wechselstrom 276.
 —, Kommutierungstheorie 273.
 —, Kompensationswicklung 276.
 —, Kugellager 248.
 —, Kühlung 246, 250.
 —, Kurzschließer 265.
 —, Kurzschlußdauer 270.
 —, Lager 248.
 —, Lagerschild 246.
 —, Lüftung 284.
 —, Magnet, Induktion 283.
 —, Magnet, Feld 266.

- Dynamomaschinen, Maschinenteile 245.
 —, Massenausgleich 247.
 —, Normalform 283.
 —, Nutenformen 253.
 —, Plattenschutz 246.
 —, Polbefestigungen 249.
 —, Polköpfe 249.
 —, Poleschuhe 248.
 —, Polzahl 282.
 —, Ringwicklung 251.
 —, Schenkel 248.
 —, Schleifringe 261, 282.
 —, Schleuderprobe 247.
 —, Schmierung 248.
 —, Schnellläufer 282.
 —, Schwungradynamo 247.
 —, Spannung 283.
 —, Spannungsgleichungen 273.
 —, Strom, zusätzlicher 272.
 —, Strombelag 281.
 —, Stromgleichungen 273.
 —, Stromzuführung 261.
 —, Trommelwicklung 251.
 —, Turbodynamos 249.
 —, Verlauf d. magnetischen Linien 265.
 —, Wendepole 269, 276.
 —, Wicklung der Schenkel 250.
 Dynamometer 130.
 Dynatron 76.
 Eckrolle 510.
 Effektbeleuchtung 646.
 Eigenfrequenz 110.
 Eigenschaften, magnetische 41.
 Einankerumformer 374.
 —, ausgeführter 411.
 —, Anlassen 377.
 —, Bau 375.
 —, Leistung 375.
 —, Spannungsregulierung 376.
 —, Verhalten 374.
 —, Wirkungsgrad 376.
 Einführungskopf für Leitungen 493.
 Einheitslampe 603.
 Einheitssicherung 523.
 Einheitszeichen 13, 720.
 Einphasen-Wechselstromleitungen, Berechnung 470.
 Einstellungszeit 122.
 Eisen, el. Gew. 688, 698.
 —, Magnetisierbarkeit 41.
 —, Untersuchung 479.
 —, Unterteilung 221.
 Eisenbahnwagen, Beleuchtung 646.
 —, —, Achsbeleuchtung 648.
 —, —, Bemessung der Anlage 650.
 —, —, Beschreibung von Bauarten 653.
 —, —, durch Batterien 646.
 —, —, nach Brown, Boveri & Co. 654.
 —, —, nach Dick 653.
 —, —, Einzelwagenbeleuchtung 647.
 —, —, nach 'GEZ 654.
 —, —, Einfluß der Zuggeschwindigkeit 651.
 —, —, Fahrtkennlinien 652.
 —, —, Geschwindigkeitzeitlinien 652.
 —, —, durch Maschinen 647.
 —, —, nach Pintsch-Grob 656.
 —, —, nach Stone 656.
 —, —, s. a. Zugbeleuchtung.
 Eisenleitungen 504.
 Ekonomiser 438.
 Elastizitätsgrenze 26.
 Elektrische Feldstärke 47, 59.
 Elektrische Kraftlinien 47.
- Elektrischer Strom 59.
 Elektrisches Feld 47.
 — —, Gesamtenergie 54.
 Elektrizität, atmosph. 709.
 — auf Schiffen 673.
 Elektrizitätsmenge 47.
 —, Einheit 16, 47.
 —, Messung 155.
 Elektrizitätszähler 205; s. a. Zähler.
 —, Beglaubigung 211.
 —, gesetzl. Bestimmungen 211.
 —, Prüfung 210.
 Elektrochemie 681.
 Elektroden 60.
 — für el. Öfen 696.
 — für Elektrolyse 682.
 —, umkehrbare 69.
 Elektrodenpotentiale 71.
 Elektrodynamometer 130, 166.
 Elektroendosmose 703.
 Elektrofutter 562.
 Elektrokolorimeter 131.
 Elektrokultur 703.
 Elektrolyse 681.
 —, Anwendung 693.
 —, wässrige 684.
 Elektrolyte 65.
 Elektrolytischer Zähler 205.
 Elektromagnete 216, 217.
 —, Abkühlungskurven 219.
 —, Drähte, isolierende Umhüllung 217.
 —, Endtemperatur 218.
 —, Erwärmung 217.
 —, Erwärmungskurven 219.
 —, Kreuzquerschnitt 217.
 —, Querschnitt des Eisenkerns 217.
 —, Spulenkasten 217.
 —, Wicklung 217.
 —, —, Formeln 219.
 Elektromagnetische Wellen 98.
 Elektrometer 132.
 —, direkt zeigende 133.
 —, für hohe Spannungen 134.
 —, zur Spanng.- u. Leistungsmessung 168.
 Elektromobile 600.
 Elektromotorische Kraft 59.
 —, Berechnung 70.
 —, Sammler, Messung 212.
 Elektronen 64.
 Elektronenröhre 75.
 — mit 3 Elektroden 76.
 Elektronenstrom, abhängig v. d. Temp. 76.
 Elektrosomose 704.
 Elektrostatisches Feld 48.
 Emailledraht 507.
 Energie, magnetische 81.
 Energiebeziehungen im magnet. Felde 96.
 Energiestrom 97.
 Energieübertragung auf große Entfernng. 477.
 — mit Transformierung 477.
 Energieumsatz mit el. Strom 59.
 Energieverbrauch im Haushalt 663.
 Energieverlust, dielektrischer 49.
 Energieverteilung mit Umformung 477.
 Entladungen, el. 701.
 —, —, stille 701.
 Entmagnetisieren von Eisen 187.
 Entmagnetisierungsfaktor 42.
 Epsteinsches Viereck 182.
 Erdalkalimetalle, el. Gew. 685.
 Erdelektroden, Übergangswiderstände 60.
 Erdleitung 718.
 —, Messungen 203.
 Erdmagnetismus 47.

- Erdmagnetismus, Messung 177.
 Erdmetalle, el. Gew. 685.
 Erdschlußanzeiger 200.
 Erdschlußprüfer 532.
 Erdschlußspule 533.
 Erdschlußstrom, Verminderung 713.
 Erdung, unmittelbare 717.
 Erdungsbügel 505.
 Erdungsdrosselspulen 531
 Erdungsölschalter 532.
 Ergänzungsgrößen 120.
 Erhitzungsarten, elektr. 659, 660, 666, 694.
 Erregung, dielektrische 48.
 Errichtungsvorschriften des VDE 490.
 Erwärmung d. Dynamomasch., Messung 196.
 — — Elektromagnete 217.
 — — Leitungen 486.
 — — Transformatoren, Messung 197.
 Erwärmungsprobe bei el. Masch. 196.
 Erzmetalle, el. Gew. 686.
 Extrastrom 710.
- Fabrikbetrieb** 555.
 Fahrdrachtspannung 565.
 Fahrzeuge, el. betrieben 599.
 Falzdrähte 515.
 Faraday-Maxwellsches Gesetz 86.
 Faradaysches Gesetz 66.
 Färben, elektrolyt. 693.
 Fassungen 518.
 Feinschutz 711.
 Feldbahn 563.
 Feld, elektrisches 47.
 —, elektromagnet. Energiebeziehungen 96.
 —, —, mechanische Kräfte 96.
 —, elektrostatisches 48.
 —, magnetisches 36.
 —, —, el. Strömung 79.
 —, —, geradliniges Solenoid 80.
 —, —, geschlossenes Ringsolenoid 80.
 —, —, Kreisstrom 80.
 —, —, langer, gerader Draht 80.
 —, —, linearer Leiter 80.
 —, —, rasch veränderl. 86.
 Feldstärke, el. 59.
 —, magnet., Messung 178.
 Feldverteilung am Anker, Messung 190.
 Fernmeldeleitungen, Gefährdung 89.
 Fernverteilung 478.
 Fernwirkung, magnetische 35.
 Ferrarismeßgeräte 169.
 Ferrolegierungen, el. Gew. 699.
 Ferrosilizium 698.
 Festigkeit 26.
 —, zusammengesetzte 29.
 Fettfleckphotometer 606.
 Feuersicherheit von Isolierstoff 145.
 Filter, el. 118.
 Flächendichte der Ladung 48.
 Flächenkräfte 97.
 Flammen, loderrnde 646.
 Flammenbogen f. elektro-chem. Zwecke 702.
 Flimmern 609.
 Flimmerphotometer 616.
 Flüssigkeitsbremsen 192.
 Flußkabel 493.
 Formelzeichen 13, 720.
 Formen, galvanoplastische 307.
 Frankesche Maschine 171.
 Freileitungen 497.
 —, Durchhang 504.
 —, Schutzvorrichtungen 505.
 —, Spannweite 504.
 —, Verwendung 497.
- Frequenz, Messung 172, 191.
 Frequenztransformator 243.
 Frequenzumformer 374.
 Funken 79.
 Funkenentladung f. elektro-chem. Zwecke 702.
 Funkenlöschung 517, 716.
 Funkenstrecke, Örtlichkeit 718.
 —, Schaltung 718.
 Funktelegraphie auf Schiffen 679.
 Fußwärmer 665.
 Futtermittelkonservierung, el. 562.
- Galvanometer** 122.
 —, Arten 122.
 —, ballistische 126, 129.
 —, ballistische Eichung 155.
 —, Empfindlichkeit 123, 129.
 —, Spannungsempfindlichkeit 123.
 —, Stromempfindlichkeit 123.
 —, Wahl 129.
 Galvanometerkonstante, dynamische 123.
 Galvanoplastik 706.
 —, Ausführung 707.
 Galvanostegie 705.
 Galvanotechnik 704.
 —, Regulierung d. Stromes 704.
 —, Schaltung der Bäder 704.
 Gase, selbständige u. unelbst. Strömung 75.
 —, Stromdurchgang 75.
 Gasfüllungslampe 625.
 —, Lichtstromtabelle 636.
 Gasvolumen, Umrechnung 31.
 Gebläse, magnetisches 715.
 Gefahren d. El. u. deren Verhütung 491.
 Gefäße für Elektrolyse 683.
 Gegeninduktion, Starkstrom- u. Fernmelde-
 leitungen 88.
 Gegeninduktivität 81, 88.
 —, Formeln 85.
 —, Messung 159.
 —, Vergleich mit einer Kapazität 160.
 Gegenschaltung 556.
 Gesetz von Biot-Savart 80.
 — von Faraday 66.
 — von Faraday-Maxwell 86.
 — von Joule 64.
 — von Kohrausch 66.
 — von Lambert 604.
 — von Lenz 89.
 —, Ohmsches 59.
 Gewicht 723.
 —, englisches 17.
 — von Drähten 1.
 Gittermast 498.
 Glatte Anker, Induktion 88.
 Gleichrichter 76, 378.
 —, elektrolytischer 379.
 —, oszillierender 378.
 —, umlaufender 378.
 Gleichstromdynamos 284.
 —, Angehen 287.
 —, Beharrungszustand 289.
 —, Charakteristiken 288.
 —, Doppelschlußmaschine 287.
 —, Doppelschlußwicklung 289.
 —, Drehmoment 286.
 —, Dreileitermaschinen 291.
 —, Eigenregung 287.
 —, EMK 285.
 —, Fremderregung 287.
 —, Hauptgleichungen 285.
 —, Kommutatormasch. 285.
 —, Compoundmaschine 287.

- Gleichstromdynamos, Leistung 286.
 —, Maschine mit gemischter Wicklung 287.
 —, Nebenschlußmaschine 286.
 —, Parallelschaltung 292.
 —, Querfeldmaschine 290.
 —, Regulierwiderstände 290.
 —, Reihenschaltung 292.
 —, Reihenschlußmasch. 286.
 —, Schaltung 286.
 —, Selbsterregung 286.
 —, Spannung 286.
 —, Spannungsteiler 291.
 —, Stabilität 290.
 —, Stromerzeuger 287.
 —, tote Geschwindigkeit 289,
 Gleichstromleitungen 461.
 —, Berechnung auf Spannungsschwankung 462.
 Gleichstrommotoren 293.
 —, Anlassen 298.
 —, Anlasser, Abstufung 299.
 —, —, Schaltung 301.
 —, ausgeführte 399.
 —, Doppelschlußmotoren 293.
 —, Doppelschlußschaltung 298.
 —, Durchgehen 295.
 —, Einteilung 293.
 —, fremderregte 293, 294.
 —, Geschwindigkeit, kritische 296.
 —, Geschwindigkeitsreglung 294, 295, 298.
 —, Leonardschaltung 294.
 —, Nebenschlußmotoren 293, 296.
 —, Reihenschlußmotoren 293, 296.
 —, Umkehrung 293, 298.
 —, Umsteuerung 294.
 Gleislose Bahnen 598.
 Glimmentladung 75, 77.
 — in verdünnten Gasen 78.
 Glimmlampe 78, 629, 630.
 — für Signalzwecke 203.
 Glimmlichtoszillograph 78, 174.
 Glimmverluste 77.
 Glocke für Lampen 638.
 Glühlampen 624.
 —, Abhängigkeit der Lichtstärke u. des spezif. Verbrauchs von der Brennzeit 626.
 —, Arten, Vergleich 626.
 —, mit Kohlenfaden 624.
 —, mit Wolframglühkörpern 624.
 —, Prüfung 627.
 —, wirtschaftlicher Betrieb 628.
 Gojunco-Installationssystem 513.
 Gold, el. Gew. 668.
 Goldblattelektroskop 134.
 Grobschutz 711.
 Größen, komplexe, Umwandlung 4.
 Grubenbahnen 549, 598.
 Grubenkabel 493.
 Grubenlokomotiven 598.
 Grubenräume, schlagwettergefährliche 550.
 Grundgrößen, photometrische 602.
 Grundquerschnitt 471.
 Grundschwingung 101.
 Grundstück für ein Kraftwerk 440.
 Grundtaxentarife 454.
Haardrähte 63.
 Hackethaldrath 507.
 Handelsschiffe, el. Antrieb 680.
 Handradsteuerung 555.
 Hängeisolator 503.
 Hauptlagen, magnetische 35.
 Hauptschachtfördermaschinen 546.
 Hauptschachtventilatoren 548.
 Hausanschlüsse 447.
 Hautwirkung 90.
 Heavisidesche Regel 113.
 Hebelschalter 516.
 Hebezeuge 552.
 Heizapparate, Energieverbrauch 663.
 Heizen, el. 659.
 Heizgeräte, Aufbau 660.
 — im Haushalt 662.
 Heizkörper 659.
 Heizöfen 662, 664.
 Heizplatten 661, 664.
 Heizung für Schiffe 676.
 — in Gewerbe u. Industrie 665.
 Helligkeit 604.
 Hitzdrahtapparate 169.
 Hitzdrahtinstrumente 131.
 Hitzdrahtspiegelinstrumente 131.
 Hochofenaufzüge 552.
 Hochspannung, Vorteil 462.
 Hochspannungsanlagen, Schutzmaßnahmen 540.
 Hochspannungsapparate 525.
 Hochspannungsisolator 502.
 Hochspannungskabelnetze, Schutz gegen Überspannungen 543.
 Hochspannungsnetze, Bau 541.
 Hochspannungsschaltanlagen 538.
 Höchstverbrauchsmesser 209.
 Holzleisten 509.
 Horizontalstärke des Erdmagnetismus, Messung 177.
 Hörnerableiter 531.
 Hörnerschutzvorrichtungen 716.
 Hubmagnet 223.
 — mit Drehbewegung 224.
 — mit geradliniger Bewegung 224.
 Hüttenwerke 550.
 Hüttenwerkmaschinen 552.
 Hypochlorit-Alkali, el. Gew. 692.
 Hysterese 38.
 —, Untersuchung 186.
 Hystereseschleife 179.
 Hystereseverlust 44, 184.
Induktion 40.
 — aus Drehstromanlagen 88.
 —, elektromagnetische 86.
 —, magnetische 37.
 —, unipolare 87.
 — an Wechselstrombahnen 88.
 Induktionsfluß 37.
 Induktionsgesetz 86.
 Induktionslinien 37.
 Induktionsmotor für Einphasenstrom 352.
 Induktionsmotoren s. Wechselstrom-Ind.
 Induktionsöfen 696.
 Induktionsröhre 37.
 Induktionszähler 208.
 Induktivität s. Selbstinduktivität.
 Industrie, landwirtschaftl. 562.
 Industriebahnen 598.
 Inklination 47.
 Innenanlagen, Kosten 448.
 Innenräume, Beleuchtung 640.
 Ionenbeweglichkeit 67.
 Ionenwanderung 66.
 Isolierung 708.
 Isolationsfehler, selbsttätige Meldung 201.
 Isolationskontrolle, dauernde 200.
 Isolationsmessung in el. Anlagen 197.
 — an stromführenden Leitungen 200.
 — stromloser Leitungen 198.
 Isolationsprüfer 198.

- Isolationswiderstand gestreckter Leiter 60.
 —, Messung 190.
 —, von Platten 147.
 —, Temperatureinfluß 74.
 —, Umrechnung 74.
 —, Zahlenwerte 73.
 Isolatoren 499, 501.
 — mit Funkenableiter 499.
 — mit Unterbrecher 499.
 — mit Sicherung 499.
 Isolatorenstützen 503.
 Isolierfestigkeit 190.
 Isolieröle 56.
 Isolierrohre 511.
 Isolierrollen 509.
 Isolierstoffe 71.
 —, feste 72.
 —, flüssige 71.
 Isolierwiderstand für Wechselstrom 75.
 Isthmismethode 183.

 Jochmethode 179.
 Jodoform, el. Gew. 693.
 Joubertsche Scheibe 173.
 Joules Gesetz 64.
 Jungfräuliche magn. Kurve 184.

 Kabel, Abzweigmuffen 494.
 —, Bauart 493.
 —, Endverschlüsse 494.
 —, unterirdische, Erwärmung 487.
 —, Verbindungsmuffen 494.
 —, Verlegungsarten 491.
 Kabelgarnituren 494.
 Kabelkästen 496.
 Kabelleitungen 491.
 Kabelquerschnitte 492.
 Kabelschutzsystem 202.
 Kadmium, el. Gew. 686.
 Kalender 556.
 Kalzium, el. Gew. 685.
 Kalziumkarbid, el. Gew. 698.
 Kanalofen 695.
 Kapazität, el. 50.
 —, absolute Messung 162.
 —, Betriebskapazitäten 52.
 —, Doppelleitungen, oberirdische 52.
 —, Fernsprechkabel 52.
 —, der Leitungen 51.
 —, Messung durch Resonanz 162.
 —, — in der Wheatstoneschen Brücke 161.
 —, in Reihe mit einem Widerstand 103.
 —, von Spulen 162.
 —, Teilkapazitäten 52, 53.
 —, Telegraphenkabel 52.
 —, Vergleich 160.
 —, Werte 51.
 —, zwischen Hochspannungsanlagen und Fernmeldeleitungen 53.
 Kapazitätswiderstände 718.
 Kapillarelektrometer 134.
 Kappenhängeisolator 503.
 Karbide, el. Gew. 698.
 Karborundum, el. Gew. 698.
 Kaskadenumformer 374, 377.
 —, ausgeführter 410.
 Kataphorese 703.
 Kettenleiter 117.
 Kirchhoffsche Sätze 60.
 Kleintransformator 626.
 Klemmenspannung 60.
 —, Messung 212.
 Klemmrolle 510.
 Klischee, Herstellung 707.

 Knickfestigkeit 27.
 Kobalt, el. Gew. 688.
 Kochapparate, Energieverbrauch 663.
 Kochen, el. 659.
 Kochgeräte im Haushalt 662.
 Kochtopf 661.
 Koerzitivkraft 38.
 —, Messung 177.
 Kohlenwinden 678.
 Kohrauschsches Gesetz 66.
 Kolbendampfmaschine 435.
 Kommandoapparate 678.
 Kommutatormaschine EMK 277.
 Kommutierungskurve 184.
 Kompensationsapparat 153.
 Kompensationseinrichtungen, technische 154.
 Kompensationsmethode für Wechselstrom 171.
 Kompensator 142.
 —, komplexer 171.
 Komplexe Rechnung 105.
 Kondensator 531.
 —, Schaltungsweisen 51.
 —, parallel zur Drosselspule 104.
 Kontaktvoltmeter 203.
 Kontrastphotometer 608.
 Korona 77.
 Kräfte, mech., el. Ursprungs 54.
 —, —, im elektromagnet. Felde 96.
 Kräftezusammensetzung 24.
 Kraftfluß 37.
 Kraftlinien 37.
 Kraftlinienmenge, Messung 177.
 Kraftmaschinen 435.
 Kraftübertragung, el. 544.
 —, —, Eigenschaften der Stromarten 544.
 —, —, Zweck u. Vorteile 544.
 Kraftwerk, Anlage 440.
 —, Anordnung der Anlagen 441.
 —, Ausnutzung 444.
 —, Betriebsführung 444.
 —, Betriebskosten 442.
 —, für Drehstrom 442.
 —, elektrisches 435.
 —, für Gleichstrom 441.
 —, Kohlenzufuhr 441.
 —, Statistik 444.
 —, Wasserabfluß 440.
 —, Wasserbeschaffung 440.
 —, Wirtschaftlichkeit 442.
 Krane 553, 677.
 Kreis, gekoppelter, als Siebkette 119.
 —, magnetischer 45, 220.
 Kreisdiagramm, Bestimmung 196.
 Kreiselkompaß 678.
 Kreuzrolle 510.
 Kreuzspulenapparat 140.
 Kriechweg 74.
 Kryptol 659.
 Küche, el. 664.
 Kugelfunktenstrecke 56.
 Kupfer, el. Gew. 686, 700.
 Kupferleitungen 504.
 Kupfervoltmeter 135.
 Kuppelhorizont 641, 642.
 Kurbelkästen 138.
 Kurven, periodische, Darstellung durch Fouriersche Reihen 102.
 Kurzschlußgröße 107.

 Ladewinden 677.
 Ladungen, atmosphär. 709.
 —, —, vorbeugende Mittel 712.

- Lambertsches Gesetz 604.
 Lampen, el. 623.
 —, Ausrüstungen 638.
 —, Entfernung, gegenseitige 640.
 Landwirtschaft, el. Betrieb 558.
 —, —, Kleinkraftmaschinen 560.
 Lasthebemagnet 224.
 Leerlaufgrößen der Leitungen 107.
 Leerlaufverbrauch, Berechnung 456.
 Legierungen, unmagnetische 42, 44.
 Leichtmetalle, el. Gewinnung 684.
 Leistung 106.
 — bei el. Masch., Messung 190.
 —, mechanische, Messung 192.
 — des Wechselstroms 100.
 Leistungsfaktor 105.
 —, Messung 196.
 Leistungsmesser, dynamometrische 167.
 —, Schaltung 164.
 Leistungsmessung bei Drehstrom 165.
 — mit dem Elektrometer 168.
 — mit drei Spannungsmessern 166.
 — mit drei Strommessern 166.
 — bei Wechselstrom 164.
 Leistungsschwankung 461.
 Leistungsverlust 459, 471.
 Leistungswage 193.
 Leistungswirkungsgrad 459.
 Leiter, ausgedehnte, Stromverteilung 60.
 —, lineare 59.
 Leitfähigkeit der flüssigen Isolierstoffe 71.
 —, elektrolytische 65.
 — von Gesteinen 73.
 — wässriger Lösungen 65.
 Leitung, Aufgaben 458.
 —, Kosten 489.
 — des Stromes 458.
 —, Wirtschaftlichkeit 489.
 Leitungen, Belastungsströme 488.
 —, blanke 507.
 —, Ersatzstoffe 508.
 —, Erwärmung 64, 486.
 — für Hausinstallationen 478.
 — — —, Erwärmung 486.
 — in Innenräumen 507.
 —, isolierte 507.
 — mit erhöhter Sicherheit 506.
 Leitungsanlage, Berechnung 545.
 Leitungsberechnung, Grundgrößen 458, 460, 461.
 —, —, für Wechselstrom 469.
 — auf Spannungsschwankung u. Leistungsverlust 476.
 Leitungsblißableiter 709.
 Leitungsdraht 504.
 Leitungsnetz, Ausgleichleitungen 468.
 — für einphasigen Wechselstrom 472.
 —, Entwerfen 469.
 —, Speiseleitungen 468.
 —, Stromverteilung 465.
 —, Vorausberechnung 467.
 Leitungsnormen 508.
 Leitungsstrang, beiderseitig gespeister 465.
 —, einfacher, belasteter 463, 470.
 —, in Dreieckschaltung belasteter 472.
 —, verteilt belasteter 463, 472.
 Leitungsträger 497.
 Leitungsverlegung 509.
 —, offene 509.
 Leitungsverzweigungen 464.
 Leitwert, el. 16, 59, 721.
 Lenzsches Gesetz 89.
 Leonardschaltung 545, 556.
 Licht, el. Erzeugung 623.
 Lichtbogen 75, 78.
 —, Charakteristik 78.
 Lichtbogenöfen 694.
 Lichtbogensicherheit von Isolierstoffen 146.
 Lichtfarbe 631.
 Lichtmessung 601.
 Lichtstärkeeinheit 15, 602.
 Lichtstreifen 640.
 Lichtstrom, Messung 617.
 —, Unterteilung 640.
 Lichtstromkugel 633.
 Lichtstromverfahren 633.
 Lichtverteilung 637, 638.
 —, Bestimmung 617.
 —, räumliche 618.
 Lichtverteilungskörper 618, 619.
 Lichtverteilungskurve 619.
 Lineare Leiter, Induktion 88.
 Lokomotivzüge 568.
 Löschdrossel 713.
 Löschttransformator 713.
 Luftdämpfung 127.
 Lumineszenzleuchten 623.
 Lyprokabelschutz 202.
Magnesium, el. Gew. 685.
 Magnete, Alterung 34.
 —, haltbare 34.
 —, Herstellung 33.
 —, Temperaturkoeffizient 34.
 —, Tragkraft 34.
 —, Zugkraft 223.
 Magnetische Anziehung u. Abstoßung 34.
 — Arbeit 36.
 — Aufnahmefähigkeit 37.
 — Brücke 180.
 — Dichte 37.
 — Durchlässigkeit 37.
 — Eigenschaften 41.
 — Fernwirkung 35.
 — Hauptlagen 35.
 — Induktion 37.
 — Kraft, Äußerungen 34.
 — Kraftlinien, Berechnung 45.
 — Messungen 176.
 — — bei Maschinen 190.
 — Spannung 46, 79.
 — —, Berechnung 81.
 — Stoffe 33.
 — Streuung, Messung 190.
 — Umlaufspannung 79, 81.
 — Verteilung 34.
 Magnetischer Kreis 45, 220.
 — Leitwert 45.
 — Widerstand 46.
 Magnetisches Feld 36.
 — — d. Dynamomaschine 266.
 — — für jeden Punkt 36.
 — —, Maß 37.
 — Moment 35.
 — —, Bestimmung 176.
 — —, Maß 35.
 — Potential 36.
 Magnetisierbarkeit von Eisensorten 43.
 Magnetisierung 34.
 —, Stärke 36, 177.
 Magnetisierungskurve 37, 38, 39.
 Magnetisierungsstrom 81.
 Magnetismus 33.
 — eines Poles, Maß 35.
 —, spezifischer 35.
 —, Verteilung 33.
 Magnetmotorzähler 207.
 Magnetonadel 37.

- Magnetnadel, Schwingungsdauer 47.
 Magnetometer 176.
 —, astasiertes 176.
 Magnetomotorische Kraft 80, 81.
 — —, Berechnung 81.
 Magnetron 76.
 Magnetstrom 81.
 Manteldrähte 515.
 Mantelrolle 510.
 Maschinen, el., ausgeführte, Beispiele 388.
 —, landwirtschaftl. 561.
 Maß, englisches 17.
 Masse 723.
 Maste 497.
 — für Freileitungen 498.
 — für Hochspannung 498.
 Mastschalter 530.
 Mathematische Zeichen 6.
 Mehrfachsicherungen 523.
 Mehrleiterfaktor 474.
 Mehrleitersysteme 472.
 Meßgeräte, Benennungen 148.
 —, schreibende 134.
 —, Symbole 149.
 Meßinstrumente für Hochspannung 532.
 Meßkunde, el. 120.
 Messungen an Akkumulatoren 212.
 — in el. Anlagen 197.
 — an Erdleitungen 203.
 —, Genauigkeit 120.
 —, Hilfsmittel 120.
 —, magnetische 176.
 — an el. Maschinen 188.
 — an Sammlern 212.
 Meßwandler 243, 530.
 Metallgewinnung, elektrolytische 683.
 Metallniederschläge 705.
 Milchglasscheiben 609.
 Minutenschalter 453.
 Mittelleiter, blanker 475.
 Moment, magnetisches 35.
 —, —, Maß 35.
 Moore-Licht 78, 629.
 Motoren, el., Geschwindigkeitsregelung 566.
 —, Regelung der Drehzahl 545.
 Motorgenerator 374.
 —, ausgeführter 407.
 Motorwagenzüge 568.
 Motorzähler 206.
 Muffelöfen 672.
 Multohm 64.
 Munitionswinden 678.
 Münzzählertarife 455.

Nachwirkung, dielektr. 49.
 Nadelapparate 127.
 Nadelgalvanometer, Empfindlichk. 123, 124.
 Näherungsformeln 7.
 Nahtschweißung 671.
 Nebenwiderstand für Strommesser 151.
 — für Wechselstrom 169.
 Nickel, el. Gew. 688.
 Niederspannungsisolator 493.
 Nietenwärmer 671.
 Nietverbinder 493.
 Nomographie 18.
 Normalelement 136.
 — von Clark 136.
 — von Weston 136.
 Normalien des VDE 491.
 Normallampe 603.
 Normalisierungen 522.
 Normaltemperatur 722.
 Notbeleuchtung 646.

 Nulleiter, blanker 476.
 Nullkurve 184.
 Nutenanker, Induktion 88.
 Nutenschluß 254.
 Nutzbremmung 567.

Oberflächenwiderstand 74.
 —, Messung 145.
 Oberschwingungen 101.
 Öfen, el. 694.
 —, —, Betrieb 697.
 —, —, in der chemischen u. metallurg. Industrie 697.
 Ohmsches Gesetz 59.
 — —, Erläuterung 225.
 — — für den magnetischen Kreis 81.
 — — für magn. Wege 46.
 Ölshalter 517, 526.
 Öltransformator 231.
 Oszillographen 174.
 Oxydationsmittel 68.
 Oxydationspotentiale 69.
 Ozon, el. Gew. 701.
 Ozonapparate 701.

Panzergalvanometer 125.
 Panzerrohr 511.
 Papierfabriken 555.
 Patinierung 708.
 Patronensicherungen 521.
 Pauschaltarife 452.
 Pendelzähler 206.
 Perkarbonat, el. Gew. 690.
 Permeabilität 37, 40.
 —, reversible 40.
 Permeameter 181.
 Persulfosalze, el. Gew. 690.
 Persulfosäure, el. Gew. 690.
 Pflügen 562.
 Phasenmesser 171.
 Phasenschieber 362.
 —, ausgeführter 417.
 Phasenverschiebung, Messung 171.
 Photometer 606.
 Photometerbank, Aufstellung 609.
 Photometrie 602.
 —, Grundgesetze 603.
 —, Mittel zur Abgleichung 608.
 —, objektive 606.
 —, subjektive 606.
 — verschiedenfarbigen Lichtes 615.
 Polardiagramm d. Wechselstromgrößen 103.
 Polarisation 68.
 Porzellanisolatoren, Prüfung 147.
 Potential, el. 59.
 —, magnetisches 36.
 Potentialmessung 152.
 Probestab 179.
 Pronyscher Zaum 192.
 Propellerantrieb 679.
 Prüffeldeinrichtung 188.
 Prüfspule 178.
 Prüfung von Meßgeräten 172.
 — eines Stromwandlers 173.
 Prüfungsvorschriften des VDE 491.
 Prüfzeichen des VDE 524.
 Pufferbatterien 484.
 Pufferung 484.
 —, Lancashire-Schaltung 485.
 —, Piranische Schaltung 485.
 — bei Wechselstrom 485.
 — — —, Schrödersche Schaltung 486.
 Pulfrichsches Stereophotometer 617.
 Punktschweißung 670.

- Quadrantenelektrometer** 132.
 —, Messung 133.
 —, Schaltung 133.
Quecksilber, el. Gew. 686.
Quecksilberdampfgleichrichter 379.
 —, ausgeführt 418.
Quecksilberdampflampe 628.
Quecksilbermotorzähler 207.
Querfeldmaschine 290.
Querschnitt von Drähten 1.
Querzusammenziehung 26.
- Raffination** 683.
Rauchglasscheiben 609.
Raumdichte der Ladung 48.
Raumheizung 664.
Raumkräfte 96.
Raumladung 76.
Raumwinkelkugel 633.
Rechnung, komplexe 105.
Reduktionsmittel 68.
Reduktionspotentiale 69.
Reduktor 626.
Reflektor 638.
Reflexion 605, 638.
Regel von Heaviside 113.
Registrierapparate 134.
Regler, selbsttätiger 382.
 —, träger 383.
 —, Eilregler 383.
 —, Schnellregler 382.
 —, — von Brown, Boveri & Cie 384.
 —, von Tirrill 383.
Regulierwiderstände 381.
 —, Aufbau 381.
 —, Materialbeanspruchung 387.
 —, Widerstandsmaterial 387.
Reinigen, elektrolyt. 693.
Remanenz 38.
Resonanzfrequenz 110.
Resonanzspannung 710.
Rheostaten 138.
Richtersche Formel f. Hystereseverlust 45.
Richtungsrelais 529.
Rillenisolator 510.
Ringbolzensicherung 521.
Rohrdrähte 515.
Röhrenlampen 623.
Rohrsystem von Peschel 513.
Rohrverlegung 511.
Rollgänge 552.
Röntgenstrahlen 76.
Rückarbeitsverfahren 194.
Rundhorizont 642.
- Saitengalvanometer** 127.
Sammler 419; s. a. Bleisammler.
 —, Abkürzung des Maschinenbetriebes 432.
 —, alkalischer 427.
 —, —, Aufbau 428.
 —, —, Bedienungsvorschrift 431.
 —, —, chemischer Vorgang 427.
 —, —, Elektrolyt 428, 431.
 —, —, elektromotorische Kraft 428.
 —, —, Füllung 431.
 —, —, Herstellungsfirmen 427.
 —, —, Inhalt 430.
 —, —, Kapazität 430.
 —, —, Klemmenspannung 428.
 —, —, Ladekurve 429.
 —, —, Ladung 431.
 —, —, Spannung 430.
 —, —, Überladungen 429, 431.
 —, —, Wirkungsgrad 430.
- Sammler, Ausgleich von Spannungsschwankungen** 432.
 —, Ausnutzung einer gleichmäßigen Betriebskraft 432.
 — in el. Bahnanlagen 591.
 — in Dreileiteranlagen 481.
 — für Fahrzeuge 599.
 — als Gleichstromtransformatoren 433.
 —, Größe einer Batterie 433.
 —, Ladung in einer Reihe 481.
 —, — in zwei Reihen 480.
 —, — u. Entladung 478.
 —, — unter Spannungserhöhung 480.
 —, Micka-Schaltung 481.
 — zur Notbeleuchtung 646.
 —, Pufferbatterie 432, 484, 591.
 —, Sicherung des Betriebes gegen Störung 432.
 —, Spannungskurve 213, 214.
 —, technische Anwendungen 432.
 —, tragbare Batterien 433.
 — in Verteilungsanlagen 478.
 —, Verwendungszwecke 433.
 — zur Zugbeleuchtung 646.
 — in Zweileiteranlagen 480.
Sättigungsstrom 76.
Sauerstoff, el. Gew. 689.
Schachtkabel 493.
Schachtöfen 695.
Schaltanlagen 533.
 — für Hochspannung 535, 537, 540.
 — für Niederspannung 534.
 — zur Stromverteilung 537.
Schalter für Hochspannung 526.
Schaltheis für 100 kV 538.
Schalttafelinstrumente 202.
Schaltung für el. Öfen 697.
Schaltwalze 554.
Schatten 640.
Schattigkeit 631.
Scheingrößen 104.
Scheinwerfer für Schiffe 676.
Scheitelwert des Stromes 99.
Scherung, magn. 179.
Schiffe, el. Anlagen 673.
Schiffsfernsprecher 678.
Schiffskreisel 678.
Schirmwirkung des Eisens 46.
Schlagbiegefestigkeit, Bestimmung 144.
Schlagweite 57.
Schlüpfung, Messung 191.
Schlußjoch 180.
Schmelzflußelektrolyse 683.
Schmelzpunkte 31.
Schmelzsicherungen 520.
Schmiedeeise 671.
Schraubsicherungen 520.
Schraubverbinder 493.
Schreibende Instrumente 202.
Schubfestigkeit 26.
Schubzahl 26.
Schutznetze 505.
Schutzring 147.
Schutzringelektrometer 132.
Schutzschalter 117.
Schutzvorrichtungen mit Hilfsschaltern 716.
 — mit Lichtbogen 715.
 — mit magnetischem Gebläse 714.
 — mit mehreren Funkenstrecken 714.
Schwachstromisolator 493.
Schweißen, el. 666.
 —, —, nach Benardos 666.
 —, —, nach Lagrange u. Hoho 671.
 —, —, nach Slawianoff 666.

- Schweißen, el. nach Zerener 667.
 Schwermetalle, el. Gew. 686.
 Schwingungen, harmonische 101.
 Schwingungsdauer 122.
 Schwingungsröhre 76.
 Seilbremse 192.
 Sektorscheiben, rotierende 609.
 Sekundärnetz 477.
 Selbstinduktivität 81, 88.
 —, Formeln 82.
 —, Messung 156—159.
 — in Reihe mit einem Widerstand 103.
 Selbstverkäufer f. el. Strom 210.
 Senkbremse 554.
 Sicherungen für Hochspannung 530.
 Sicherungselbstschalter 524.
 Siebkette 118.
 Siedepunkte 31.
 Signalapparate für el. Anlagen 202.
 Signierapparate 672.
 Silber, el. Gew. 687.
 Silbervoltmeter 135.
 Silit 660.
 Silizide, el. Gew. 698.
 Silizium, el. Gew. 698.
 Siliziumkarbid, el. Gew. 698.
 Siloxikon, el. Gew. 698.
 Silundum 660.
 —, el. Gew. 698.
 Sinusbusssole 124.
 Société des Accumulateurs Fixes et de Trac-
 tion 427.
 Spannung, el. 48.
 —, magnetische 46.
 —, mech. 26.
 —, bei el. Maschinen, Messung 190.
 —, hohe, Messung durch Funkenschlag-
 weite 154.
 Spannungsänderung bei Transformatoren,
 Messung 197.
 Spannungsanzeige durch Signallampen 203.
 Spannungsleitungen 114.
 Spannungsmesser, magnetischer 178.
 Spannungsmessung 148.
 — durch direkt zeigende Apparate 151.
 —, Kompensationsmethode 152.
 Spannungsreihe, thermoelektrische 64.
 Spannungsschwankung 461.
 Spannungssicherungen 709, 711.
 Spannungsteiler 241, 291.
 Spannungsteilung 476.
 Spannungsverteilung im Sammler 215.
 Spannungswandler 169, 243, 530.
 Spannungszahlen (mech.) 29.
 Spartransformator 240, 626.
 Spiegelablesung 121.
 Spiegeldynamometer 130.
 Spiegelgalvanometer 129.
 Spills 677.
 Spinnereien 557.
 Spiraldrahtlampen 625.
 Spitzenzähler 210.
 Sprechverkehr, Störung 89.
 Spreizkeil 254.
 Sprühen 77.
 Spulen, Messung d. Kapazität 162.
 Spulenfluß 221.
 Spulenmessung 162.
 Stäbchen der Netzhaut 601.
 Staffellung, soziale, der Strompreise 456.
 Stahl, el. Gew. 698.
 —, Magnetisierbarkeit 41.
 Stahl-Aluminiumleitungen 504.
 Stammfunktion 114.
 Stärke der Magnetisierung 36.
 Statik 24.
 Steckdose 519.
 Steckvorrichtung 517, 518.
 Steinmetzsche Formel 45.
 Stereotyp, Herstellung 707.
 Sterne 646.
 Steuerrudermaschinen 677.
 Stiazähler 205.
 Stickoxyd, el. Gew. 702.
 Stöpselkästen 138.
 Störungen des Fernsprechbetriebes 54.
 Strahlung, Gesetz 623.
 —, Nutzeffekt 623.
 Straßenphotometer 611.
 Streufluß 222.
 Streuung, magnetische 222.
 Streuziffer 31.
 Strom, el. 59.
 —, veränderlicher 99.
 —, sinusförmiger 100.
 —, magnetisches Feld 79.
 Stromanzeige durch Signallampen 203.
 Stromart für el. Öfen 697.
 Strombegrenzer 205, 452.
 Strombelag 16, 722.
 Stromdichte u. Spannung, wirtschaftlich
 günstigste 489.
 Stromerzeuger, asynchroner 352.
 —, ausgeführte 389.
 Stromkurve, Analyse 173.
 —, Aufnahme 173.
 —, Verzerrung 226.
 Stromleitung, Wesen 64.
 Stromlieferung, geschäftliche Bedingungen
 447.
 —, Verträge 447.
 Strommesser, dynamometrische 167.
 Strommessung 148.
 — mit direkt zeigenden Apparaten 151.
 — mit Kompensator 153.
 — bei el. Maschinen 190.
 — durch Thermoelemente 132.
 Strompreise 450.
 Stromstärke, Mittelwerte 99, 100.
 Stromstoß, Messung 155.
 Stromtarife 450.
 Strömungsvorgänge 107.
 —, Induktionsspule 107.
 —, Induktivität, Kapazität, Widerstand in
 Reihe 110.
 —, Kapazität u. Widerstand in Reihe 109.
 — in Stromkreisen einfacher Art 107.
 Stromverteilung 566.
 —, Bestimmung 465.
 — in Leitungen 114.
 Stromwage 130.
 Stromwandler 169, 243, 530.
 —, ausgeführte 417.
 —, Kurzschlusssicherheit 243.
 Stromwirkung, elektrolytische 66.
 Stromzeiglampe 203.
 Strontium, el. Gew. 685.
 Stumpfschweißung 667.
 Stützen 493.
 Stützisolator 510.
 Suszeptibilität 37.
 Systeme el. Bahnen 565.
 Szenenbeleuchtung 641.
 Tabellen:
 Äquivalentleitvermögen 65.
 Atom- u. Äquivalentgewichte u. elektro-
 chem. Äquivalente 67.

- Tabellen: Ausdehnungskoeffizienten 32.
 Beleuchtung, Wirkungsgrad 636, 637.
 — von Innenräumen 640.
 Beleuchtungsstärken 631, 634.
 Dampfkessel 437.
 Dichte 29, 30.
 Dielekt. Verlustwinkel 50.
 Dielektrizitätskonstanten 48, 49.
 Drahttafel 1, 2, 3.
 Durchschlagsspannung 55 bis 58.
 Dynamomaschinen, Wirkungsgrad 280.
 Einankerumformer, EMK 375.
 Einheitszeichen 14, 720.
 Eisen- u. Stahlsorten, magn. Eigenschaften 41, 43.
 Elektrodenpotentiale 71.
 Elektrolytische Verfahren 682.
 Elektronenstrom, Koeffizienten 76.
 Engl. Gewicht u. Maß 17.
 Entmagnetisierungsfaktor 42.
 Ferrolegierungen, el. Herstellung, Kraftverbrauch 700.
 Festigkeitszahlen 28.
 Formelzeichen 14, 720.
 Hystereseverlust 45.
 Ionenbeweglichkeiten 67.
 Isolatorennormen 502.
 Isolierwiderstände 73.
 Kapazität oberird. Doppeltgn. 52.
 Kleinkraftmaschinen, landwirtschaftl. 560.
 Kraftmaschinen, Art u. Größe 439.
 —, Bedarf an Kraftstoff 439.
 Landwirtschaftl. Betriebe 559.
 Leitfähigkeit von Elektrolyten 65.
 Leitungsdrähte 504.
 Lichtbogenweißung 668, 669.
 Lichtstärkeeinheiten 603.
 Lichtstrom 636.
 Lokomotiven, el., der Reichsbahn 570.
 Magn. Eigenschaften v. Eisen u. Stahl 41, 43.
 Mathemat. Zeichen 6.
 Normen für Isolatoren 502.
 Quecksilberdampfplame 628.
 Reduktions- u. Oxydations-Potentiale 69.
 Schiffsanlagen, el. 673.
 Schmelz- u. Siedepunkte 31.
 Spannungsabfall bei el. Bahnen 586.
 Spannungszahlen (mech.) 29.
 Spezifische Wärme 32.
 Spezifischer Widerstand 61, 62.
 Stahlschmelzen, el., Kraftverbrauch 699.
 Steinmetzsche Exponenten 44.
 Straßenbeleuchtung 634.
 Stromkosten f. el. Kochen 663.
 Stromstärken, zulässige 487, 488, 494.
 Stromverbrauch im Haushalt 663.
 Teilkapazitäten von Dreileiterkabeln 53.
 Thermoel. Spannungsreihe 64.
 Tilgung in Kraftwerken 443.
 Tragfähigkeit von Lasthebemagneten 224.
 Trägheitsmomente 25, 26.
 Überlandzentralen, Anlagekosten 563.
 Umrechnungszahlen für Isolierwiderstände 74.
 Umwandlung komplexer Größen 4.
 Verbrennungsmaschinen 439.
 Verdampfungswärme 32.
 Vergleichungsfüssigkeiten für Widerstandsmessungen 43.
 Verlustziffer, magnet. 185.
 Vielfache von 0,735 5.
 Wärmeleitungsvermögen 31.
 Wellenlängen 98.
- Tabellen: Werte von $\operatorname{tg} \lambda$, $\cos \varphi$, $\operatorname{tg} \varphi$ für
 Leitungsberechnung 471.
 — von e^{-x} 8.
 Wirkungsgrad von Dynamomaschinen 280.
 Wolframlampe 626.
 Zersetzungsspannungen 77.
 Tageslicht, künstliches 639.
 Tangensfaktor 471.
 Tangentenbussole 124.
 Tarif 564.
 —, gemichteter 454.
 —, gleitender 455.
 Technische Messungen 188.
 Telephon als Meßinstrument 130.
 Telephonbrücke 203.
 Temperatur 31.
 —, hohe, Messung 64.
 Temperaturleuchten 623.
 Theaterbeleuchtung 641.
 —, Arten 641.
 Theaterblitze 646.
 Thermoel. Kräfte 64.
 Thermogalvanometer 132.
 Thomsonsche Doppelbrücke 142.
 Tiegelöfen 695.
 Topfmagnet 216.
 Torsionsdynamometer 130.
 Torsionsgalvanometer 124.
 Torsionsmagnetometer 177.
 Trägheit, elektromagnetische 89.
 Trägheitsmoment 25.
 Tragsicherheit 26.
 Transformator 228.
 —, allgemeiner 112.
 —, Aufbau, äußerer 230.
 —, Beispiele ausgeführter 414.
 —, Bewicklung 229.
 —, Diagramm 237, 238.
 —, Drehtransformator 233.
 —, Durchschlagsicherung 232.
 —, Eisenkern 228.
 —, Entwurf 239.
 —, Hochspannungsklemmen 232.
 —, Induktion 87.
 —, Isolation 230.
 —, Jahreswirkungsgrad 239.
 —, Kurzschlußsicherheit 230.
 —, Leistung, Einfluß der Frequenz 239.
 —, Luftkühlung, künstliche 231.
 —, —, natürliche 230.
 —, Messung 197.
 —, Ölkühlung 231.
 —, Öltemperatur, Überwachung 232.
 —, Parallel- u. Reihenschaltung 242.
 —, Phasenverschiebung mit Spannungsabfall 237.
 —, Schaltung bei Drehstrom 242.
 —, Scotts Schaltung 241.
 —, Sicherheitsvorkehrungen 232.
 —, Spannungsverlust 237.
 —, Spulenfaktor 235.
 —, Streuung 234.
 —, —, Berechnung 236.
 —, Streuungskoeffizient 234.
 —, Überlastbarkeit 239.
 —, Übersetzungsverhältnis 232.
 —, verschiebbarer 234.
 —, mit einspulgiger Wicklung 240.
 —, Wirkungsgrad 239.
 — von Zwei- auf Dreiphasenstrom 241.
 Transformator muffelöfen 672.
 Transformatoröl 231.
 Transformatorstationen 539.

Transmission 605.
 Trennschalter 529.
 Treppenschaltuhren 453.
 Triebwagen 599.
 Tubusphotometer 611.
Überführungszahlen 66.
 Übergangswiderstand von Bürsten 189.
 —, Erdelektroden 60.
 Überlandzentralen 558.
 —, Abschreibungen 564.
 —, Anlagekosten 563.
 —, Belastungskurve 564.
 —, Tilgung 564.
 —, Wirtschaftlichkeit 563.
 Überschlagsspannungen 710.
 Übersetzungsverhältnis 228.
 Überspannung 68, 115, 227, 710.
 —, vorbeugende Mittel 712.
 Überspannungsschutz durch Glimm- u.
 Büschelentladung 717.
 Überspannungsschutzapparate 531.
 Überstrom 145.
 Überstromauslöser 527.
 Überstromrelais 529.
 Überstromschalter 518.
 Ulbrichtsche Kugel 618.
 Umformer 374.
 —, Arten 374.
 —, Vergleich 378.
 Umformung mit Sammlerbatterien 478.
 Umkehrstrahlen 551.
 Umlaufende Maschinen, Messung 189.
 Ummagnetisierung, Energieverbrauch 184.
 Ungleichförmigkeitsgrad, Messung 191.
 Unipolare Induktion 87.
 Unipolarmaschinen 284.
 Universalklemmen 493.
 Unterputzverlegung 513.
 Unterseeboote 680.
 Untersuchung el. Isolierstoffe, Prüfvor-
 schriften des VDE 143.
 Unterwasserschallsignale 679.
 Valenzladung 16, 724.
 Vektordiagramm 103.
 Vektorenrechnung 9.
 Vektorpotential 80.
 Verantimonierung 706.
 Verbandsvorschriften für Bewertung u.
 Kennzeichnung der el. Lampen 621.
 Verbindungen, unlösliche, anorganische, el.
 Gew. 692.
 Verbleitung 706.
 Verbrauchsmessung 205.
 Verbrennungsmaschinen 438.
 Verdampfungswärme 32.
 Verdriellen der Leitungen 89.
 Vergleichslampe 603.
 Vergoldung 705.
 Verholwinden 677.
 Verkabeln von Freileitungen 89.
 Verkobaltung 706.
 Verkupferung 705.
 Verluste in d. Masch., Messung 195.
 Verlustwinkel, dielektrischer 49.
 —, —, Messung 161.
 Verlustziffer 185.
 Vermessung 705.
 Vernickelung 706.
 Verplatinierung 706.
 Verschiebelokomotiven 598.
 Verschiebung, dielekt. 48.
 Verschiebungsfluß 48.

Verschiebungsstrom 86.
 Versilberung 705.
 Verstählung 706.
 Verstärkerröhre 76.
 Verteilung des Stromes 458.
 —, magnetische 34.
 Verteilungspunkt am Gittermast 498.
 Verzinkung 706.
 Verzinnung 706.
 Vibrationselektrometer 131.
 Vibrationsgalvanometer 130.
 Vielfache von 0,735 5.
 Voltmeter 135.
 Vorteil hoher Spannungen 462.
 Vorwärmer 438.
 Voßsches Photometer 616.
Walzenstraßen 551.
 Walzwerke 550.
 Wanderung der Ionen 66.
 Wanderwellen 54, 116.
 Wärme 31.
 —, Ausdehnungskoeffizienten 32.
 —, spezifische 32.
 Wärmeäquivalent, mech. 721.
 Wärmebeständigkeit von Isolierstoffen, Be-
 stimmung 144.
 Wärmeeinheiten 15, 724.
 Wärmeerzeugung des Stromes 64, 659.
 — durch den Lichtbogen 660.
 — durch Induktion 660.
 Wärmeleitungsvermögen, inneres 31.
 Wasserhaltungen 548.
 Wasserkocher 660.
 Wasserkraftmaschinen 439.
 Wasserstoff, el. Gew. 689.
 Wasserstrahlerder 531, 717.
 Webereien 558.
 Webersches Photometer 610, 615.
 Wechselstrom 99.
 —, Beharrungszustand 114.
 —, harmonische Komponenten 101.
 — von beliebiger Kurvenform 100.
 —, Mittelwert 99.
 —, Umformungen 374.
 Wechselstromgrößen, Polardiagramm 103.
 Wechselstrom-Induktionsmotoren 330.
 —, —, Anlassen 346—350.
 —, —, Anlasser, Abstufung 347.
 —, —, nach Boucherot 347.
 —, —, Bürstenabbevorrichtung 349.
 —, —, Gegenschaltung 349.
 —, —, Kaskadenschaltung 350.
 —, —, Polumschaltung 350.
 —, —, im Primärkreis 347.
 —, —, im Sekundärkreis 347.
 —, —, Stern-Dreieckschaltung 347.
 —, —, Stufenanker 347.
 —, —, Arbeitsweise 331.
 —, —, Aufbau 331.
 —, —, Beispiele ausgeführter 400.
 —, —, Bürstenabbevorrichtung 349.
 —, —, Drehfeld 331.
 —, —, bei Mehrphasenstrom 333.
 —, —, Drehmoment 340.
 —, —, Drehzahl 342.
 —, —, Änderung 343.
 —, —, einphasiger, Anlassen.
 —, —, EMK 335.
 —, —, Gegenschaltung 349.
 —, —, als Generator 351.
 —, —, Heylandsches Kreisdiagramm 338.
 —, —, —, Maßstäbe 341.
 —, —, Induktion, magnetische 335.

- Wechselstrom-Induktionsmotoren, Kaskadenschaltungen 344.
 —, Klemmen 332.
 —, Kompensierung des Blindstromes 350.
 —, Kreisdiagramm 338.
 —, —, Herstellung durch Rechnung 342.
 —, —, durch Versuche 342.
 —, —, Reduktion auf konstante Spannung 344.
 —, —, Kunstphase 352.
 —, —, Kurzschlußläufer 332.
 —, —, Läufer 331, 332.
 —, —, Leistung 341.
 —, —, Leistungsfaktor, primärer 339.
 —, —, Mehrphasenmotoren, Wirkungsweise 337.
 —, —, Polumschaltung 344.
 —, —, Schaltung 332.
 —, —, Schlüpfung 339.
 —, —, Spannung, Grenze 331.
 —, —, Ständer 331.
 —, —, Streuung, Berechnung 336.
 —, —, — zwischen den Zähnen 336.
 —, —, Streuungskoeffizienten 338.
 Wechselstromkommutatormotoren 353.
 —, Arbeitswicklungen 357.
 —, ausgeführte 403.
 —, Bauausführung 373.
 —, Drehmomente 357.
 —, für Drehstrom 358.
 —, Drehstrom-Reihenschlußmotor, Diagramm 359.
 —, —, für Einphasenstrom 364.
 —, —, Diagramm 366.
 —, Erregerwicklungen 357.
 —, Frequenz 373.
 —, Induktionsmotor, allgemeiner 360.
 —, —, regulierbarer 361.
 —, —, großer, Regulierung 362.
 —, Kommutatorwicklung EMKe 355.
 —, Kommutierung 372.
 —, v. Latour, Winter u. Eichberg, Verhalten 369.
 —, magnetische Achse, el. Verstellung 372.
 —, Polzahlen 373.
 —, Reihenschlußmotor, Diagramm 368.
 —, Repulsionsmotor, Diagramm 370.
 —, Schaltungen 354.
 —, X- u. Y-Wicklungen 355.
 Wechselstromkreis, allgemeine Gleichungen 106.
 Wechselstromkurven, Analyse 175.
 Wechselstromleitungen 469.
 Wechselstrommagnet 216.
 Wechselstrommaschinen 302, 321.
 —, Anker, glatte 312.
 —, Ankerfeld 309.
 —, Ankerinduktion 87.
 —, Ankerrückwirkung 308.
 —, Ankerwicklung 304.
 —, —, aufgeschnittene 308.
 —, —, geschlossene 307.
 —, —, Kurzschluß 319.
 —, asynchrone 302.
 —, Ausschaltung des Erregerkreises 314.
 —, Belastungscharakteristik 318.
 —, Blechschnitt 302.
 —, Bruchwicklung 305.
 —, Charakteristik 318.
 —, Dämpfung 323.
 —, Dämpfungswicklung 310.
 —, Diagramm 316.
 —, Diagramm der EMK 317.
 Wechselstrommaschinen. Drehstromwicklung 304.
 —, Drehzahl u. Polzahl 302.
 —, Dreieckschaltung 306.
 —, Eigenschwingungen 322.
 —, erzwingene Schwingungen 323.
 —, Einphasenmaschinen, Wicklung 307.
 —, EMK, bei Leerlauf 310.
 —, —, Vorausberechnung 310.
 —, Erregung 313.
 —, Ganzlochwicklung 304.
 —, Gleichlaufzeiger 326.
 —, Hell- u. Dunkelschaltung 327.
 —, Hochfrequenzmasch. 320.
 —, Kompoundierung 318.
 —, Kurzschlußcharakteristik 318.
 —, Lastverteilung auf parallellaufende Maschinen 327.
 —, Leerlauf 317.
 —, Leerlaufcharakteristik 318.
 —, Leistung, Ungleichförmigkeitsgrad 324.
 —, Leistungslinien 321.
 —, Nutenformen 302.
 —, Nutenstern 305.
 —, Parallelbetrieb 321.
 —, — vieler Maschinen 325.
 —, Parallelschalten 326.
 —, —, selbsttätiges 327.
 —, Pole 303.
 —, Regulierwiderstände 314.
 —, Resonanzmodul 323.
 —, Selbsterregung 318.
 —, Spannungsabfall durch Belastung 318.
 —, Sternschaltung 306.
 —, Strom, nichtsinusförmiger 314.
 —, —, Oberschwingungen 315.
 —, —, sinusförmiger 314.
 —, synchrone 302.
 —, Teillochwicklung 305.
 —, Voreilung 321.
 —, Wicklungsfaktor 315.
 —, Zusatzerregung 318.
 —, Zweiphasenmaschinen, Wicklung 307.
 Wechselstrommessungen 164.
 Wechselstrommotoren 328.
 —, Arten 328.
 —, Asynchronmotoren 328, 330.
 —, Kommutatormotoren 328, 353.
 —, Synchronmotoren 328.
 —, —, Anlassen 329.
 —, —, Kleinsynchronmotor 329.
 —, —, Phasenverschiebung 329.
 —, —, Überlastbarkeit 329.
 —, —, Verhalten 328.
 —, —, Vorzüge u. Nachteile 329.
 Wechselstromwiderstände, Messung 156.
 Weicheisen-Meßapparate 127.
 — — für Wechselstrom 169.
 Wellen, elektromagnet. 98.
 —, fortschreitende 713.
 —, Reflexion 116.
 —, stehende 713.
 Wellenlänge, Zahlenwerte 98.
 Wellenschlucker 118.
 Wendemotorzähler 207.
 Werkzeugmaschinen 556.
 Wheatstonesche Brücke 140.
 — — zum Vergleich von Widerstandsoperatoren 157.
 Wicklung, induktionsfreie 121.
 Widerstand, el. 59.
 —, ausgedehnter Leiter 60.
 —, kleiner, Messung 142.
 —, von el. Maschinen, Messung 189.

- Widerstand, Messung aus Strom u. Spannung 139.
 — in Reihe mit Kapazität 103.
 — — — — Selbstinduktivität 103.
 — e. Sammlers, Messung 212.
 —, spezifischer 61.
 —, Temperatureinfluß 61, 62.
 —, wirksamer 95.
 — von zersetzbaren Leitern 142.
 Widerstände, el. (Rheostaten) 137.
 —, größere, Normalbüchsen 138.
 —, Herstellung 137.
 —, kleine, Herstellung 138.
 Widerstandsheizkörper 659.
 Widerstandskordel 63.
 Widerstandskörper 63.
 —, Drähte 63.
 Widerstandsmaterialien 62.
 Widerstandsmesser 139.
 Widerstandsmessung 139.
 — durch Vertauschung 139.
 Widerstandsmoment 25.
 Widerstandsöfen 695.
 Widerstandsoperator 106.
 Widerstandsätze 138.
 Widerstandsschweißung 667.
 Widerstandszuwachs eines Krarupleiters 95.
 Winkelspiegel 619.
 Wirbelstrombremse 192.
 Wirbelströme 89.
 — in Ankerstäben 90.
 — in Blechen 90.
 — in einem geraden Draht 92.
 — in zylindrischen Spulen 92.
- Wirbelstromverlust 184.
 Wirkgrößen 104.
 Wirkungsgrad el. Masch., Messung 194.
 — von Transformatoren, Messung 197.
 Wiskottreflektor 644.
 Wismutspirale 178.
 Wolframlampe 624.
 Wolkenapparat 643.
- Zähler für besondere Tarife 209.
 Zählergebühren 449.
 Zählerkonstante 210.
 Zählertarife 451.
 Zapfen der Netzhaut 601.
 Zeigerablesung 121.
 Zeigergalvanometer, Arten 127.
 Zeitlinie 103.
 Zeitzähler 205.
 Zellschalter 479.
 Zerit-, s. Cerit-.
 Zersetzungsspannung 68, 71, 681.
 Zink, el. Gew. 686, 700.
 Zinn, el. Gew. 688.
 Zugbeleuchtung 646; s. a. Eisenbahnwagen, Beleuchtung.
 —, Bemessung der Anlage 650.
 —, geschlossene 647.
 —, Kosten 658.
 — für Nebenbahnen 653.
 —, el. Verbrauch 652.
 Zusatztransformator 241.
 Zwischendecklampe 676.
 Zwischenlichtquelle 603.

Die Telegraphentechnik. Ein Leitfaden für Post- und Telegraphenbeamte. Von Geh. Oberpostrat Professor **Dr. K. Strecker**, Berlin. Siebente Auflage. In Vorbereitung

Die Wechselstromtechnik. Herausgegeben von Professor Dr.-Ing.

E. Arnold, Karlsruhe. In fünf Bänden.

Erster Band: **Theorie der Wechselströme.** Von **J. L. la Cour** und **O. S. Bragstad**. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 591 in den Text gedruckten Figuren. (936 S.) 1910. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden 30 Goldmark

Zweiter Band: **Die Transformatoren.** Ihre Theorie, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Von **E. Arnold** und **J. L. la Cour**. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 443 in den Text gedruckten Figuren und 6 Tafeln. (462 S.) 1910. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden 20 Goldmark

Dritter Band: **Die Wicklungen der Wechselstrommaschinen.** Von **E. Arnold**. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 463 Textfiguren und 5 Tafeln. (383 S.) 1912. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden 16 Goldmark

Vierter Band: **Die synchronen Wechselstrommaschinen.** Generatoren, Motoren und Umformer. Ihre Theorie, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Von **E. Arnold** und **J. L. la Cour**. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 530 Textfiguren und 18 Tafeln. (916 S.) 1913. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden 28 Goldmark

Fünfter Band: **Die asynchronen Wechselstrommaschinen.**

1. Teil: **Die Induktionsmaschinen.** Ihre Theorie, Berechnung, Konstruktion und Arbeitsweise. Von **E. Arnold** und **J. L. la Cour** unter Mitarbeit von **A. Fraenckel**. Mit 307 in den Text gedruckten Figuren und 10 Tafeln. (608 S.) 1909. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden 24 Goldmark

2. Teil: **Die Wechselstromkommutatormaschinen.** Ihre Theorie, Berechnung, Konstruktion und Arbeitsweise. Von **E. Arnold**, **J. L. la Cour** und **A. Fraenckel**. Mit 400 in den Text gedruckten Figuren und 8 Tafeln. (676 S.) 1912. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden 26 Goldmark

Arnold-la Cour, Die Gleichstrommaschine. Ihre Theorie, Untersuchung, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Dritte, vollständig umgearbeitete Auflage. Herausgegeben von **J. L. la Cour**. In 2 Bänden.

Erster Band: **Theorie und Untersuchung.** Mit 570 Textfiguren. (740 S.) 1919. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden 24 Goldmark

Zweiter Band: **Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise.** In Vorbereitung

Verlag von Julius Springer in Berlin W 9

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik.

Von Professor Dr. **Gustav Benischke**. Sechste, vermehrte Auflage.
Mit 633 Abbildungen im Text. (698 S.) 1922. Gebunden 18 Goldmark

Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik.

Von Professor Dr. **Adolf Thomälen**, Karlsruhe. Neunte, verbesserte Auflage. Mit 555 Textbildern. (404 S.) 1922. Gebunden 9 Goldmark

Elektrische Starkstromanlagen.

Maschinen, Apparate, Schaltungen, Betrieb. Kurzgefaßtes Hilfsbuch für Ingenieure und Techniker sowie zum Gebrauch an technischen Lehranstalten. Von Studienrat Dipl.-Ing. **Emil Kosack**, Magdeburg. Sechste, durchgesehene und ergänzte Auflage. Mit 296 Textfiguren. (342 S.) 1923.

5,50 Goldmark; gebunden 6,50 Goldmark

Schaltungen von Gleich- und Wechselstromanlagen.

Dynamomaschinen, Motoren und Transformatoren, Lichtenanlagen, Kraftwerke und Umformerstationen. Ein Lehr- und Hilfsbuch. Von Studienrat Dipl.-Ing. **Emil Kosack**, Magdeburg. Mit 226 Textabbildungen. (164 S.) 1922.

5 Goldmark

Grundzüge der Starkstromtechnik.

Für Unterricht und Praxis. Von Dr.-Ing. **K. Hoerner**. Mit 319 Textabbildungen und zahlreichen Beispielen. (262 S.) 1923.

4 Goldmark; gebunden 5 Goldmark

Elektrische Schaltvorgänge und verwandte Störungserscheinungen in Starkstromanlagen.

Von Professor Dr.-Ing. und Dr.-Ing. e. h. **Reinhold Rüdberg**, Chef-Elektriker, Privatdozent, Berlin. Mit 477 Abbildungen im Text und 1 Tafel. (512 S.) 1923.

Gebunden 20 Goldmark

Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen.

Ein Lehrbuch. Von Professor **Rudolf Richter**, Karlsruhe, Direktor des Elektrotechnischen Instituts. Mit 377 Textabbildungen. (436 S.) 1920. Berichtigter Neudruck 1922.

Gebunden 14 Goldmark

Der Drehstrommotor.

Ein Handbuch für Studium und Praxis. Von Professor **Julius Heubach**, Direktor der Elektromotorenwerke Heidenau, G. m. b. H. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 222 Abbildungen. (611 S.) 1923.

Gebunden 20 Goldmark

Die asynchronen Drehstrommotoren und ihre Verwendungsmöglichkeiten.

Von Betriebsingenieur **Jakob Ippen**. Mit 67 Textabbildungen. (97 S.) 1924.

3,60 Goldmark

Die asynchronen Wechselfeldmotoren.

Kommutator- und Induktionsmotoren. Von Professor Dr. **Gustav Benischke**. Mit 89 Abbildungen im Text. (118 S.) 1920.

4,20 Goldmark

Verlag von Julius Springer in Berlin W 9

Anleitungen zum Arbeiten im Elektrotechnischen Laboratorium. Von E. Orlich. Erster Teil. Mit 74 Textbildern. (100 S.) 1923. 2,40 Goldmark

Elektrotechnische Meßkunde. Von Dr.-Ing. P. B. Arthur Linker. Dritte, völlig umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 408 Textfiguren. (583 S.) 1920. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden 11 Goldmark

Elektrotechnische Meßinstrumente. Ein Leitfaden. Von Konrad Gruhn, Oberingenieur und Gewerbestudienrat. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 321 Textabbildungen. (227 S.) 1923. Gebunden 7 Goldmark

Meßgeräte und Schaltungen für Wechselstrom-Leistungsmessungen. Von Werner Skirl, Oberingenieur. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 41 Tafeln, 31 ganzseitigen Schaltbildern und zahlreichen Textbildern. (258 S.) 1923. Gebunden 8 Goldmark

Meßgeräte und Schaltungen zum Parallelschalten von Wechselstrom-Maschinen. Von Werner Skirl, Oberingenieur. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 30 Tafeln, 30 ganzseitigen Schaltbildern und 14 Textbildern. (148 S.) 1923. Gebunden 5 Goldmark

Messungen an elektrischen Maschinen. Apparate, Instrumente, Methoden, Schaltungen. Von Georg Jahn, Diplomingenieur. Fünfte, gänzlich umgearbeitete Auflage des von R. Krause begründeten gleichnamigen Buches. Mit über 400 Textabbildungen. Erscheint Ende 1924

Anlaß- und Regelwiderstände. Grundlagen und Anleitung zur Berechnung von elektrischen Widerständen. Von Erich Jasse. Zweite, verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 69 Textabbildungen. (184 S.) 1924. 6 Goldmark; gebunden 6,80 Goldmark

Erläuterungen zu den Vorschriften für die Errichtung und den Betrieb elektrischer Starkstromanlagen einschließlich Bergwerksvorschriften und zu den Merkblättern für Starkstromanlagen in der Landwirtschaft. Im Auftrage des Verbandes Deutscher Elektrotechniker herausgegeben von Dr. C. L. Weber, Geh. Regierungsrat. Durch die Leitsätze für Erdungen und Nullung in Niederspannungsanlagen erweiterter Neudruck der vierzehnten Auflage. Erscheint Ende 1924

Comparison of Principal Points of Standards for Electrical Machinery. (Rotating Machines and Transformers.) By Dipl.-Ing. Friedrich Nettel, Charlottenburg. (42 S.) 1923. 2,50 Goldmark; gebunden 3 Goldmark

Die elektrische Kraftübertragung. Von Dipl.-Ing. Herbert Kyser.
In 3 Bänden.

Erster Band: **Die Motoren, Umformer und Transformatoren, ihre Arbeitsweise, Schaltung, Anwendung und Ausführung.** Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 305 Textfiguren und 6 Tafeln. (432 S.) 1920. Unveränderter Neudruck. 1923.
Gebunden 15 Goldmark

Zweiter Band: **Die Niederspannungs- und Hochspannungs-Leitungsanlagen.** Ihre Projektierung, Berechnung, elektrische und mechanische Ausführung und Untersuchung. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 319 Textfiguren und 44 Tabellen. (413 S.) 1921. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden 15 Goldmark

Dritter Band: **Die maschinellen und elektrischen Einrichtungen des Kraftwerkes und die wirtschaftlichen Gesichtspunkte für die Projektierung.** Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 665 Textfiguren, 2 Tafeln und 87 Tabellen. (942 S.) 1923.
Gebunden 28 Goldmark

Bau großer Elektrizitätswerke. Von G. Klingenberg, Geh. Baurat, Professor Dr.-Ing. h. c. Dr. phil. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 770 Textabbildungen und 13 Tafeln. (616 S.) 1924
Gebunden 45 Goldmark

Elektrische Maschinen. Von Professor Rudolf Richter, Karlsruhe, Direktor des Elektrotechnischen Instituts.

Erster Band: **Allgemeine Berechnungselemente. Die Gleichstrommaschinen.** Mit 453 Textabbildungen. (640 S.) 1924.
Gebunden 27 Goldmark

Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Vortragsreihe, veranstaltet von dem Elektrotechnischen Verein E. V. und der Technischen Hochschule, Berlin. Herausgegeben im Auftrage des Elektrotechnischen Vereins E. V. von Professor Dr. H. Schering. Mit 197 Abbildungen im Text. (396 S.) 1924.
Gebunden 16 Goldmark

Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik. Herausgegeben von Walter Demuth, Oberingenieur, Vorstand des Mechan.-Techn. Laboratoriums der Porzellanfabrik Hermsdorf i. Th., unter Mitarbeit der Oberingenieure Hermann Franz und Kurt Bergk. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 132 Abbildungen im Text. (262 S.) 1923.
Gebunden 12 Goldmark

Die Herstellung gezeichneter Rechentafeln. Ein Lehrbuch der Nomographie. Von Dr.-Ing. Otto Lacmann. Mit 68 Abbildungen im Text und auf 3 Tafeln. (108 S.) 1923.
4 Goldmark

Die Grundlagen der Nomographie. Von Ingenieur B. M. Konorski. Mit 72 Abbildungen im Text. (86 S.) 1923.
3 Goldmark

Lehrbuch der Nomographie auf abbildungsgeometrischer Grundlage. Von H. Schwerdt, Studienrat am Falk-Gymnasium in Berlin. Mit 137 Textabbildungen und 151 angewandten Aufgaben mit Lösungen. (275 S.) 1924.
Gebunden 12,90 Goldmark