

Die Prüfung elektrischer Maschinen

Von

Dipl.-Ing. Werner Nürnberg
Berlin

Mit 219 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1940

ISBN 978-3-662-05481-9 ISBN 978-3-662-05526-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-05526-7

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

**Copyright 1940 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1940
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1940**

Vorwort.

Die eingehende Darstellung der Versuche bei der Prüfung elektrischer Maschinen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Wirkungsweise ist der Zweck des vorliegenden Buches. Behandelt werden die Transformatoren, die Asynchron-, Synchron- und Gleichstrommaschinen, der Einankerumformer und die Kommutatormaschinen für Ein- und Mehrphasenstrom. Bei letzteren finden die immer stärker an Bedeutung gewinnenden Nebenschlußmotoren der ständer- und der läufergespeisten Bauart eine besonders ausführliche Darstellung. Von den Sonderanwendungen der Asynchronmaschine sind im einzelnen behandelt die polumschaltbare Maschine, der Einphasenmotor, der Asynchron-generator, der Periodenwandler, die synchronisierte Maschine, die elektrische Welle, der Drehregler und die Maschinen mit Drehzahl- und Phasenregelung. Die Gleichstrommotoren und Generatoren sind mit allen gebräuchlichen Anordnungen des Erregerkreises beschrieben. Bei der Synchronmaschine sind auch jene Versuche und Berechnungsformeln angegeben, die die Bestimmung der zahlreichen charakteristischen Werte, wie z. B. der Reaktanzen in Längs- und Querachse für das mitläufige, das gegenläufige und das Nullsystem oder der Eigenschwingungszahlen u. a., erlauben. Der Einankerumformer erfährt die ihm als interessante, immer noch wichtige Maschine gebührende ausführliche Behandlung.

Die Schaltungsschemas sind bei allen Maschinen und Transformatoren, bei den Gleichstrommaschinen sogar für beide Drehrichtungen wiedergegeben, da ihre Kenntnis bei der Prüfung der oft noch nicht fertig oder gar falsch geschalteten Maschine von besonderem Nutzen ist. Die Umkehr der Drehrichtung ist bei den Kommutatormaschinen, wo häufig das Umklemmen mehrerer Anschlüsse und eine Verstellung der Bürstenbrücke nötig ist, im einzelnen erläutert. Die Stromwendung und die Ankerrückwirkung der mit Wendepolen ausgerüsteten Kommutatormaschinen für Gleich- und Wechselstrom sind theoretisch kurz, praktisch aber in ausführlicher Weise behandelt. Die Ausmessung von Spannungsvektoren durch ein- oder mehrphasige Erregung von Wicklungen mit oder ohne Verwendung von Nullpunktswiderständen ist bei den Transformatoren, Drehreglern, Kommutator- und normalen Drehstrommaschinen besonders erklärt.

Das Verständnis bei der Prüfung der einzelnen Maschinengattungen wird durch Diagramme und Ortskurven vertieft, die in genauer oder in zulässig vereinfachter Form auf Grund von Leerlauf- und Kurzschlußversuchen oder von Lastablesungen gezeichnet und ausgewertet

werden können. Bei der Gleichstrommaschine tritt an die Stelle der sonst üblichen zahlreichen Sonderdiagramme für die selbst-, fremd-, verbund- oder hauptstromerregte Maschine, die als Motor oder Generator arbeitet, ein einziges Diagramm, dem die Kennlinien für die Klemmenspannung, die Drehzahl und die Erregung entnommen werden können. Die Diagramme der ungesättigten und der gesättigten Volltrommel- oder Einzelpol synchronmaschine sind der Vollständigkeit wegen neben das praktisch besonders wichtige „Schwedendiagramm“ gestellt, das noch durch das Diagramm entsprechend den Amerikanischen Normalien ergänzt wird. Wegen der theoretischen Begründung der einzelnen Diagramme muß auf die Spezialliteratur verwiesen werden.

Von den Meßgeräten und Verfahren ist in knapper Form nur das wichtigste angegeben. Auch hier müssen zum näheren Studium die einschlägigen Werke benutzt werden. Als wichtigste Geräte werden das Drehspulgerät und das Dreheiseninstrument sowie das elektrodynamische Gerät behandelt. Die Berechnung der Meßkonstanten und die Erweiterung des Meßbereiches mit Neben- und Vorwiderständen und mit Strom- und Spannungswandlern ist in aller Ausführlichkeit durchgeführt. Dasselbe gilt von den zahlreichen Schaltungen zur Messung der Wirk- und Blindleistung in Ein- und Mehrphasennetzen mit gleichmäßig und ungleichmäßig belasteten Phasen. Die weniger bekannten Geräte für die Messung des Leistungsfaktors und der Frequenz sind ebenfalls angeführt. Der praktischen Widerstandsmessung mit Strom und Spannung oder mit der Thomson- und der Wheatstonebrücke ist ihrer Bedeutung entsprechend ein breiterer Raum gewährt. Die zur Messung der mechanischen Größen, also von Temperatur, Drehzahl, Schwingungen, Geräuschen, Drehmomenten, Luftgeschwindigkeit und -druck, dienenden Geräte werden kurz gestreift.

Die allerwichtigsten Formeln für den täglichen Gebrauch im Prüffeld sind am Schlusse des Buches zur bequemeren Benutzung zusammengestellt.

Die vom VDE erlassenen Vorschriften für die Prüfung und Bewertung elektrischer Maschinen und Transformatoren (REM und RET) werden durchweg berücksichtigt und die für die Berechnung des Wirkungsgrades benötigten Werte sowie die Toleranzen für gewährleistete Daten angegeben. Die eigentlichen Prüfdaten sind jedoch jeweils den Regeln selbst zu entnehmen.

Das Buch wendet sich an die Studierenden der technischen Hoch- und Fachschulen und an die in der Praxis stehenden Ingenieure, denen es eine Hilfe bei der Durchführung von Messungen und Versuchen an Erstaussführungen und bei der Kontrolle von bereits im Betrieb befindlichen Maschinen und Transformatoren sein möchte.

Dem Verlag gebührt für die schöne Ausstattung des Buches und das freundliche Entgegenkommen der beste Dank.

Berlin, Januar 1940.

WERNER NÜRNBERG.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	1
Abschnitt I.	
Die allgemeine Maschinenprüfung.	
A. Die Widerstandsmessung	2
Drehstromwicklungen S. 3. — Gleichstromwicklungen S. 4. — Wicklungen der Ein- und Mehrphasenkommutatormaschinen S. 5.	
B. Isolationsfestigkeit	5
Wicklungsprobe S. 5. — Sprungwellenprobe S. 6. — Hochfrequenzprüfungen S. 6. — Windungsprobe S. 6. — Absolutwert des Isolationswiderstandes S. 7.	
C. Wickelsinn und Wickelachse	7
Feldwicklungen von Gleichstrommaschinen S. 7. — Feldwicklung der Synchronmaschinen S. 8. — Die Ankerwicklung der Kommutatormaschinen S. 8. — Die Wicklungen der Synchron- und der Asynchronmaschinen für Drehstrom S. 10. — Die Ausmessung der gegenseitigen Lage von Primär- und Sekundärwicklungen S. 11.	
D. Der Leerlaufversuch	13
Motorverfahren S. 13. — Leerlaufkennlinien S. 13. — Leerverluste S. 14. — Generatorverfahren S. 15. — Schleuderprobe S. 15. — Der mechanische Lauf S. 16.	
E. Der Belastungsversuch	17
Die Belastungskennlinien S. 17. — Die Erwärmungsprobe (Dauerlauf) S. 17. — Die Messung der Erwärmung S. 19. — Die praktische Durchführung des Dauerlaufes S. 19. — Grenzleistung S. 21. — Belüftungsmessungen S. 22. — Luftmengenmessung S. 23. — Luftwiderstandsmessung und Leistungsbedarf des Lüfters S. 24. — Geräusche S. 24.	
F. Der Kurzschlußversuch	25
Die Kurzschlußkennlinie S. 25. — Das Kurzschlußdrehmoment S. 25. — Die Kurzschlußzusatzverluste S. 27.	
G. Der Hochlaufversuch	27
Zweck und Durchführung des Versuches S. 27. — Auswertung S. 29.	
H. Der Auslaufversuch	33
Zweck und Durchführung des Versuches S. 33. — Die Auswertung S. 33. — Die Bestimmung des GD^2 S. 34. — Messung von Verlusten S. 37. — Trennung der Verluste S. 37.	
I. Der Wirkungsgrad	38
Direkte Wirkungsgradbestimmung S. 38. — Indirekte Wirkungsgradbestimmung S. 39. — Rückarbeitsverfahren S. 39. — Gleichstrommaschinen S. 39. — Die Rückarbeit von Synchronmaschinen S. 40. — Über- und Unterregungsverfahren bei Synchronmaschinen S. 42. — Einzelverlustverfahren S. 43. — Die Wirkungsgradkennlinie S. 44.	
K. Die Belastungsverfahren	46
L. Die Pendelmaschine	47
Die Wirkungsweise S. 48. — Der grundsätzliche Aufbau S. 48. — Aufnahme von Belastungskennlinien S. 49. — Bestimmung des Wirkungsgrades S. 50. — Bestimmung des Korrekturdrehmomentes der Pendelmaschine S. 51.	
M. Die Drehmoment-Drehzahlkennlinien der Antriebs- und der Belastungsmaschinen	53
Die Gleichstrommaschine S. 53. — Die Synchronmaschine S. 55. — Stabilität und Unstabilität S. 56.	

Abschnitt II.

Die besondere Maschinenprüfung.

	Seite
A. Der Transformator	57
Allgemeines S. 57. — Die Schaltgruppen S. 58. — Parallelarbeit S. 60. — Das Transformator diagramm S. 61. — Die Spannungsänderung S. 64. — Die Berechnung des Wirkungsgrades S. 64. — Die Prüfung des unbewickelten Kernes S. 64. — Die Prüfung des gewickelten Transformators ohne Öl und ohne Kessel S. 66. — Die Prüfung des fertigen Transformators mit ölfülltem Kessel S. 71. — Der Erwärmungslauf S. 73. — Transformatoren in Sparschaltung S. 75. — Toleranzen S. 76.	
B. Die Asynchronmaschinen	76
Aufbau und Wirkungsweise S. 76.	
a) Der Drehstromasynchronmotor	80
Der Leerlaufversuch S. 80. — Der Kurzschlußversuch S. 82. — Der Hochlaufversuch S. 88. — Der Belastungsversuch S. 90. — Der Schlupf S. 90. — Belastungskennlinien S. 94. — Der Dauerlauf S. 95. — Der Wirkungsgrad S. 96. — Gewährleistungen und Toleranzen S. 100. — Stempelung S. 100. — Das Kreisbild der Drehstromasynchronmaschine mit Phasenanker S. 101. — Die Zeichnung des Kreisbildes S. 101. — Die Bestimmung des Schlupfes S. 104. — Bestimmung von Anlaufwiderständen bei Stillstand und von Regelwiderständen bei Lauf des Motors S. 106. — Allgemeine Beziehungen S. 106.	
b) Polumschaltbare Asynchronmaschinen	107
c) Der Asynchrongenerator	110
Wirkungsweise S. 110. — Betrieb S. 111.	
d) Der Einphasenasynchronmotor	111
Wirkungsweise S. 111. — Das Diagramm des Einphasenmotors ohne Hilfswicklung S. 113. — Das Kurzschlußdiagramm des Motors mit Hilfsphase S. 115. — Erzielung des höchsten Anfahrtdrehmomentes S. 116.	
e) Der Periodenwandler	117
Wirkungsweise S. 117. — Die Prüfung S. 118. — Der Leerlaufversuch S. 119. — Der Kurzschlußversuch S. 119. — Das Diagramm des Periodenwandlers in Schaltung B S. 119. — Die Belastung S. 121.	
f) Die synchronisierte Asynchronmaschine	121
Wirkungsweise S. 121. — Die Schaltung S. 122. — Das Diagramm S. 122. — Überlastbarkeit S. 124.	
g) Die elektrische Welle	125
Aufbau S. 125. — Die Wirkungsweise S. 126. — Das Diagramm S. 127. — Die Grenze der Stabilität S. 128. — Die Arbeitswelle S. 129. — Die Ausgleichswelle S. 130. — Die Synchronisierung S. 131. — Die Pendelneigung S. 132. — Die Prüfung S. 132.	
h) Die Drehregler	134
Der dreiphasige Drehregler S. 134. — Diagramm S. 135. — Der Leerlaufversuch S. 136. — Der Kurzschlußversuch S. 138. — Die Spannungsänderung S. 139. — Der Belastungs- und der Dauerversuch S. 140. — Das Drehmoment S. 141. — Der Doppeldrehregler S. 142. — Der Einphasendrehregler S. 143.	
i) Asynchronmaschinen mit Drehzahl- und Phasenregelung	145
Wirkungsweise S. 145. — Die Ausmessung S. 146. — Das vereinfachte Kreisdiagramm der geregelten Asynchronmaschine S. 150. — Der Asynchronmotor mit ständerloser, eigenerregter Drehstromerregemaschine S. 152. — Die Wirkungsgradbestimmung S. 154.	
C. Die Synchronmaschinen	155
Aufbau S. 155. — Die Streuprobe ohne Induktor S. 156. — Der Leerlaufversuch S. 157. — Die Spannungskurve S. 157. — Der Kurzschlußversuch S. 158. — Der Stoßkurzschlußversuch S. 160. — Der Hochlaufversuch S. 162. — Die Belastungsaufnahmen S. 163. — Das Synchronisieren S. 164. — Die Dunkelschaltung S. 164. — Die Hellschaltung S. 164. — Kontrolle S. 165. — Die Belastungseinstellung S. 166. —	

Die Belastungskennlinien S. 168. — Die Bestimmung des Erregerstromes und der Spannungsänderung nach den schwedischen Normalien S. 171. — Die Bestimmung des Erregerstromes und der Spannungsänderung nach den amerikanischen Normalien S. 172. — Das Diagramm der Synchronmaschine S. 173. — Die charakteristischen Größen der Synchronmaschine und ihre experimentelle Ermittlung S. 177. — Die Drehmomente der Synchronmaschine S. 186. — Der Dauerlauf S. 188. — Der Wirkungsgrad S. 189. — Toleranzen S. 191.	
D. Die Gleichstrommaschinen	192
a) Allgemeines	192
Der Aufbau S. 192. — Das Schaltschema S. 192. — Die Ankerrückwirkung S. 193. — Das Diagramm und die Kennlinien S. 196. — Das Drehmoment S. 204. — Parallellauf und Lastverteilung S. 206. — Die Stromwendung S. 208. — Die praktische Untersuchung der Stromwendung S. 212. — Die mechanische Untersuchung S. 212. — Die elektrische Untersuchung S. 214. — Der Leerlaufversuch S. 218. — Die Bedingung der Selbsterregung S. 219. — Der Kurzschlußversuch S. 223. — Die Belastungsversuche S. 223. — Die Korrektur der Leerlauf- oder der Lastdrehzahl von Gleichstrommaschinen durch Änderung des Hauptluftspalt S. 224. — Der Dauerlauf S. 225. — Die Aufnahme der Feldkurve S. 226. — Die Messung der Welligkeit der Gleichspannung S. 227. — Die Flimmerprobe mit Glühlampen S. 227. — Die Bestimmung des Wirkungsgrades S. 227. — Die Eichung von Belastungs- und Antriebsmaschinen S. 229. — Toleranzen S. 231.	
b) Generatoren	231
Der selbsterregte Nebenschlußgenerator S. 231. — Der selbsterregte Generator mit zusätzlicher Hauptstromwicklung S. 232. — Der fremderregte Generator S. 233. — Der fremderregte Generator mit zusätzlicher Gegenstromwicklung S. 233. — Der Hauptstromgenerator S. 234. — Die Krämermaschine (Dreifeldmaschine) S. 235. — Die Querfeldmaschine nach ROSENBERG S. 235.	
c) Motoren	237
Der Nebenschlußmotor S. 237. — Die Drehzahlregelung des Nebenschlußmotors S. 239. — Der Nebenschlußmotor mit zusätzlicher Hauptstromwicklung S. 240. — Der Hauptschlußmotor S. 241.	
d) Spannungsteilung	242
Die Gleichstrommaschine mit Spannungsteilung S. 242. — Ausgleichsätze S. 243.	
E. Der Einankerumformer	245
Aufbau S. 245. — Das Übersetzungsverhältnis S. 246. — Die praktischen Werte der Übersetzung S. 248. — Die Drehzahl des Einankerumformers S. 248. — Die Spannungsregelung S. 249. — Die Ankerkupferverluste des Umformers S. 251. — Das Diagramm des Einankerumformers S. 252. — Das Anlassen des Umformers S. 253. — Die Prüfung S. 254. — Der Wirkungsgrad S. 257.	
F. Die Ein- und Mehrphasenkommutatormaschinen	258
a) Der ständergespeiste Drehstromnebenschlußmotor	258
Aufbau und Wirkungsweise S. 258. — Die Einstellung des Motors in Umkehrstellung S. 259. — Die Einstellung der Kompensationsspannung bei Verwendung eines besonderen Kompensationstrafos S. 261.	
b) Der Motor mit Einfachdrehregler und beweglichem Bürstenjoch	263
Schaltung und Regelprinzip S. 263. — Die Einstellung S. 267. — Die Leerlaufmessungen S. 269. — Die Selbsterregung S. 271. — Der Belastungsversuch S. 272. — Der Wirkungsgrad S. 276. — Umkehr der Drehrichtung S. 276.	
c) Der läufergespeiste Drehstromnebenschlußmotor (Schragemotor)	277
Aufbau und Wirkungsweise S. 277. — Die Einstellung des Schragemotors S. 281. — Leerlauf-, Kurzschluß- und Lastversuche S. 282.	

	Seite
d) Der Drehstromreihenschlußmotor	283
Aufbau und Wirkungsweise S. 283. — Die Drehrichtungsumkehr S. 285. — Der Motor mit Zwischentransformator S. 286. — Das Diagramm des Reihenschlußmotors (ohne Zwischentransformator) S. 287. — Das Diagramm des Reihenschlußmotors (mit Zwischentransformator) S. 288. — Der Reihenschlußmotor mit doppeltem Bürstensatz S. 289. — Die Selbsterregung S. 289. — Die Einstellung S. 290. — Die Prüfung S. 290.	
e) Der Einphasenreihenschlußmotor (Bahnmotor)	291
Aufbau und Wirkungsweise S. 291. — Das Diagramm S. 292. — Die Stromwendung S. 293. — Die praktische Untersuchung der Stromwendung S. 294. — Die Prüfung S. 296.	
f) Der Repulsionsmotor	299
Aufbau und Wirkungsweise S. 299. — Die drei Ausführungsarten des Bürstenkurzschlusses S. 302. — Die Einstellung der Bürstenbrücke S. 302. — Magnetisierung und Kurzschluß S. 302. — Lastversuche S. 303. — Drehrichtungsumkehr S. 303.	
g) Die eigenerregte, ständerlose Drehstromerregemaschine	303
Aufbau und Wirkungsweise S. 303. — Die Prüfung S. 305. — Verlustbestimmung S. 305.	
h) Der Frequenzwandler	305
Aufbau und Wirkungsweise S. 305. — Die Prüfung S. 306. — Der kompensierte Frequenzwandler S. 307.	
i) Die ständererregte Drehstromkommutatormaschine . . .	307
Aufbau und Wirkungsweise S. 307. — Die Drehstromkommutatormaschine mit sechs Teilpolen S. 308. — Die Prüfung S. 310. — Die Scherbiusmaschine S. 311.	

Abschnitt III.

Die Meßgeräte und Verfahren.

A. Die Messung der elektrischen Größen	312
a) Allgemeines	312
b) Die Messung von Strom, Spannung und Leistung bei Gleichstrom	313
Strommessung S. 313. — Gleichstromspannungsmessung S. 316. — Gleichstromleistungsmessung S. 316.	
c) Die Messung von Strom, Spannung und Leistung bei Wechselstrom technischer Frequenz (15—100 Hz)	316
Strommessung S. 316. — Wechselstromspannungsmessung S. 319. — Wechselstromleistungsmessung S. 319—327.	
d) Leistungsfaktormesser	327
Messungen im Einphasennetz S. 329. — Messungen im Drehstromnetz S. 330.	
e) Frequenzmesser	330
Zungenfrequenzmesser S. 330. — Induktionsfrequenzmesser S. 331. — Kreuzisenfrequenzmesser S. 332.	
f) Die Messung von OHMSchen Widerständen	332
Strom-Spannungsverfahren S. 332. — Thomsonbrücke S. 334. — Wheatstonebrücke S. 335.	
g) Die Messung des induktiven Widerstandes und der Induktivität	336
h) Der kapazitive Widerstand und die Kapazität	337
B. Die Messung der mechanischen Größen	337
Die Messung der Drehzahl S. 337. — Die Messung der Schwingungen S. 338. — Die Geräuschemessung S. 338. — Die Messung der Temperatur S. 339. — Luftdruck und Luftgeschwindigkeit S. 341. — Messung des Drehmomentes S. 342.	
Formelanhang	344
Sachverzeichnis	347

Einleitung.

Die Prüfung der elektrischen Maschinen dient vor allem der Feststellung der notwendigen elektrischen und mechanischen Festigkeit, der thermischen Reichlichkeit, der Überlastbarkeit und der technischen Daten, zu denen als wichtigste der Wirkungsgrad und der Leistungsfaktor zählen. Im Leerlaufversuch werden die magnetischen Verhältnisse des Nutzkraftlinienweges und die Leerverluste bestimmt; im Kurzschlußversuch untersucht man die Verhältnisse der Streuwege, die Ankerückwirkung und die Zusatzverluste. Die Lastversuche erstrecken sich auf die Aufnahme der Kennlinien für die Erregung, die Klemmenspannung und die Drehzahl über der veränderlichen Last, und beim Dauer Versuch auf die Bestimmung der Erwärmung bei Normallast. Bei den selbstanlaufenden Motoren wird das Drehmoment im Stillstand und im Hochlauf gemessen, wozu im weitesten Umfange vom Hochlaufversuch Gebrauch gemacht wird. Die zur Auswertung nötige Bestimmung des Schwungmomentes erfolgt meistens durch den Auslaufversuch. Alle Maschinen mit Kommutator, also die Gleichstrom- und die Drehstrom- oder Einphasenkommutatormaschinen, werden vor Beginn der eigentlichen Messungen einer Einstellung unterzogen, die der Bestimmung der neutralen Zone der Bürstenbrücke und der richtigen Phasenlage von Drehzahl- und Leistungsfaktorregelspannung dient. Von der Genauigkeit dieser Einstellung hängt bei vielen dieser Maschinen das ordnungsgemäße Arbeiten in entscheidendem Maße ab. Untersuchungen über Vibrationen, Geräusche und die Belüftung ergänzen die rein elektrischen Prüfungen an neuen Generatoren und Motoren. Eine ganze Reihe von Untersuchungen kehrt in der gleichen Weise bei den verschiedenen Maschinengattungen wieder und wird daher im ersten Abschnitt als „Allgemeine Maschinenprüfung“ gemeinsam behandelt. Der zweite Abschnitt bringt dann die „Besondere Maschinenprüfung“ der Transformatoren, Drehstrom-, Gleichstrom- und Kommutatormaschinen. Die vornehmlich im praktischen Prüffeldbetrieb benutzten „Meßgeräte und Verfahren“ für die elektrischen und mechanischen Untersuchungen sind im dritten Abschnitt in kurzer Form behandelt, und im Anhang sind die wichtigsten Formeln wiedergegeben, die bei der Prüfung immer wieder benutzt werden müssen.

Abschnitt I.

Die allgemeine Maschinenprüfung.

A. Widerstandsmessung.

Die Prüfung der angelieferten Maschine beginnt zweckmäßigerweise mit der Messung der Widerstände der einzelnen Wicklungen. Der Vergleich des Meßwertes mit dem im allgemeinen vorausberechneten Sollwert läßt grobe Fehler sofort erkennen. Außerdem dient der kalte Widerstandswert zur nachherigen Bestimmung der Temperaturzunahme der Wicklung nach der Dauerbelastung. Wird die kalte Widerstandsmessung aufgeschoben, so ist eine lästige Wartezeit bis zur vollständigen Auskühlung nicht zu vermeiden.

Die praktische Messung richtet sich nach der Höhe des Widerstandes. Kleinste Widerstandswerte, wie solche von Gleichstromankern, Hauptstromerregewicklungen, Wendepol- und Kompensationswicklungen, die unter $0,001 \Omega$ liegen, werden am besten durch Strom- und Spannungsmessung ermittelt.

Höhere Widerstände zwischen $0,001$ und $1,0 \Omega$ werden mit der Thomson-Brücke bestimmt. Werte über $1,0 \Omega$ mißt man mit der Wheatstone-Brücke. Gleichzeitig erfolgt die thermometrische Temperaturmessung der Wicklung. Dies ist schon allein wegen der starken Temperaturabhängigkeit des Widerstandes nötig. Außerdem wird dieser Temperaturwert ebenfalls zur Errechnung der Erwärmung benötigt. Am sorgfältigsten geschieht die Temperaturmessung mittels in die Köpfe oder Lagen der Wicklungen eingebauter Flüssigkeitsthermometer. Beugnet man sich mit der Ablesung der Raumtemperatur, so ist mit einer möglichen Abweichung zwischen Wicklung und Raum von einigen Grad Celsius zu rechnen. Insbesondere hinken alle geschlossenen Maschinen hinter den Änderungen der Raumtemperatur her.

Bei der Widerstandsmessung ist zu beachten, daß alle benützten Kontakte, sowohl der Meßleitungen als auch der Wicklungsenden, gute blanke Oberfläche besitzen, und daß etwaige Verbindungsbrücken gut angezogen sind. Diejenigen Schaltverbindungen, die das Meßergebnis stören, sind natürlich zu entfernen.

Der Meßstrom, der bei den einzelnen Meßverfahren durch die Wicklungen gesandt wird, erwärmt diese in unerwünschter Weise. Der dadurch entstehende Fehler bleibt in zulässigen Grenzen, wenn zur Messung etwa $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{5}$ Nennstromstärke der betreffenden Wicklung nicht überschritten wird.

Die wiederholte Messung des gleichen Widerstandes, insbesondere bei der späteren Bestimmung des warmen Wertes, muß nach dem vorher geübten Verfahren und außerdem mit der gleichen Empfindlichkeit geschehen. Bei Brückenschaltungen sind also dieselben Normalwiderstände und bei Strom- und Spannungsmessung die gleiche Stromstärke zu benutzen. Auf diese Weise wird bei allen Messungen mit gleicher Meßgenauigkeit und mit gleichem Meßfehler gearbeitet. Die Ermittlung der prozentualen Widerstandszunahme erfolgt dann recht genau, auch wenn der absolute Ohmwert mit geringer Abweichung vom wahren Betrag gemessen wurde.

Drehstromwicklungen. Die Wicklungen der Transformatoren, Asynchronmotoren und Synchronmotoren sind meist miteinander verkettet geschaltet. Bei leichter Trennmöglichkeit der Stränge voneinander empfiehlt sich die Messung des einzelnen Phasenwiderstandes unter Angabe seiner Phasenzugehörigkeit. Liegt dagegen unlösbare Verkettung in Sternschaltung vor, so können nur die Summenwiderstände von je zwei Phasen gemessen werden. Die Einzelwerte je Strang ergibt eine einfache Nebenrechnung, mit den Bezeichnungen nach Abb. 1 zu:

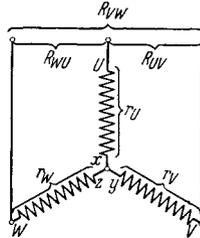


Abb. 1. Widerstandsmessung bei Sternschaltung.

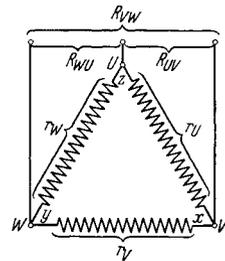


Abb. 2. Widerstandsmessung bei Dreieckschaltung.

$$r_u = \frac{1}{2} (R_{uv} + R_{wu} - R_{vw}), \quad r_v = \frac{1}{2} (R_{vw} + R_{uv} - R_{wu}), \quad r_w = \frac{1}{2} (R_{wu} + R_{vw} - R_{uv}).$$

Bei Messung der Widerstände in Dreieckschaltung betragen die ebenfalls erst rechnerisch zu ermittelnden Einzelwerte entsprechend Abb. 2:

$$r_u = \frac{1}{2} \left(\frac{4 R_{vw} R_{wu}}{-R_{uv} + R_{vw} + R_{wu}} - [-R_{uv} + R_{vw} + R_{wu}] \right),$$

$$r_v = \frac{1}{2} \left(\frac{4 R_{wu} R_{uv}}{+R_{uv} - R_{vw} + R_{wu}} - [+R_{uv} - R_{vw} + R_{wu}] \right),$$

$$r_w = \frac{1}{2} \left(\frac{4 R_{uv} R_{vw}}{+R_{uv} + R_{vw} - R_{wu}} - [+R_{uv} + R_{vw} - R_{wu}] \right).$$

Wenn keine wesentliche Abweichung zwischen den drei Meßwerten auftritt, so genügt als Angabe des Phasenwiderstandes:

$$R_{ph} = \frac{1}{2} R_{verkettet} \quad \text{bei Sternschaltung,}$$

$$R_{ph} = \frac{2}{3} R_{verkettet} \quad \text{bei Dreieckschaltung.}$$

Bei zweipoligen Einschichtwicklungen ergibt sich infolge der verschiedenen großen Wickelkopfausladung der einzelnen Phasen leicht eine Verschiedenheit in den Widerstandswerten von einigen Prozent, die also im allgemeinen keinen Hinweis auf etwaige Fehler in der Ausführung der Wicklung gibt.

Der Widerstand der Läuferwicklung der Asynchronmotoren und der Feldwicklung der Synchronmaschinen wird durch Anhalten der Meß-

leitungen an die Schleifringe bestimmt, damit der Übergangs- und Eigenwiderstand der Bürsten nicht mitgemessen wird. Dieser letztere Wert wird nicht durch Messung bestimmt, sondern durch den von ihm hervorgerufenen Spannungsabfall berücksichtigt. Dabei gelten, unabhängig von der Stromstärke, 1,0 V für Kohlebürsten und 0,3 V für die metallhaltigen Kohlesorten.

Der Widerstand von Kurzschlußankern jeder Art, worunter auch die Dämpferkäfige zu verstehen sind, wird nicht gemessen. Nur wenn die eigentlichen Belastungsmessungen begründeten Verdacht auf Verwendung falschen Werkstoffes aufkommen lassen, muß der Leitwert eines Probestückes bestimmt werden.

Gleichstromwicklungen. Die Messung des Feldwiderstandes der Nebenschluß- und der Fremderregungswicklung bietet keine Schwierigkeit. Bei kleinen Maschinen wird meist die Wheatstone- und bei größeren die Thomson-Brücke verwendet.

Schwieriger gestaltet sich die Bestimmung des Widerstandes der hauptstromdurchflossenen Wicklungen für Wendepole, Verbunderregung und Kompensation. Die kalten Widerstände erscheinen häufig bis zu 50 % gegenüber den errechneten Werten zu hoch, bei denen der Widerstand der Verbindungsstücke zwischen den einzelnen Teilspuln sowie die auch bei bester Verbindungsweise unvermeidbaren Übergangswiderstände nicht berücksichtigt werden. Die warmen Widerstände hingegen liegen oft, verglichen mit dem Ergebnis der thermometrischen Temperaturbestimmung, zu tief. Dies liegt zum Teil wiederum an den zusätzlichen Widerständen, die ja nicht immer die gleiche Erwärmung erleiden, und zum anderen Teil an der guten, schnellen Abkühlung der häufig blank verlegten Spulen, die ein schnelles Absinken des warmen Widerstandswertes zur Folge hat.

Große Sorgfalt verlangt die Messung des Ankerwiderstandes. Unter diesem Wert versteht man den Widerstand zwischen zwei um genau eine Polteilung auf dem Kommutator voneinander entfernten Segmenten in der Betriebsschaltung des Ankers. Diese liegt stets vor, wenn alle Kohlen auf dem Kommutator aufsitzen. Wenn der Anker, wie es bei Schleifenwicklung großer Maschinen üblich ist, hinreichend viele Ausgleichsverbindungen hat, so kann der Widerstand auch ohne Kohlen bestimmt werden. Bei aufliegenden Kohlen ist das Meßergebnis infolge der sich mit der Ankerstellung ändernden Überdeckung von mehr oder weniger Segmenten in geringen Grenzen schwankend. Zum Vergleich mit dem Sollwert reicht es aus, bei Errechnung der Widerstandszunahme ist es nicht unbedingt zuverlässig. Genauere Werte bei eingängigen Wicklungen ergeben sich, wenn zwei benachbarte Lamellen des Kommutators bezeichnet werden und der dazwischenliegende Widerstand kalt und warm gemessen wird. Dieser Wert hängt von der jeweiligen Ankerstellung nur in geringem Maße ab. Zweckmäßigerweise dreht man den Anker, bis die bezeichneten Lamellen ziemlich genau zwischen zwei Bürstenbolzen zu liegen kommen. Die Stromstärke muß wesentlich geringer als bei der andern Meßart gewählt werden, da sich der Meßstrom praktisch nicht verzweigt, sondern größtenteils nur durch

die zwischen den beiden Segmenten liegende Ankerspule tritt. Einwandfreie Meßergebnisse erhält man, auch bei Messung in der Polteilung, wenn die Kohlen herabgenommen werden, ein Verfahren, das sich bei größeren Maschinen jedoch von selbst verbietet.

Wicklungen der Ein- und Mehrphasenkommutatormaschinen. Diese Maschinen besitzen Ständerwicklungen, die in Aufbau und Schaltung entweder den Wicklungen der Gleichstrom- oder der Asynchronmaschinen entsprechen. Es gilt also das bereits dort Gesagte. Häufig ist allerdings, um die Klemmenzahl auf das Notwendigste zu beschränken, bereits eine innere Verbindung der schaltungsmäßig zusammengehörigen Spulen durchgeführt. So liegen z. B. bei den Mehrphasenkommutatormaschinen mit Wendepolen oft die Wendepol- und die Kompensationswicklung unlösbar hintereinandergeschaltet. Gemessen wird dann der Summenwiderstand unter entsprechender genauer Angabe der betreffenden Spulen. Die Ankerwicklung dieser Maschinen ist identisch mit einer Gleichstromankerwicklung und wird wie diese in Polteilung ($=180^\circ$ el) gemessen. Bei der Wirkungsgradberechnung wird dieser Widerstandswert dann durch eine einfache Umrechnung auf die einzelnen Phasen bezogen. Liegt noch eine besondere Drehstromwicklung in den Ankernuten, so wird deren Widerstand zwischen den drei oder sechs Schleifringen bestimmt. Zu beachten ist das etwaige Vorhandensein von sog. Widerstandsverbindungen, welche sich zwischen Wickelkopf und Kommutatorsegment befinden und der Verringerung der Kurzschlußströme unter den Bürsten dienen. Sind solche vorhanden, so ist der Wickelkopf oberhalb der Fahne blank zu machen und als Meßpunkt zu benutzen. Die Widerstandsfahne selbst kann dann noch getrennt mit mäßiger Stromstärke gemessen werden. Durch höhere Stromwerte kann sie leicht verbrannt werden.

B. Isolationsfestigkeit.

Die Isolationsprobe nach REM, welche möglichst an der warmen Maschine vorgenommen wird, besteht aus der Wicklungsprobe, der Sprungwellenprobe und der Windungsprobe. Hierzu tritt in der Praxis die Hochfrequenzprobe.

Die **Wicklungsprobe** dient zur Ermittlung der ausreichenden Isolationsfestigkeit der Wicklungen untereinander und gegen das Eisen. Eine in den REM und RET festgelegte Wechselspannung wird mit dem einen Pol der zu prüfenden Wicklung und mit dem andern Pol dem Maschinenkörper, bzw. den unter sich zusammengeschlossenen restlichen Spulengruppen zugeführt. Man entnimmt sie einem kleinen, primärseitig über einen Regelwiderstand an Wechselspannung von 220 oder 380 V liegenden Prüftransformator. In langsamer Steigerung wird sie auf den vorgeschriebenen Betrag hochgeregelt und eine Minute dabei belassen. Bei etwaigem Isolationsschaden geht die Anzeige des Spannungsmessers auf fast Null zurück. Die Fehlerstelle kann meist an einem knisternden Geräusch oder gar an einem sichtbaren Flammbogen erkannt werden.

Die **Sprungwellenprobe** nach REM und RET soll an den fertigen Maschinen von über 2,5 kV Spannung vorgenommen werden. Da sich in der Praxis gezeigt hat, daß diese Probe geeignet ist, außer bei den Transformatoren eine an und für sich gute Isolation so zu verschlechtern, daß Anstände nach der Inbetriebnahme zu erwarten sind, wird im Einverständnis mit dem Kunden darauf verzichtet.

Sie wird ersetzt durch **Hochfrequenzprüfungen**, die eine Probe der noch nicht eingebauten Spule mit der ihren Enden zugeführten vollen verketteten Spannung ermöglichen. In Abb. 3 ist eine der in der Praxis eingeführten Anordnungen zu sehen. Die einem Netz von 500 Hz ent-

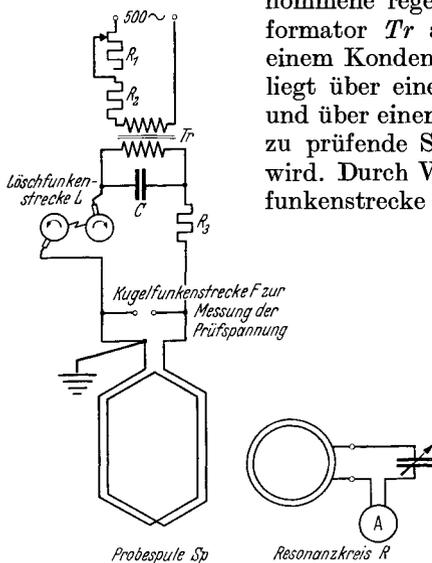


Abb. 3. Hochfrequenzprobe an einer Formspule mit voller Maschinenspannung.

nommene regelbare Spannung wird in einem Transformator Tr auf einige Kilovolt umgespannt und einem Kondensator C zugeführt. Parallel zu diesem liegt über einer einstellbaren Löschfunkenstrecke L und über einem Strombegrenzungswiderstand R_3 die zu prüfende Spule Sp , deren eine Klemme geerdet wird. Durch Veränderung des Abstandes der Löschfunkenstrecke kann bei ausreichend hoher Spannung am Kondensator jede gewünschte Überschlagsspannung zwischen 1000 und 10000 V eingestellt und der Probenspule zugeführt werden. Im Augenblick des Überschlages setzt ein Schwingungsvorgang in dem aus Kondensator C und Spule Sp gebildeten Kreis ein, der nach einigen Perioden erlischt und sofort von neuem einsetzt, wenn die Spannung am Kondensator wieder genügend angestiegen ist. Einige Tausend solcher Wellenzüge, die eine Periodenzahl von 10000 bis 100000 Hz besitzen, werden wäh-

rend der Probe der Spule zugeleitet. Ein Resonanzkreis, der lose angekoppelt ist, dient der Anzeige von Spulen mit durchgeschlagenen, kurzgeschlossenen Windungen. Diese Spulen bewirken eine Verstimmung der Resonanz beider Kreise und werden am starken Rückgang der Strommesseranzeige erkannt. Der genaue Wert der Prüfspannung, deren Scheitelwert auf die $\sqrt{2}$ -fache verkettete Maschinenspannung eingestellt wird, ist an einer parallel zur Spule Sp liegenden Kugelfunkenstrecke F zu messen.

Die **Windungsprobe** prüft die Isolationsgüte zwischen den Windungen der gleichen Wicklung. Sie wird nach den REM und RET mit dem 1,3-, 1,5- oder 2fachen Betrag der normalen Windungsspannung durchgeführt. In der einfachsten und in der Prüffeldpraxis meistens geübten Weise wird im Verlauf der Leerlaufmessungen bei Aufnahme der Magnetisierungskennlinie die Maschine auf den erhöhten Spannungswert gebracht, sei es durch stärkere Erregung oder durch Zuführung erhöhter

Netzspannung. Wird die Maschine gleichzeitig mit der aus mechanischen Gründen stets vorgeschriebenen erhöhten Drehzahl gefahren, die durch schnelleres Antreiben oder durch Erhöhung der Netzfrequenz erreicht werden kann, so läßt sich auf diese Weise häufig eine wesentliche Erhöhung des magnetischen Kraftflusses bei Vornahme der Probe umgehen. Die Maschine arbeitet dann nahezu mit normaler Sättigung. Bei prozentual höheren Schleuderdrehzahlen ist sie allerdings schwächer als normal gesättigt. Die Probe dauert 3 Minuten, während für die Schleuderprobe nur 2 Minuten vorgeschrieben sind.

Der **Absolutwert des Isolationswiderstandes** in Ohm ist nach den vorigen Prüfungen noch nicht bekannt. Zu seiner Messung dient die einfache Stromspannungsmeßmethode, d. h. es wird der Stromdurchgang bei bekannter, angelegter Gleichspannung, und zwar meistens von 500 V, gemessen. Als Spannungsquelle dient z. B. ein Kurbelinduktor geeigneter Bauart oder ein vorhandenes Gleichstromnetz. Der Wert des Isolationswiderstandes liegt etwa zwischen einigen hunderttausend und einigen Millionen Ohm. Er hängt sehr stark vom Feuchtigkeitszustand der Maschine ab.

Bei neumontierten Maschinen oder nach Betriebspausen von einigen Tagen liegt er oft tiefer, steigt aber bei Anheizung durch Strom oder äußere Wärmezufuhr bald an. Bei Nachmessungen des Wertes an Ort und Stelle beachte man den Feuchtigkeits- und den Verschmutzungszustand des Klemmbrettes und des Kommutators, da dieser leicht einen zu geringen Isolationswiderstand der Wicklungen selbst vortäuscht.

C. Wickelsinn und Wickelachse.

Der Wickelsinn und die Wickelachse der Spulen in den elektrischen Maschinen bestimmen die Richtung und die räumliche Achse der von ihnen bei Stromdurchgang erzeugten magnetischen Felder. Ebenso entscheiden sie über die zeitliche Lage der in ihnen induzierten Spannungen. Von der Richtigkeit dieser Verhältnisse hängt die fehlerfreie Arbeitsweise der Maschinen ab.

Feldwicklungen von Gleichstrommaschinen. Liegt nur eine Erregerwicklung auf den Hauptpolen, so beschränkt sich die Prüfung auf Feststellung der wechselnden und mit der Zeichnung übereinstimmenden Polfolge bei erregter Wicklung. Die Klemmen $C—D$ bzw. $I—K$ bei Fremderregung oder $E—F$ bei Hauptstromerregung werden mit der Stromquelle verbunden; dann wird eine drehbar gelagerte Magnetnadel den einzelnen Polschuhen langsam genähert. Der Nordpol zieht die nach Süden, der Südpol die nach Norden zeigende Spitze an. Bei richtiger Spulenverbindung müssen die Nadelspitzen demnach abwechselnd angezogen werden. Bei zu rascher Annäherung der Nadel kann dieselbe umgepolt werden, wodurch natürlich eine Fehlanzeige entsteht. Als Richtungsregel sei kurz vermerkt: Auf die Fläche des Polschuhes blickend, wird der vom Erregerstrom rechts — im Uhrzeigersinn — umflossene Pol zum Südpol, der vom Erregerstrom links — entgegen dem Uhrzeigersinn — umflossene Pol zum Nordpol.

Besitzt die Maschine mehrere Erregerwicklungen, so wird erst eine einzige, wie oben geschildert, geprüft. Die Ausmessung der restlichen erfolgt dann am besten nach induktivem Verfahren. Dies dient jedoch nur zur Kontrolle der Gesamtwirkung der einzelnen Erregerkreise auf die Maschine. Bei Verdacht auf Fehlschaltung einzelner Pole sind auch die übrigen Wicklungen einzeln mit der Nadel zu prüfen. Liegt nun auf den Polen z. B. außer der Selbsterregung $C—D$ noch eine Hauptstromerregung $E—F$ und eine Fremderregung $I—K$, so ist die Schaltung und die Klemmenbezeichnung nur dann richtig, wenn alle Wicklungen bei Stromeintritt in die mit dem alphabetisch ersten Buchstaben bezeichnete Klemme eine gleichsinnige Erregung der Maschine hervorrufen. Das heißt also: Bei gleicher Polarität der Klemmen C , E und I müssen sich alle Wicklungen gegenseitig unterstützen. Die induktive Probe geht nun von der Überlegung aus, daß bei Änderungen des gemeinsamen magnetischen Flusses in allen Spulen Spannungen gleicher Richtung induziert werden müssen. Man legt also z. B. an die Klemmen C , E und I die (+)-Klemme und an die Klemmen D , F und K die (—)-Klemme eines empfindlichen Spannungsmessers an. Durch eine der Wicklungen sendet man Erregerstrom, den man dem Netz über einen einstellbaren Widerstand entnimmt unter Beobachtung eines richtigen Geräteausschlages an der betreffenden Spule. Beim Einschalten müssen alle Spannungsmesser im gleichen Sinn ausschlagen. Beim Ausschalten des Stromes zeigen jedoch die Spannungsmesser der nichtstromführenden Erregerwicklungen umgekehrten Ausschlag an. Als kurze Merkregel diene: „Die Eingangsklemmen der richtig bezeichneten Erregerwicklungen haben beim Einschalten eines der Erregerströme alle unter sich die gleiche Polarität.“ Zeigt eine der Wicklungen falsche Polarität, so ist die Klemmenbezeichnung zu tauschen. Ausdrücklich sei bemerkt, daß durch die innere Maschinenschaltung der Erregersinn immer noch in feldverstärkender oder feldschwächender Weise gedreht werden kann. Soll z. B. die Compoundwicklung spannungserhöhend wirken, so muß der Strom in E ein- und aus F austreten, wenn gleichzeitig die Selbsterregung so geschaltet ist, daß C an (+) und D an (—) liegt. Sie wirkt feldschwächend bei umgekehrtem Stromdurchgang.

Die **Feldwicklung der Synchronmaschinen** wird wie die einer Gleichstrommaschine geprüft. Meist zeigt bereits der bloße Augenschein den Wickel- und damit den Erregersinn der fast immer in Reihe geschalteten Einzelspulen an. Entsprechend der wechselnden Polfolge von Nord- und Südpol folgt auf den rechtsumflossenen Pol der linksumflossene. Wenn bei der Fabrikation alle Erregerspulen unter sich gleich hergestellt wurden und die Bezeichnung A für den Anfang und E für das Ende erhalten haben, dann ist die richtige Verbindung E mit E , A mit A , usw.

Die **Ankerwicklung der Kommutatormaschinen** wird in ihrer Achse ausschließlich durch die räumliche Stellung der Bürsten auf dem Kommutator festgelegt. Diese befinden sich bei Gleichstrommaschinen in der sog. neutralen Stellung, wenn sie elektrisch betrachtet genau senkrecht zur Feldachse der Hauptpole stehen. Räumlich gesehen liegen sie — in Folge der Versetzung des Kommutatorsegmentes gegen die zugehörigen

Ankerleiter um rund eine halbe Polteilung — allerdings ziemlich genau unter der Mitte der Hauptpole (S. 192). Wenn auch aus gewissen Gründen die neutrale Bürstenstellung nicht immer im Betrieb beibehalten wird, so gilt sie doch stets als Ausgangslage für etwaige Verschiebungen und muß daher vor Beginn der eigentlichen Maschinenmessungen mit aller Sorgfalt ermittelt werden. Dies geschieht meist auf induktivem Wege. Eine der Hauptpolderregerwicklungen wird über einen regelbaren Widerstand an das Netz gelegt. Über einen kleinen Feldschalter kann sie leicht ein- und ausgeschaltet werden. Hierdurch werden Induktionsstöße in Richtung der Hauptpole erzeugt. Steht die Bürstenbrücke genau senkrecht hierzu, so zeigt ein angelegter, empfindlicher Spannungsmesser keinerlei Ausschlag beim Betätigen des Feldschalters an. Wird jedoch ein Ausschlag beobachtet, so ist die Brücke so lange zu verstellen, bis er verschwindet. Ein etwaiges Überschreiten der Neutralstellung macht sich am Gleichstromspannungsmesser durch Umkehr des Ausschlages bemerkbar. Um sich nicht verwirren zu lassen, beobachte man nur den Einschaltstoß. Der Ausschaltstoß erfolgt auch hier in umgekehrter Richtung. Die neutrale Stellung wird sofort nach ihrer Ermittlung durch Einritzen einer Marke in der Brücke und einer Gegenmarke im Gehäuse als solche festgelegt. Voraussetzung der ganzen Messung sind gut eingeschliffene Kohlen, die praktisch in voller Fläche auf dem Kommutator aufliegen. Andernfalls kann die endgültige Ausmessung der neutralen Stellung erst nach Einlaufen der Kohlen vorgenommen werden. Sie wird endgültig durch einen nicht zu schwachen Zeiger dauerhaft markiert. Die Betriebsstellungen für Rechtslauf und für Linkslauf werden, soweit sie von der Neutralstellung abweichen, durch eine weitere Marke R und L ebenfalls dauerhaft gekennzeichnet. Eine gute Kennzeichnung, die auch noch den Vorzug der guten Sichtbarkeit von außen haben soll, erspart bei Untersuchungen der Maschine an Ort und Stelle manche lästige Arbeit.

Bei einer anderen Art der Ermittlung der neutralen Stellung werden nur Anker und Wendepole vorsichtig mit einem schwachen Strom erregt. Die Hand fühlt am Wellenende ein Drehmoment, das bei richtiger Bürstenverschiebung auf die Neutralstellung zu kleiner wird und bei Erreichen derselben auf Null zurückgeht. Da dieses Drehmoment bei Durchgang durch die Neutralstellung seinen Drehsinn umkehrt, ist diese Art der Ausmessung sehr empfindlich. Das Verfahren empfiehlt sich in all jenen Fällen, in welchen die Erregung der Hauptpole Schwierigkeiten bereitet oder, wie bei einigen Sondermaschinen mit ungleichmäßig bewickelten Spaltpolen, unmöglich ist.

Bei den meist folgenden Belastungsaufnahmen kann die richtige Neutralstellung der Kohlen auch noch daran erkannt werden, daß die Lastkennlinien bei Rechtslauf und bei Linkslauf sich völlig decken müssen. Auch hierbei ist die Fehlerquelle von in nur einer Drehrichtung eingelaufen oder kippenden Kohlen auszuschließen.

Bei Wechselstromkommutatormaschinen legt man die senkrecht zur neutralen Ankerachse stehende Ständerwicklung an Wechselspannung und beobachtet den Ausschlag eines an die Bürsten gelegten Wechsel-

spannungsmessers, dessen Nullausschlag die richtige Stellung der Brücke anzeigt. Weitere Verfahren sind bei diesen Maschinen besonders angeführt.

Der Richtungssinn der Gleichstromankerwicklung kann durch Vertauschen der positiven und der negativen Ankerklemme in einfachster Weise umgedreht werden. Er hängt von der Ausführung dieser Wicklung

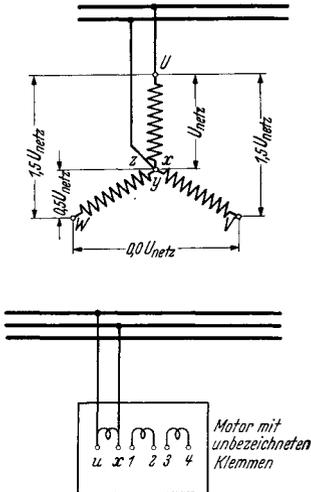


Abb. 4. Bestimmung der richtigen Klemmenbezeichnung UX , VY , WZ mittels Spannungsmesser und einphasiger Erregung.

1. Mit Galvanometer Anfänge und Enden der Phasen bestimmen und willkürlich eine Phase mit UX , die andern mit 1, 2; 3, 4 bezeichnen.
2. UX einphasig erregen. X mit je einer Klemme der andern Phasen so verbinden, daß die Spannung zwischen den beiden freien Klemmen zu Null und zwischen U und jeder einzelnen der freien Klemmen gleich $1,5 \cdot$ (Spannung an UX) wird.
3. Freie Klemmen mit V, W bezeichnen, und zwar derart, daß Netzanschluß RST an UVW die Sollrichtung ergibt. Zugehörige Enden heißen Y, Z .
4. Stern- oder Dreieckschaltung ausführen.

nung. Normalerweise soll, wenn keine bestimmte Drehrichtung vorgeschrieben ist, der Anschluß der Netzphasen RST an die Maschinenklemmen UVW einer — auf Antriebseite gesehenen — rechtsläufigen Drehung der Maschine entsprechen. Liegt dagegen die Drehrichtung fest, so sind, insbesondere bei großen Motoren und bei Generatoren, UVW so zu wählen, daß die Netzphasenfolge RST mit dieser Drehrichtung übereinstimmt.

Wenn bei einem Drehstrommotor mit Phasen- oder Kommutatoranker oder bei einem dreiphasigen Drehregler die drei Anfänge und die

als gekreuzte oder als ungekreuzte Wicklung ab. Sollen mehrere Maschinen untereinander austauschbar sein oder sollen Reserveanker mitgeliefert werden, so ist bei der Ausmessung unbedingt darauf zu achten, ob auch die Anker unter sich gleichgängig hergestellt wurden. Da es durchaus möglich ist, daß innerhalb der Reihenherstellung auch einmal irrtümlich ein andersgängiger Anker fertiggestellt wird, muß dieser Fall berücksichtigt werden. Am besten werden die Anker auch wirklich im Gehäuse geprüft. Haben alle Maschinen räumlich gleiche Stellung ihrer positiven Bürsten und der positiven Pole, so stimmen bei gleicher Drehrichtung auch die Ankerwicklungen miteinander überein.

Die Wicklungen der Synchron- und der Asynchronmaschinen für Drehstrom liegen der Achse und der Richtung nach meist infolge des untereinander gleichen Aufbaues der einzelnen Stränge richtig fest. Selten nur ist eine Phase verkehrt angeschlossen. Zeigt die erregte Synchronmaschine gleiche verkettete Spannung und gleiche Phasenspannung, so ist auch die Schaltung der Spulen richtig. Das gleiche gilt von der Asynchronmaschine, welche leerlaufend am Netz liegt und gleiche Spannungen nach dem Sternpunkt zu und gleiche Stromaufnahme in allen Phasen zeigt. Eine etwa verkehrt angeschlossene Phase hat erheblich abweichende Stromaufnahme zur Folge. Die Untersuchung dieser Wicklungen beschränkt sich meist auf die Feststellung der richtigen Klemmenbezeichnung.

drei Enden der Phasen gar nicht oder falsch bezeichnet sind, so kann man durch systematisches Probieren nach den Angaben der Abb. 4 schnell die richtigen Klemmen U, V, W und X, Y, Z auffinden und danach die gewünschte Stern- oder Dreieckschaltung bilden. Benötigt wird Wechselspannung und ein Spannungsmesser.

Die Ausmessung der gegenseitigen Lage von Primär- und Sekundärwicklungen ist eine Prüffeldaufgabe, die bei der Probe von Drehreglern, unbezeichneten Transformatoren geschlossener Bauart und vor allen Dingen bei den Drehstromkommutatoren und bei Drehstromerregemaschinen immer wiederkehrt und den eigentlichen Ausgangspunkt der weiteren Untersuchungen bildet.

Das beste und übersichtlichste Verfahren beruht auf der unmittelbaren Ausmessung der gegenseitigen Phasenlage der in den einzelnen Wicklungen induzierten Spannungen. Hierzu wird nur ein Spannungsmesser mit geeigneten Meßbereichen und zusätzlich für jede Wicklung in Dreieckschaltung oder mit nicht zugänglichem Sternpunkt ein dreiphasiger Widerstand zur künstlichen Nullpunktbildung benötigt. Eine der Wicklungen, und zwar am besten die betriebsmäßig am Netz liegende Primärwicklung, wird an Spannung gelegt. Vorzugsweise wählt man eine geringere als die Nennspannung, um etwaige bei Fehlschaltung auftretende Kurzschlußströme klein zu halten und auch, um die Ausmessung gefahrloser durchführen zu können. Dann untersucht man mit dem Spannungsmesser, ob etwa die Stern- oder künstlichen Nullpunkte Spannung gegeneinander führen. Dies darf, wenn vorher alle Verbindungen zwischen Primär- und Sekundärseite gelöst wurden, nicht der Fall sein. Zeigt der Spannungsmesser keinen Ausschlag, so werden die Nullpunkte nunmehr miteinander verbunden. Anschließend werden alle Einzelspannungen, sowohl die verketteten wie auch die Phasenspannungen, systematisch ausgemessen und als Spannungstern bzw. Spannungsvieleck auf dem Papier aufgetragen. Die Lage des Primärsternes zum Sekundärstern geht eindeutig aus den Spannungsmessungen hervor, die zwischen den Klemmen der Primär- und den Klemmen der Sekundärwicklungen ausgeführt

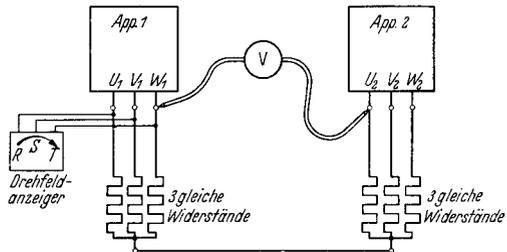
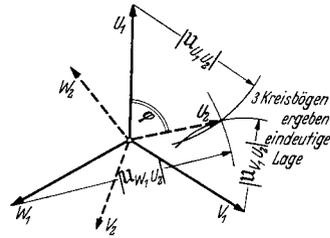


Abb. 5. Ausmessung der Spannungsvektoren mittels künstlicher Nullpunkte.

1. Evt. Prüfung der Phasenfolge mittels Drehfeldanzeiger.
2. Ausmessung des Spannungsternes „1“ (U_1, V_1, W_1).
3. Bestimmung von Punkt U_2 mittels der Spannungen zwischen der Klemme U_2 und den Klemmen U_1, V_1 und W_1 .
4. Dsgl. für Punkt V_2 und W_2 .
5. Kontrolle des Sternes „2“ (U_2, V_2, W_2) durch Messung der Phasen- und verketteten Spannungen an Apparat 2.

werden. Die Betrachtung der aufgezeichneten Spannungsvektoren zeigt unmittelbar an, welche Maßnahmen getroffen werden müssen, um die gestellten Forderungen der sinngemäßen Phasenbezeichnung, wie sie sich aus dem Schaltschema ergeben, oder der verlangten gegenseitigen Phasenlage zu erfüllen. Diese Art der Ausmessung wird bei den einzelnen Maschinen ausführlich behandelt. Zur eindeutigen Bestimmung der einzelnen Punkte des Sekundärsternes ist je eine Messung von allen drei Klemmen U , V und W der Primärwicklung aus nötig (Abb. 5).

Eine zweite, oft recht fruchtbare Methode benutzt die Erregung nur einer einzelnen Phase. In diesem Fall tritt in den Maschinen nur ein Wechselfeld auf. In allen Spulen oder Phasen, deren mittlere, wirk-

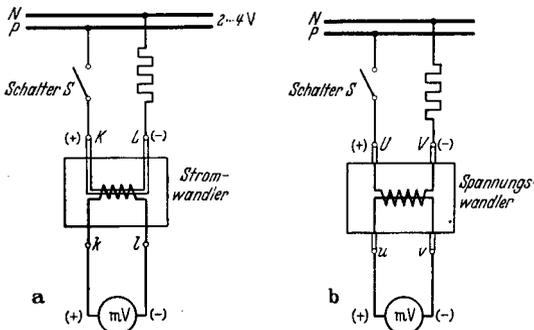


Abb. 6. Bestimmung oder Kontrolle der richtigen Klemmenbezeichnung an Strom- (a) und Spannungswandlern (b). Primärseite so an Gleichspannung legen, daß Klemme K bzw. U (+) wird. Beim Einschalten zeigt Sekundärklemme k bzw. u (+) -Potential.

Spannung induziert. In allen genau senkrecht hierzu liegenden Spulen herrscht die Spannung Null. Die übrigen Spulen führen Spannungen zwischen Null und dem Höchstwert, insbesondere ist die Spannung der um 60° und um 120° verdrehten Wicklungen genau gleich $\frac{1}{2}$ der Höchstspannung. Dies folgt aus der Tatsache, daß bei einachsigen Feld die induzierten Spannungen sich mit dem Kosinus des Verdrehungswinkels ändern. Soll z. B. bei gegenseitig drehbar angeordneten Wicklungen, also im Falle eines Drehreglers, die Sekundärwicklung in die gleiche Lage wie die Primärwicklung gebracht werden, so wird die Phase $U-X$ primär an Spannung gelegt und der Rotor so lange verstellt, bis die Spannung der Phase $u-x$ sekundärseitig ihr Maximum erreicht. Um die Ungenauigkeit infolge des flachen Verlaufes dieses Höchstwertes auszuschalten, werden zur Kontrolle die Spannungen an Phase $v-y$ und $w-z$ gemessen, die genau miteinander übereinstimmen und dabei den halben Wert der Spannung der Phase $u-x$ haben müssen. Die verkettete Spannung der beiden letzten Phasen, also die Spannung zwischen $v-w$, ist Null, da diese beiden Einzelphasen zusammen wie eine einzige Ersatzphase wirken, deren Richtung senkrecht zur Phase $u-x$ steht (vgl. auch Abb. 4).

Die einphasige Erregung empfiehlt sich immer dann, wenn Verschaltungen vorliegen und zu allererst einmal die einzelnen Phasen als solche richtig erkannt werden sollen. Die darauf erfolgte Richtigstellung der Gesamtschaltung wird dann zweckmäßig mit dreiphasiger Erregung nachgeprüft.

Die induktive Ausmessung mit Gleichstromstößen wird bei Wechselstrommaschinen nur vereinzelt angewandt, aber man benutzt sie, um die richtige Bezeichnung der Klemmen von Strom- und Spannungswandlern nachzuprüfen. Abb. 6 gibt die hierzu nötige Anweisung.

D. Der Leerlaufversuch.

Der Leerlaufversuch gibt Aufschluß über die Eigenschaften des magnetischen Kreises, die bei leerlaufender Maschine auftretenden Verluste und das rein mechanische Verhalten bei Lauf. Er wird vorgenommen bei Nenndrehzahl, Nennfrequenz und Nennspannung. Nach Möglichkeit wird er ausgedehnt auf das Gebiet auch kleinerer und höherer Spannungswerte sowie auf die aus mechanischen Gründen stets vorgeschriebene Überdrehzahl von etwa 20 bis 120% der normalen. In der Art der Durchführung des Versuchs werden unterschieden das Motorverfahren und das Generatorverfahren, die beide zu den gleichen Ergebnissen führen.

Motorverfahren. Die zu prüfende Maschine wird an das Netz der vorgeschriebenen Spannung gelegt. Sie entnimmt diesem die im wesentlichen zur Deckung der Reibungs- und Eisenverluste nötige Leistung auf elektrischem Wege. Der Magnetisierungsstrom wird bei Transformatoren und Induktionsmaschinen aller Art ebenfalls dem Netz entnommen. Gleichstrommaschinen werden zweckmäßigerweise fremd-erregt, um von vornherein eine saubere Trennung zwischen Anker- und Erregerstrom auch bei selbsterregten Maschinen zu besitzen. Gemessen wird die Netzspannung U_0 , die der Maschine zufließende Wirkleistung N_0 , der aufgenommene Leerlaufstrom I_0 , der Erregerstrom i_0 und gegebenenfalls der Leistungsfaktor $\cos\varphi_0$. Meist geschieht die Bestimmung des letzteren rechnerisch aus den übrigen Meßergebnissen. Zur Gewinnung der Leerlaufkennlinien wird die Messung bei konstant gehaltener Drehzahl und veränderter Netzspannung wiederholt. Die Spannung kann meist bis auf ein Drittel ihres Nennwertes abgesenkt werden, ohne daß die Maschine beginnt, unstabil zu werden. Weitere Erniedrigung führt gelegentlich zu Schwierigkeiten und bringt meist keine wesentlichen Aufschlüsse. Die Erhöhung der Spannung über den Nennwert hinaus sollte immer durchgeführt werden, um das Verhalten der Maschine in Hinsicht auf die Eisenverluste und den Magnetisierungsbedarf bei höherem magnetischem Kraftfluß kennenzulernen.

Die wichtigste der **Leerlaufkennlinien** ist die sog. Sättigungskurve, die auch mit Magnetisierungs- oder mit Leerlaufkurve bezeichnet wird. Sie gibt den Zusammenhang zwischen Magnetisierungsstrom und der EMK E . Letztere wird dabei fast immer der Leerlaufklemmenspannung U_0 gleichgesetzt, da die geringen Unterschiede, die durch den Spannungsabfall an den inneren ohmschen oder induktiven Widerständen infolge der Leerlaufstromaufnahme entstehen, unberücksichtigt bleiben können. Nur bei Gleichstrommaschinen zieht man etwa 2 V für den Abfall unter den Bürsten ab. Der Magnetisierungsstrom ist bei Gleichstrommaschinen gleich dem Erregerstrom, bei Induktionsmaschinen

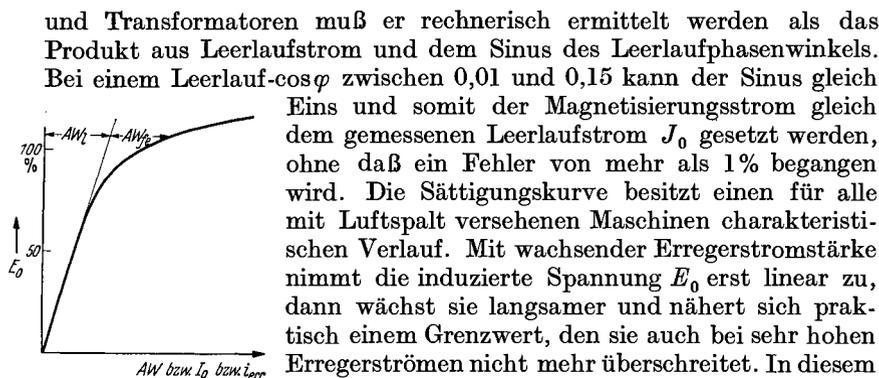


Abb. 7. Sättigungskennlinie.

$AW_1 = AW$ zur Magnetisierung des Luftspaltes.
 $AW_{fe} = AW$ zur Magnetisierung des Eisens.

und Transformatoren muß er rechnerisch ermittelt werden als das Produkt aus Leerlaufstrom und dem Sinus des Leerlaufphasenwinkels. Bei einem Leerlauf- $\cos\varphi$ zwischen 0,01 und 0,15 kann der Sinus gleich Eins und somit der Magnetisierungsstrom gleich dem gemessenen Leerlaufstrom J_0 gesetzt werden, ohne daß ein Fehler von mehr als 1% begangen wird. Die Sättigungskurve besitzt einen für alle mit Luftspalt versehenen Maschinen charakteristischen Verlauf. Mit wachsender Erregerstromstärke nimmt die induzierte Spannung E_0 erst linear zu, dann wächst sie langsamer und nähert sich praktisch einem Grenzwert, den sie auch bei sehr hohen Erregerströmen nicht mehr überschreitet. In diesem Zustand ist die Maschine voll gesättigt. Da einerseits die induzierte Spannung, also auch der Kraftfluß, zur völligen Ausnützung des aktiven Eisens möglichst hochgetrieben werden soll, andererseits aber ein zu hoher Aufwand an Erregerenergie ver-

mieden werden muß, ist die Kenntnis der Sättigungskurve zur Beurteilung dieser Verhältnisse besonders bei allen Erstauführungen von besonderer Wichtigkeit. In der Praxis werden daher bei allen Maschinen mindestens zwei bis drei, meist jedoch noch mehr Meßpunkte ermittelt. In Abb. 7 ist eine Sättigungskurve üblicher Form dargestellt.

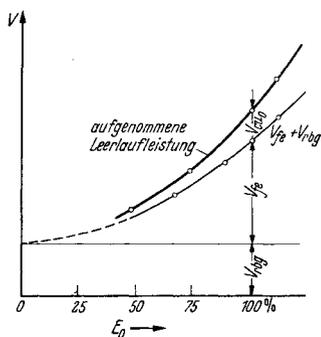


Abb. 8. Graphische Aufteilung der Leerlaufverluste eines Asynchronmotors in Leerlauf-Kupferverluste V_{cu} , Eisenverluste V_{fe} und Reibungsverluste V_{rb} .

Leerverluste. Zur weiteren Beurteilung der Maschine gehört die genaue Kenntnis der Leerverluste, also der Reibungs- und der Eisenverluste bei unbelasteter Maschine. Diese ergeben sich aus der bei Leerlauf dem Netz entnommenen Leistung N_0 nach Abzug der vom Leerlaufstrom in der Wicklung hervorgerufenen Kupferverluste V_{cu} . Da letztere meist nur einen sehr geringen Bruchteil ausmachen, ist es oft zulässig, die Leerverluste gleich der Leerlaufleistung zu setzen. Dies gilt besonders für Gleichstrommaschinen und für Transformatoren. Langsamlaufende Asynchronmotoren und solche für Kranbetrieb sind auszunehmen, da bei ihnen der Leerlaufstrom bis zu 80% des Vollaststromes ausmachen kann, wodurch Leerlauf-Kupferverluste in Höhe von 64% der Nennlastverluste auftreten. Unterbleibt die Berücksichtigung der Leerlauf-

Kupferverluste, so bewegt man sich hinsichtlich der Leerverluste $V_{fe} + V_{rb}$ auf der sicheren Seite. Die Leerverluste werden als Verlustkurve in Abhängigkeit der Spannung aufgetragen. Die Kurve hat parabolischen Verlauf und schneidet auf der Ordinate für Spannung Null den Betrag der Reibungsverluste ab. Da die direkte Aufnahme, wie oben erwähnt, nur bis etwa

$\frac{1}{3}$ Nennspannung möglich ist, muß die Verlängerung der Verlustkurve nach unten sinngemäß von Hand erfolgen. Um die Unsicherheit hierbei zu verringern, empfiehlt es sich, die Kurve auch noch über dem Quadratwert der Spannungen aufzutragen. Infolge der fast rein quadratischen Abhängigkeit der Eisenverluste von der Spannung liegen nunmehr die Meßpunkte auf einer geraden Linie, die unschwer und mit größerer Sicherheit nach Null zu verlängert werden kann. Die Abb. 8 zeigt Verlustkurven einer Asynchronmaschine mit verhältnismäßig hohen Leerlauf-Kupferverlusten, Abb. 9 die Trennung der Verluste.

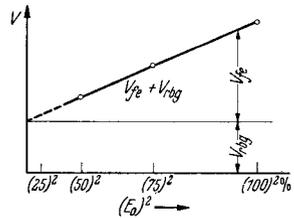


Abb. 9. Graphische Trennung der Eisen- und Reibungsverluste durch Darstellung der Leerverluste über dem Quadrat der Spannung.

Generatorverfahren. Bei diesem Verfahren wird die Probemaschine mit einem geeichten, fremderregten Antriebsmotor gekuppelt und durch diesen auf Nenndrehzahl hochgefahren. Dann wird sie erregt, und zwar nach Möglichkeit mittels Fremderregung. Die Deckung der Eisen- und der Reibungsverluste geschieht auf mechanischem Wege über die Welle. Kupferverluste treten nur in der Erregerwicklung auf. Sie werden vom Erregernetz gedeckt und stören die Messung nicht. Die Aufnahme der Sättigungskurve geschieht durch Betätigung des Feldreglers unter Beobachtung konstanter Drehzahl. Die EMK E wird fehlerfrei gemessen, da in den induzierten Wicklungen kein Strom fließt. Die Ermittlung der Leerverluste $V_{fe} + V_{rbg}$ ist dagegen umständlicher als beim Motorverfahren; sie werden aus der Leistungsaufnahme des Antriebsmotors nach Abzug seiner Verluste errechnet. In der Praxis genügt es manchmal, seine Leistungsaufnahme zu messen und von ihr nur die Leerlaufleistung des abgekuppelten Motors abzuziehen. Dies führt zu brauchbaren Ergebnissen, wenn der Antriebsmotor verhältnismäßig groß ist. Bei genaueren Messungen jedoch müssen alle Verluste im Antriebsmotor berücksichtigt werden. Ein zweckmäßiges Verfahren ist auf S. 229 dargestellt. Der große Vorzug des Generatorverfahrens liegt darin, daß kein Netz regelbarer Spannung benötigt wird und daß die Ermittlung der Sättigungskurve und der Reibungsverluste schnell und einwandfrei möglich ist. Bei Synchronmaschinen wird es oft, bei Gleichstrommaschinen gleich häufig wie das Motorverfahren angewandt. Verschlossen bleibt es natürlich allen Maschinen ohne eigenen Erregerkreis.

Schleuderprobe. Nach Abschluß der eigentlichen Leerlaufmessungen wird die Überdrehzahl gefahren. Diese beansprucht die Maschine in mechanischer Hinsicht. Die Probe ist nötig, um festzustellen, ob die Maschine den sich unter Umständen im späteren Betrieb ergebenden erhöhten Drehzahlen gewachsen ist. Diese treten auf z. B. bei Generatoren nach Lastabwurf, bevor der Drehzahlregler die Antriebsleistung gedrosselt hat, oder bei Hauptstrommotoren bei Entlastung, oder bei Motoren mit zu hohen durchziehenden Lasten. Die Überdrehzahl hängt im wesentlichen von der Verwendungsart und nicht der Maschinengattung selbst ab. Die Probe wird bei großen Maschinen manchmal in sog.

Schleudergruben vorgenommen, um eine Gefährdung der Umgebung auszuschließen. Liegt die Überdrehzahl nur 20 bis 50% über der normalen, so wird häufig gleichzeitig, wie auf S. 6 erwähnt, die Probe mit erhöhter Spannung vorgenommen.

Die Zeit für die Schleuderproben beträgt 2 min. Sie wird in den Prüfnachweisen besonders vermerkt.

Der mechanische Lauf. Während des Leerlaufes wird auch die Güte des mechanischen Laufes der Maschine geprüft. Die Geräusche dagegen hängen oft stark von der Belastung ab und können daher im Leerlauf nicht abschließend beurteilt werden.

Störungen an den Lagern machen sich bemerkbar durch übermäßige Erwärmung, bei deren Feststellung die Maschine sofort stillgesetzt werden muß, und durch schabende Geräusche, wie sie besonders an defekten Wälzlagern beobachtet werden können. Das schadhafte Lager wird durch Abhören mittels eines angelegten Stabes leicht ermittelt.

Über richtiges Wellenspiel in axialer Richtung, einseitiges Anlaufen infolge magnetischen Zuges, Ölsaugen durch den Ventilator u. ä., unterrichtet der Augenschein.

Unruhiger Lauf der Maschine kann durch Berühren mit der Hand, die allerdings sehr empfindlich ist, festgestellt werden. Zu objektiven Ergebnissen gelangt man mit Hilfe der in Abschnitt III angegebenen Geräte. Um die Möglichkeit magnetischer Unsymmetrien als Ursache erkennen zu können, wird die Maschine mit und ohne Spannung geprüft. Läuft nur die erregte Maschine schlecht, so ist durch genaues Luftspalteinstellen für Abhilfe zu sorgen. Zeigt dagegen auch die auf ebener Platte mit gut aufliegenden Füßen stehende Maschine noch Unruhe, nachdem sie vom Netz getrennt ist, so muß sie dynamisch nachbalanciert werden. Um auch eine etwaige schlechte Aufstellung als Ursache auszuschließen, wird in besonderen Fällen die Maschine freihängend untersucht. Zu diesem Zweck wird sie auf dem Boden stehend angefahren, dann mit dem Kran in die Höhe gehoben und vom Netz abgeschaltet. Zeigt sich jetzt während des Auslaufes keinerlei Unruhe, so ist die Auswuchtung einwandfrei. Zu warnen ist vor dem Einschalten der Maschine in dieser Lage. Das Anlaufdrehmoment wirkt auf den Ständer im gleichen Maße verdrehend wie auf den Läufer und vermag daher die Maschine aus dem Kranhaken zu schnellen.

Ein etwas unruhiger Lauf, der erst außerhalb des Drehzahlbereiches, in welchem die Maschinen laufen sollen, auftritt, wird meist nicht beanstandet.

Bei Untersuchung von Aggregaten, die aus mehreren Maschinen bestehen und bei welchen zu Beginn oft unruhiger Lauf festgestellt wird, führt nur die Abkuppelung aller Einzelmaschinen voneinander und getrennte Prüfung zum Ziel.

Unter Berücksichtigung aller Ergebnisse, die der Leerlaufversuch liefert, ist es verständlich, daß er an jeder Maschine vorgenommen werden sollte, und daß er insbesondere bei der Prüfung einer ganzen Reihe gleicher Maschinen sogar eine ausreichende Probe darstellt, sofern ein

Vergleich mit den Messungen an einigen vollständig durchgeprüften Maschinen praktische Übereinstimmung zeigt. Auf dem Prüfnachweis ist in solchen Fällen der entsprechende Hinweis zu machen.

E. Der Belastungsversuch.

Die Belastungsversuche werden vorgenommen, um die Maschinen unter den gleichen oder doch möglichst den angenäherten Bedingungen zu prüfen, unter denen sie später zu arbeiten haben. Die Prüfung erstreckt sich dabei zuerst auf die Untersuchung der Belastbarkeit an sich, wie sie durch die elektrischen Eigenschaften bedingt ist; dann auf das charakteristische Verhalten bei veränderlicher Last im stationären Betrieb und mitunter auf die Stabilität, besonders bei mechanischem und elektrischem Parallellauf mit anderen Maschinen. Der Dauerlastversuch geschieht zur Bestimmung der Erwärmung, die die Wicklungen, das wirksame Eisen, der Kommutator, die Schleifringe, die Lager und die andern Teile der Maschine bei Nennlast erfahren.

Die Belastungskennlinien. Zur Aufnahme der Belastungskennlinien wird die Probemaschine in einer der im Abschnitt I, K beschriebenen Belastungsarten geprüft. Als grundlegende Kennlinien gelten die Kurven, welche den Verlauf der Klemmenspannung bei Generatoren und den der Drehzahl bei Motoren in Abhängigkeit der Last darstellen. Hinzukommen bei Maschinen mit eigenem Erregerkreis die Regelkennlinien, welche den Zusammenhang zwischen Erregerstrom und der Last bei nunmehr konstant gehaltener Spannung bzw. Drehzahl zeigen. Ergänzt werden die Belastungskennlinien durch die Kurven für den Wirkungsgrad und gegebenenfalls für den Leistungsfaktor. Bei Synchrongeneratoren und Motoren ergibt sich eine ganze Schar von Regelkurven, wobei zu jeder einzelnen entweder ein bestimmter Wert des Leistungsfaktors oder der Wirklast gehört. Weiterhin werden bei allen drehzahlregelbaren Motoren die Kennlinien für verschiedene Geschwindigkeiten ermittelt, wobei zum mindesten die tiefste, die mittlere und die höchste Drehzahl berücksichtigt werden.

Die Prüfung erfolgt bei Teillast, Vollast und Überlast. Für letztere schreiben die REM bei den einzelnen Maschinengattungen einen Mindestwert vor, der einzuhalten und nachzuprüfen ist. Die Praxis geht über diese Anforderungen häufig hinaus, so daß Überlastungen von 100 bis 200% und mehr verlangt werden können. Rechnerische Verfahren, die auf Meßergebnissen beruhen, helfen da aus, wo die unmittelbare Prüfung der geforderten Leistungsfähigkeit nicht möglich ist. Den Vorzug verdient die unmittelbare Messung.

Die Erwärmungsprobe (Dauerlauf). Zur betriebssicheren Maschine gehört eine Erwärmung, die keinesfalls zu einer Gefährdung insbesondere der Wicklungsisolation im späteren Gebrauch führen kann. Als bindende Grundlage für die zulässige Temperaturzunahme gelten in den meisten Ländern bestimmte Vorschriften; diese schreiben für die einzelnen Wicklungen und für das benachbarte Eisen Grenztemperaturen vor, die von der Art der in verschiedene Klassen eingeteilten Isolation abhängen.

Die Kenntnis der wirklich auftretenden Erwärmung ist aus zwei Gründen von besonderer Wichtigkeit. Einmal muß der Nachweis erbracht werden, daß die Bedingungen, unter denen die Maschine verkauft wurde, eingehalten worden sind, daß also die gewährleistete Temperaturzunahme nicht überschritten wird. Dann soll in Erfahrung gebracht werden, um wieviel die vorgesehene Leistung etwa noch heraufgesetzt werden kann, bis die zulässige Grenzerwärmung erreicht wird. Diese gesteigerte Leistung heißt die thermische Grenzleistung der Maschine. Sie ist durch die thermischen Verhältnisse, also meist durch die Art der Kühlung bedingt und kann manchmal nach deren Verbesserung noch weiter heraufgesetzt werden. Sie darf nicht mit der Kippleistung oder Höchstleistung verwechselt werden, die ohne Rücksicht auf die dabei auftretenden Erwärmungen nur durch die physikalischen Eigenschaften bedingt ist und für die kurzzeitige oder stoßweise Überlastbarkeit von Interesse ist. Bei mittleren und großen Maschinen liegt in der Regel die thermische Grenzleistung weit unter der physikalischen Höchstleistung.

Zur Bestimmung der Erwärmung dient der Dauerlauf der belasteten Maschine. Er heißt in der Praxis der Temperaturlauf. Nach Möglichkeit wird der Temperaturlauf bei Nennspannung, Nennstrom und Nenndrehzahl vorgenommen. Bei regelbaren Maschinen ist es zweckmäßig, einen Lauf mit der tiefsten und einen zweiten Lauf mit der höchsten Drehzahl vorzunehmen. Zur Erreichung wirklich beharrlicher Temperaturen wird der Lauf auf Stunden, meist zwischen 4 und 8 Stunden, ausgedehnt. Zu bemerken ist, daß offene, gut belüftete Maschinen bereits nach kurzer Zeit, geschlossene Maschinen erst nach vielen Stunden die End-erwärmung erreichen. Maschinen für aussetzenden Betrieb werden bei genauer Prüfung auch im Aussetzbetrieb gefahren. Eine Schaltwalze betätigt die erforderlichen Schütze, welche das Einschalten, das Abschalten und gegebenenfalls das Abbremsen besorgen. In der Praxis begnügt man sich manchmal mit abgekürzten Ersatzläufen, bei denen die Maschine nur 10 bis 60 min mit vollem Strom belastet wird. Dieses Verfahren empfiehlt sich nur, wenn die Ersatzzeit genau bekannt ist und mehrere Maschinen gleicher Bauart zur Probe kommen.

Bei großen Einheiten ist es nicht immer möglich, die Maschinen voll zu belasten. In diesem Fall wird dann ein Lauf mit vollem Strom bei verringerter Spannung vorgenommen. Die Wicklungstemperaturen erreichen bei offener Maschine fast denselben Wert wie beim richtigen Betrieb. Die Eisenerwärmung ist infolge der stark verringerten Eisenverluste natürlich zu klein. Bei ganz großen Maschinen, vornehmlich bei den großen Synchron- und Gleichstromgeneratoren, wird ein Lauf im reinen Kurzschluß mit Nennstrom und ein zweiter Lauf im reinen Leerlauf mit Nennspannung gefahren. Die sich hierbei ergebenden Temperaturen werden addiert und als die wahre Übertemperatur betrachtet. Obwohl diese Überlagerung nicht ganz richtig ist, liefert sie in der Praxis doch sehr brauchbare Ergebnisse, die nur um einige Grad über den wahren Werten liegen. Zur Abkürzung des Temperaturlaufes wird die Maschine oft in der ersten halben oder ganzen Stunde mit erhöhter Stromstärke bei entsprechend schnellerer Temperaturzunahme

gefahren. Über die hierbei zu wählenden Werte kann nur die Erfahrung entscheiden. Sollen an derselben Maschine zwei Läufe etwa bei zwei verschiedenen Drehzahlen gemacht werden, so ist es mit Rücksicht auf die Zeitersparnis erwünscht und meist auch unbedenklich, den zweiten, verkürzten Lauf unmittelbar an den ersten anzuschließen. Dies setzt allerdings eine in beiden Fällen praktisch gleiche Erwärmung voraus.

Die Messung der Erwärmung. Die Messung der Temperaturen an den zugänglichen Maschinenteilen während des Laufes geschieht mit Flüssigkeitsthermometern mit Quecksilber- oder Alkoholfüllung, mit Thermoelementen oder mit elektrischen Widerstandsthermometern aus Nickel oder Platin. Diese Geräte, ihre Anwendung und Wirkungsweise sind im Abschnitt III, B eingehend behandelt. Die mittlere Erwärmung der Wicklungen kann erst nach dem Abstellen der Maschine durch Messung der warmen Wicklungswiderstände bestimmt werden. Zwischen Widerstand und Temperatur besteht bei den reinen Metallen der einfache Zusammenhang:

$$\frac{R_{\text{warm}}}{R_{\text{kalt}}} = \frac{T + t_{\text{warm}}}{T + t_{\text{kalt}}},$$

wobei T ein vom Metall abhängiger Wert ist, der bei Kupfer gleich 235 und bei Aluminium gleich 245 ist. Die Abhängigkeit des Widerstandes ist in Abb. 10 wiedergegeben. Bei der Temperatur von $-T^{\circ}$ verschwindet praktisch jeglicher Widerstand.

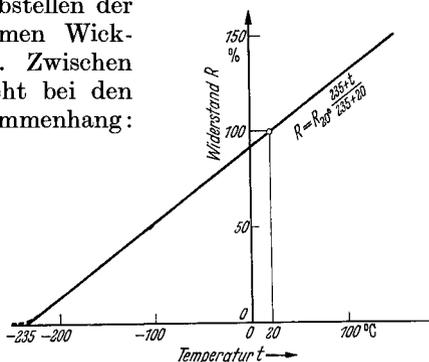


Abb. 10. Kupferwiderstand in Abhängigkeit der Temperatur.

Aus der Messung des warmen Wicklungswiderstandes kann man also rückwärts auf die mittlere Temperatur der Wicklung schließen. Für die Übertemperatur, die vor allen Dingen interessiert, ergibt sich folgende Beziehung, in der auch eine etwaige Zunahme der Raumtemperatur berücksichtigt wird, für Kupferwicklungen:

$$t_{ii} = \Delta r \% \cdot \frac{235 + t_{\text{kalt}}}{100} - (t_{\text{raum,warm}} - t_{\text{kalt}}),$$

wobei bedeutet:

$$\Delta r \% = \frac{(R_{\text{warm}} - R_{\text{kalt}})}{R_{\text{warm}}} \cdot 100$$

- und t_{kalt} = Wicklungstemperatur bei kalter Messung,
- $t_{\text{raum,warm}}$ = Raumtemperatur bei warmer Messung.

Dies gilt, solange die Kühlluft dem Raume entnommen wird. Bei Fremdbelüftung ist die Temperatur der ankommenden Kühlluft, bei Wasserkühlung seine Eintrittstemperatur statt $t_{\text{raum,warm}}$ einzusetzen, da stets die Übertemperatur über das Kühlmittel bestimmt werden soll.

Die praktische Durchführung des Dauerlaufes. Vor Beginn des Laufes wird die Maschine an verschiedenen Stellen mit Thermometern oder mit Thermoelementen ausgerüstet. Bei offener Bauart wird ein Gerät mög-

lichst gut an das aktive Eisenpaket befestigt. Geeignet sind die meist zugänglichen Ventilationskanäle. Die Berührungsstelle wird durch aufgeklebten Filz vor dem Zutritt kühlender Luft geschützt. Bei geschlossenen Maschinen wird die Kranöse oder eine andere geeignete Schraube herausgedreht, an deren Stelle das Thermometer eingeführt wird. Durch Ausfüllern mit Stanniol wird ein guter Wärmekontakt geschaffen. Auch hier isoliert eine Filzschicht vor der Außenluft. Die Wickelköpfe der ruhenden Wicklungen nehmen weitere Geräte auf, die so tief wie möglich eingeschoben werden. Bei geschlossenen Maschinen gelingt oft das Anbringen eines Thermoelementes im Innern, dessen Zuleitungen durch eine der zu Luftspaltmessungen vorgesehenen Lagerschildbohrungen nach außen geführt wird. Im Abstand von 1 m und in gleicher Höhe mit der Maschine wird die Raumtemperatur gemessen. Bei Verwendung besonderer Kühlmittel oder bei besonders angebrachten Luftein- und -austrittsstutzen wird noch die Temperatur des ein- und austretenden Kühlmittels, bzw. der angesaugten und ausgeblasenen Luft mittels eigens angebrachter Thermometer ermittelt.

Alle Geräte werden zu Beginn des Laufes und dann in regelmäßigen Abständen von etwa $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ Stunde abgelesen. Diese Werte werden unter genauer Zeitangabe mit den elektrischen Größen und der Drehzahl im Nachweis eingetragen. Die Temperaturzunahme der sich erwärmenden Teile, also insbesondere des Eisens und der Wicklungen, erfolgt erst geradlinig mit der Zeit, wird dann geringer und hört auf, wenn die Endtemperatur erreicht ist, bei welcher alle umgesetzten Verluste nach außen abgegeben werden.

Infolge der verschieden hohen Verluste und der ebenfalls verschieden guten Abkühlmöglichkeit von Eisen und Wicklung erreichen beide nach einem auch anfangs voneinander abweichenden Temperaturanstieg ihre Enderwärmung zu verschiedenen Zeiten. Als abgeschlossen kann der Temperaturlauf erst dann gelten, wenn die Erwärmung gegenüber der Raumtemperatur sich überhaupt nicht mehr oder doch nur noch sehr langsam, etwa 1° in der halben Stunde, ändert. Dies ist aus dem Vergleich der letzten Ablesungen ohne weiteres ersichtlich. Die Temperaturzunahme von Erregerwicklungen bei Gleichstrom- und Synchronmaschinen, deren Strom konstant zu halten ist, kann zuverlässig an der zunehmenden Erreger Spannung beobachtet werden, die sich in gleichem Maße wie der ansteigende Widerstand der Wicklung ändert. Der Spannungsmesser muß natürlich hinter dem Feldregelwiderstand angeschlossen sein. Bei Gleichstrommotoren wird das Feld im allgemeinen nicht nachgeregelt. Hier gibt der abnehmende Erregerstrom bei konstanter Spannung am Feld das Maß für die zunehmende Erwärmung. Bleiben Strom und Spannung konstant, so hat die Erregerwicklung ihren Beharrungszustand erreicht. Im übrigen sei darauf hingewiesen, daß sich aus dem Verhältnis Spannung zu Strom der Erregerwicklungswiderstand als einziger während des Temperaturlaufes dauernd überwachen läßt. Es empfiehlt sich, die daraus errechenbare Temperaturzunahme mit der anderen, die sich aus der Widerstandsmessung mit der Brücke nach Stillsetzung ergibt, zusammen im Nach-

weis zu vermerken. Der Fehler infolge der Abkühlung in der Zeit zwischen Abstellen und Messen der Maschine fehlt hierbei.

Nach Erreichen der Endtemperaturen wird die Maschine abgestellt und sogleich nach Lösen aller die Messung störenden Schaltverbindungen der Widerstandsmessung unterzogen. Hierbei wird das gleiche Meßverfahren unter Verwendung der gleichen Widerstände bzw. derselben Meßstromstärke angewandt, das bei der kalten Widerstandsmessung benutzt wurde. Möglichst gleichzeitig werden jene thermometrischen Messungen, die bei Lauf nicht möglich waren, an Läuferwicklung, Läuferisen, Schleifringen oder Kommutator durchgeführt. Auch die anderen Thermometer werden noch einmal abgelesen, da sich manchmal nach einigen Minuten noch ein höherer Wert einstellt. Die Auswertung der Widerstandszunahme ergibt durchweg höhere Temperaturen als die thermometrische Messung, die ja nur außerhalb der Isolation und an den gut gekühlten Wickelköpfen möglich ist. Der Unterschied beträgt 5 bis 10°, kann aber auch noch größer ausfallen. Dies rührt daher, daß die Widerstandsmessung den Mittelwert für die ganze Wicklung ergibt, während die Thermometermessung nur einen örtlichen Wert anzeigt. Die Temperaturen im Innern, besonders in der Mitte der einzelnen Eisenpakete, können noch wesentlich höher liegen.

Bei sehr genauen Messungen wird der Abkühlung der Wicklungen während des Messens dadurch Rechnung getragen, daß wiederholte Widerstandsbestimmungen unter genauer Zeitbestimmung vorgenommen werden. Auf diese Weise gewinnt man eine zeitliche Abkühlkurve, deren rückwärtige Verlängerung bis zum Zeitpunkt der Beendigung des Temperaturlaufes den wahren Temperaturwert ergibt. Dieses Meßverfahren ist zeitraubend und wird in der Praxis sehr wenig angewandt; man nimmt den kleinen Fehler, der durch die stets zwischen Abschalten der Maschine und Durchführung der Widerstandsmessungen verstreichende Zeit hereinkommt, in Kauf. Um ihn klein zu halten, wird die vermutlich sich am stärksten erwärmende Wicklung zuerst, die Gruppe der weniger beanspruchten übrigen Spulen anschließend gemessen. Maschinen mit großem eigenem oder angekuppeltem Schwungmoment müssen zur Verkürzung des Auslaufes abgebremst werden. Die Fremdbelüftung ist in allen Fällen sofort abzustellen.

Grenzleistung. Bei Neuausführungen von Maschinen werden häufig weitere Temperaturläufe, zum Teil im unmittelbaren Anschluß an den ersten, vorgenommen. Bei diesen Läufen wird eine Leistungserhöhung vorgenommen, die voraussichtlich, nach dem Ergebnis des ersten Laufes zu schließen, zur zulässigen Grenzerwärmung führen wird. Sind z. B. 60° Zunahme in der Wicklung zulässig und hat der erste Lauf eine Übertemperatur von nur 48° in der am stärksten erwärmten Wicklung ergeben, so wird der zweite Lauf mit etwa im Verhältnis 60 zu 48 erhöhten Wicklungsverlusten vorgenommen. Die Stromstärke wird daher im Verhältnis der Wurzel hieraus, also auf das $\sqrt{60/48} = 1,11$ fache erhöht. Um ein wirklich zuverlässiges Ergebnis zu besitzen, erfolgt noch die Vornahme eines dritten Laufes mit einer Stromstärke, die wahrscheinlich eine geringe Überschreitung der Grenzerwärmung bringen

wird. Die Erwärmung aus diesen drei Läufen wird in Kurvenform, und zwar üblicherweise über dem Quadrat des Stromes dargestellt (Abb. 11). Bei fehlerfreier Vornahme der Läufe und der Messung ergibt sich dann sehr angenähert eine Gerade, die für den Strom Null auf der Ordinate

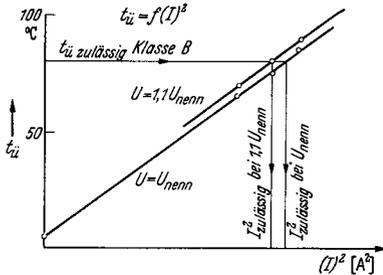


Abb. 11. Bestimmung der thermisch zulässigen Grenzleistung bei Nennspannung und bei 10 % höherer Spannung.

noch einen bestimmten Wert abschneidet. Diese Temperatur entspricht im wesentlichen der Erwärmung infolge der Eisenverluste. Wo sich die Kurve mit der zulässigen Übertemperatur schneidet, wird die wirklich zulässige Stromstärke und damit die thermische Grenzleistung bei der gegebenen Spannung abgelesen. Eine weitere Leistungssteigerung ist jetzt nur noch möglich durch Erhöhung des Kraftflusses, also durch Erhöhung der zugeführten Spannung.

Für die in ein oder zwei Stufen erhöhte Spannung werden neue Läufe, am besten wiederum mit verschiedenen Stromstärken, durchgeführt. Die ihnen entsprechenden Erwärmungskurven liegen infolge der erhöhten Eisenverluste etwas über der zuerst gewonnenen Kurve. Die Stromstärke muß demnach bei höheren Spannungen etwas verringert werden, doch kann sich oft ein beträchtlicher Gewinn an Mehrleistung ergeben. Ob und inwieweit die Flußerhöhung tatsächlich durchgeführt werden darf, wird allerdings erst unter Berücksichtigung der veränderten Sättigungsverhältnisse, der etwaigen Verminderung von Wirkungsgrad und Leistungsfaktor und nach Maßgabe der Reichlichkeit der Erregung entschieden.

Gelegentlich zeigen Maschinen einer Type, die bereits früher mit gutem Ergebnis durchgeprüft worden ist, höhere Erwärmungen, als sich nach den damaligen Messungen ergeben dürften. Nach Ausschaltung etwaiger grober Fehler in der Versuchsdurchführung, die in zu hoher Belastung, Vornahme eines Dauer- statt Stunden- oder Aussetzlaufes u. ä. bestehen können, muß der Lüftung, insbesondere der Luftführung, Aufmerksamkeit geschenkt werden. Der häufigste Ausführungsfehler besteht darin, daß die Luftführungsbleche zu großen Abstand vom Lüfter haben oder gar fehlen. Schon eine geringe Annäherung derselben um wenige Millimeter vermag die Temperatur um 5 bis 10° und unter Umständen noch mehr herabzusetzen. Andere Ursachen bestehen in ungeeignetem Versuchsaufbau, etwa darin, daß die Maschine z. B. von ihrer Belastungsmaschine mit warmer Luft angeblasen wird oder die eigene Warmluft wieder ansaugt. Ursachen, die meist nicht mehr beseitigt werden können, sind z. B. zu gedrängt gewickelte Spulenköpfe und bei geschlossenen Maschinen nicht ganz satt an der Gehäuseinnenwand anliegende Ständerbleche.

Belüftungsmessungen. Bei Erstauführungen und bei größeren Maschinen werden außer den Temperaturen der eintretenden und der ausströmenden Luft auch die minutliche Kühlluftmenge und ergänzend der Luftwiderstand, den die Maschine bietet, gemessen.

Üblicherweise wird der Maschine eine Luftmenge von 3,0 bis 3,5 m³/min je Verlust-kW zugeführt. Dies entspricht einer Erwärmung der Luft um ungefähr 18 bis 15,5°. Die erforderliche Gesamtluftmenge kann daher überschläglich angenommen werden zu:

$$\begin{aligned} & \text{Kühlluftbedarf in m}^3/\text{min} \\ & = \text{Maschinenleistung in kW} \cdot \frac{100 - \text{Wirkungsgrad in } \%}{\text{Wirkungsgrad in } \%} \cdot 3,5. \end{aligned}$$

Beispielsweise beträgt die Kühlluftmenge einer Maschine von 350 kW Leistung mit einem Wirkungsgrad von 94,5%: 350 · (100 — 94,5)/94,5 · 3,0 bis 3,5 = 61 bis 71 m³/min.

Der Druckabfall, also der Luftwiderstand, liegt meist in den Grenzen zwischen 30 und 60 mm W.-S.

Luftmengenmessung. Die Luftmengenmessung kann durch direkte oder indirekte Geschwindigkeitsbestimmung mittels Anemometer oder Geschwindigkeitsmesser durchgeführt werden (S. 342). Man unterteilt den Luftaustrittsstutzen durch Schnüre in viele gleich große Quadrate, die man auf der einen Seite durch Zahlen, auf der anderen durch Buchstaben kennzeichnet. Nunmehr wird die Luftgeschwindigkeit in der Mitte eines jeden Quadrates gemessen, wobei auf die Richtung der Luftströmung zu achten ist. Ausströmende Luft wird mit +, einströmende Luft mit — bezeichnet. Überwiegend ist natürlich ausströmende Luft zu beobachten. Aus den Einzelgeschwindigkeiten wird unter Vorzeichenbeachtung die mittlere Geschwindigkeit über den ganzen Querschnitt berechnet, woraus sich die Austrittsluftmenge ergibt zu:

$$\begin{aligned} & \text{Austrittsluftmenge in m}^3/\text{min} \\ & = 60 \cdot \text{Mittlere Luftgeschwindigkeit in m/sec} \cdot \text{Austrittsquerschnitt in m}^2, \\ & \quad \bar{V} = 60 \cdot v_{\text{mittel}} \cdot Q. \end{aligned}$$

Zu beachten ist, daß auch aus anderen Öffnungen eine mehr oder minder große zusätzliche Luftmenge aus der Maschine austreten kann. Einen gewissen Anhalt über die Richtigkeit der Messung bietet obige Formel; einen besseren erhält man, wenn man die von der Luft mitgeführte Wärme mit den Verlusten der Maschine vergleicht. Letztere müssen allerdings infolge der zusätzlichen Wärmeabgabe durch Strahlung und Leitung etwas höher sein. Bei einem Temperaturunterschied von ($t_{\text{aus}} - t_{\text{ein}}$) der Kühlluft ergibt sich die abgeführte Wärme in Kilowatt zu:

$$\begin{aligned} & \text{Durch Kühlluft abgeführte Leistung in kW} \\ & = (t_{\text{aus}} - t_{\text{ein}}) \cdot \frac{\text{Kühlluftmenge in m}^3/\text{min}}{54,5}. \end{aligned}$$

Dies gilt für die normalen Bedingungen bei 760 mm Hg Luftdruck und etwa 20° Raumtemperatur.

Als Ergänzung seien noch die Formeln für Öl und Wasser als Kühlmittel angegeben:

$$\begin{aligned} & \text{Durch Öl abgeführte Leistung in kW} \\ & = (t_{\text{aus}} - t_{\text{ein}}) \cdot \text{Ölmenge in l/sec} \cdot 1,7. \\ & \text{Durch Wasser abgeführte Leistung in kW} \\ & = (t_{\text{aus}} - t_{\text{ein}}) \cdot \text{Wassermenge in l/sec} \cdot 4,2. \end{aligned}$$

Luftwiderstandsmessung und Leistungsbedarf des Lüfters. Der Luftwiderstand der Maschine wird bestimmt durch Messung des statischen Luftdruckes an der Eintritts- und an der Austrittsstelle der Luft, wobei die Differenz dieser beiden Drücke gleich dem gesuchten Wert ist. Der Lüfter muß sich außerhalb der beiden Meßstellen befinden, weshalb einwandfreie Messungen nur bei fremdbelüfteten Maschinen leicht durchführbar sind. Der Luftwiderstand wird in mm W.-S. angegeben.

Der Leistungsbedarf des Lüfters hängt von dem von ihm zu überwindenden Gesamtdruck ab, der sich aus dem zu überwindenden statischen Gegendruck der Maschine, also deren Luftwiderstand und aus dem dynamischen Druck der bewegten Luft zusammensetzt. Hinzu kommt unter Umständen noch der Widerstand von Rückkühlern oder Filtern sowie langer Luftkanäle. Der dynamische Druck beträgt:

$$p_{\text{dyn}} = \frac{v_{\text{luft}}^2 \cdot \gamma}{2 \cdot g} \text{ in mm W.-S. mit } v_{\text{luft}} = \text{Luftgeschwindigkeit, in m/sec,}$$

$$= \frac{v_{\text{luft}}^2}{16} \qquad \begin{array}{l} \gamma = 1,23 \text{ kg/m}^3, \\ g = 9,81 \text{ m/sec}^2. \end{array}$$

Der dynamische Druck ändert sich also mit dem Quadrat der Luftgeschwindigkeit, welchem Gesetz auch der Luftwiderstand der Maschine folgt. Wenn p_{stat} den Luftwiderstand bezeichnet, beträgt der Leistungsbedarf des Lüfters:

$$\text{Leistungsbedarf des Lüfters in kW} = \frac{\text{Luftmenge in m}^3/\text{min} \cdot (p_{\text{stat}} + p_{\text{dyn}})}{6120 \cdot \text{Lüfterwirkungsgrad}}.$$

Der Wirkungsgrad der Lüfter liegt etwa zwischen 0,40 und 0,60.

Geräusche. Die Geräusche der elektrischen Maschinen bestehen aus den Luft-, den magnetischen und den mechanischen Geräuschen, die unmittelbar als Luftschall oder mittelbar als Körperschall in den Raum gelangen.

In den Luftgeräuschen tritt als hauptsächlichste Frequenz die Nutenfrequenz des Läufers und weniger stark die Flügelfrequenz des Lüfters hervor.

Die magnetischen Kräfte pulsieren normalerweise mit 100 Hz und rufen daher Schwingungen dieser Frequenz samt ihren Obertönen hervor. Daneben ist ausgeprägt die Nutenfrequenz zu hören. Auch die magnetischen Oberfelder können zu starken Geräuschen Anlaß geben.

Die beiden Geräuscharten können durch Beobachtung der erregten und der unerregten Maschine voneinander getrennt werden.

Als Quelle mechanischen Geräusches kommen hauptsächlich die Bürsten der Kommutatormaschinen und außerdem Kugellager in Betracht.

Im allgemeinen findet sich stets ein Spektrum vieler Einzelschwingungen verschiedener Frequenzen in dem gesamten Maschinengeräusch.

Die Untersuchung erstreckt sich vornehmlich auf die Bestimmung der Lautstärke in Phon in einem bestimmten Abstand von der Maschine und auf die Untersuchung der Teiltöne, also des Spektrums, da hierdurch die hauptsächlichsten Schwingungen nach Stärke und Frequenz bestimmt und ihre Ursache daraufhin festgestellt werden kann. Die notwendigen Apparate sind kurz auf S. 338 beschrieben.

F. Der Kurzschlußversuch.

Nach beendigtem Temperaturlauf findet meist die Untersuchung der kurzgeschlossenen Maschine statt. Man nimmt diesen Versuch gern bei warmer Maschine vor, und außerdem verbleibt zu dieser Messung, die nicht allzulange dauert, meist noch die nötige Zeit. Einer anderen Reihenfolge steht natürlich nichts im Wege. Die Vornahme des Versuches geschieht im Lauf oder im Stillstand. Maschinen mit eigener Erregung werden im Lauf, die übrigen, also vor allem die Asynchronmaschinen, im Stillstand oder bei sehr geringer Geschwindigkeit geprüft. Synchronmaschinen mit Selbstanlauf arbeiten während des Hochlaufes wie Asynchronmotoren und erst nach dem Eintrittfallen als Synchronmaschinen. Sie werden während des Anlaufes und im Lauf untersucht. Der Kurzschlußversuch dient der Messung der Werte des Stoß- und des Dauerkurzschlußstromes, der Kurzschlußverluste, in denen die Zusatzverluste enthalten sind, der Kurzschlußdrehmomente und auch der mechanischen Kurzschlußfestigkeit von Wicklung und Gehäuse. Weiterhin werden aus diesen Ergebnissen eine Reihe von charakteristischen Größen ermittelt. Bei Gleichstrommaschinen wird im Kurzschluß bei offenem Erregerkreis die Höhe des selbsterregten Stromes festgestellt und eine etwaige Gegenmaßnahme getroffen. Die Ergebnisse werden in Form von Kurzschlußkennlinien dargestellt.

Die grundlegende **Kurzschlußkennlinie** zeigt den Verlauf des Kurzschlußstromes in Abhängigkeit des Erregerstromes bei Maschinen mit eigenem Erregerkreis und in Abhängigkeit der zugeführten Netzspannung bei den übrigen Maschinen. Diese Kennlinie ist meist eine gerade Linie. Erst bei höheren Strömen, die wesentlich über dem Nennwert liegen, zeigt sich eine Krümmung, die auf die beginnende Sättigung der Streuwege zurückzuführen ist. Aus der Kennlinie können charakteristische Größen wie Kurzschlußspannung, Kurzschlußreaktanz, Kurzschluß-AW u. a. ermittelt werden. Ergänzende Kennlinien sind jene, in welchen die übrigen Meßwerte, also Kurzschlußverluste, Leistungsfaktor und Drehmoment in Abhängigkeit von Strom oder Spannung dargestellt werden.

Kurzschlußdrehmoment. Bei allen selbstanlaufenden Motoren, wozu heute auch die meisten Synchronmotoren gehören, ist das Anzugsmoment durch Messung zu bestimmen. Nur bei Asynchronmotoren mit Schleifringankern und bei normalen Gleichstrommotoren mit Anlassern wird auf diese Messung, sofern nicht ungewöhnlich hohe Anlaufdrehmomente vorgeschrieben sind, verzichtet. Alle anderen Maschinen, also Asynchronmotoren mit Kurzschlußankern, Synchronmotoren mit besonderem Anlaufkäfig, Gleichstrommotoren mit tief heruntergehendem Regelbereich, Wechselstromkommutatormotoren und — als Sonderfall — asynchrone Schlupfregler werden dagegen auf ihre Drehmomententwicklung im Stillstand oder aus dem Stillstand heraus untersucht.

Der Versuch wird durchweg mit verringerter Spannung durchgeführt und das Ergebnis auf volle Spannung umgerechnet. Das Drehmoment und die aufgenommene Leistung werden quadratisch und der auf-

genommene Strom linear mit der Spannung auf deren Nennwert umgerechnet. Maschinen mit Dreieckschaltung werden oft im Stern bei Nennspannung geprüft. Dies entspricht einem im Verhältnis $1/\sqrt{3}$ verringerten Kraftfluß. Die Werte für Drehmoment, Leistung und Strom sind in diesem Falle durch Malnehmen mit 3 auf Dreieck umzurechnen. In Wirklichkeit sind die bei Nennspannung selbst beobachteten Größen höher, als sich nach diesen Umrechnungen ergibt, und zwar liegt dies an den oben erwähnten Sättigungserscheinungen der Streuwege. Die sichersten Werte liefert also der bei Nennspannung vorgenommene Versuch, der allerdings nur bei kleinen und mittleren Maschinen im Stillstand durchgeführt werden darf. Auch Wechselstromkommutatormaschinen können nur mit stark verringerter Spannung im Stillstand geprüft werden, da die Kurzschlußspannung unter den Bürsten sonst zum Aufglühen derselben und zum Verschmoren der Segmente führen würde.

Das Kurzschlußdrehmoment kann mit dem Hebelarm oder dem Torsionsstab gemessen werden, die in Abschnitt III beschrieben sind. Eine andere Versuchsanordnung wird dann bevorzugt, wenn das abgegebene Drehmoment nicht nur bei Stillstand, sondern auch bei kleinen Motorgeschwindigkeiten im normalen Drehsinn und im Gegendrehsinn untersucht werden soll. In diesem Fall wird mit dem Motor eine Gleichstrommaschine gekuppelt, welche regelbare Erregung besitzt und der ein regelbarer Strom zugeführt werden kann. Dieser wird entweder dem Gleichstromnetz über einen — allerdings recht großen — Widerstand oder besser einem besonderen Prüffeldumformersatz in Leonardschaltung entnommen. Durch Einstellen des Anker- oder Feldstromes der angekuppelten Hilfsmaschine kann die Drehzahl sehr feinfühlig auf Null oder kleine Werte im einen oder anderen Drehsinn gebracht werden. Bei Verwendung der Leonardschaltung empfiehlt es sich, die angekuppelte Maschine kräftig und die Leonarddynamo nur schwach im einen oder anderen Sinn zu erregen, da dann bei den kleinstmöglichen Ankerströmen das gewünschte Gegendrehmoment erzielt werden kann. Die Drehmomentermittlung erfolgt rechnerisch-graphisch aus den Werten des Anker- und des Feldstromes der Bremsmaschine nach dem in Abschnitt II, D gegebenen Verfahren oder besser an Hand von einmal aufgestellten Eichtafeln, in denen das Drehmoment in Abhängigkeit des Ankerstromes für die einzelnen Werte des Erregerstromes getrennt dargestellt ist. Ist die Hilfsmaschine eine Pendelmaschine, so wird das Drehmoment ausgewogen; ist sie über einen Torsionsstab angekuppelt, so wird es aus dessen Verdrehung abgelesen. Die empfindlichen Kommutatormaschinen und auch Asynchronmotoren, deren Stillstandsmoment stark von der jeweiligen Läuferstellung abhängt sowie Sondergleichstrommaschinen, deren tiefste Drehzahlkennlinie genau bestimmt werden muß, werden gern in dieser mit „Gegenstrom“ bezeichneten Anordnung untersucht.

Zu beachten ist bei allen Drehmomentmessungen der Erwärmungszustand der Maschine, da je nach Maschinengattung und Auslegung das Drehmoment sich mit der Erwärmung erhöhen oder vermindern

kann. Es ist also angebracht, neben der Messung zu vermerken, ob diese an der kalten oder an der warmen Maschine vorgenommen wurde, da Drehmomentunterschiede bis zu 30% beobachtet werden können.

Die Kurzschlußzusatzverluste. In den Wechselstrom- und den Gleichstromankerwicklungen der elektrischen Maschinen treten bei Stromdurchgang Verluste auf, die höher sind, als unter Zugrundelegung des mittels Gleichstrom gemessenen oder des berechneten Widerstandes zu erwarten sind. Der dem Wechselstrom bzw. kommutierenden Gleichstrom sich entgegengesetzte Wirkwiderstand muß also größer sein als dieser sog. Gleichstromwiderstand. Die Ursache liegt in den durch Stromverdrängung im Kupfer selbst auftretenden Wirbelstrom- und in den im aktiven Eisen und in den benachbarten metallischen Teilen sich zeigenden Zusatzverlusten. Sie können zusammen mit den normalen Ohmschen Verlusten im Kurzschlußversuch bestimmt werden. Da ihrer Messung bei Synchronmaschinen und bei Transformatoren keine Schwierigkeiten entgegenstehen, werden sie bei diesen beiden Gattungen auch stets durch Prüfung ermittelt. Gemessen werden die gesamten zugeführten Verluste bei Nennstromstärke des Kurzschlußstromes. Von ihnen werden die reinen Kupferverluste unter Berücksichtigung des bei der Messung vorhandenen Wicklungswiderstandes und bei umlaufenden Maschinen noch die Reibungsverluste abgezogen. Es verbleiben dann die Zusatzverluste, die zwischen 10 und 100% der eigentlichen Kupferverluste betragen können. Bei Umrechnung auf andere Stromwerte oder von einem abweichenden Versuchswert auf den Nennstrom werden sie wie die Kupferverluste quadratisch mit dem Strom geändert.

Obwohl bei Gleichstrommaschinen grundsätzlich auch eine solche Messung im Kurzschluß vorgenommen werden kann, verzichtet man doch mit Rücksicht auf die zu großen Fehlerquellen und Ungenauigkeiten bei der Vornahme und Auswertung auf diesen Versuch. Dasselbe gilt von den Asynchronmaschinen und den übrigen Maschinengattungen. Man berücksichtigt hier die Zusatzverluste durch einen festen Verlustprozentsatz der elektrisch umgesetzten Leistung bei Nennlast und rechnet sie quadratisch mit dem Strom bei Laständerungen um. Die REM schreiben bestimmte, im Abschnitt über den Wirkungsgrad angeführte Sätze von 0,5 und 1% vor, die als verbindliche Werte bei der Wirkungsgradbestimmung zu betrachten sind. Die wirklichen Werte können natürlich davon abweichen und liegen z. B. bei kleinen Asynchronmotoren und Wechselstromkommutatormaschinen wohl gelegentlich über den angenommenen Beträgen.

G. Der Hochlaufversuch.

Zweck und Durchführung des Versuches. Der Hochlaufversuch dient der *Messung des Anzugsmomentes* großer Maschinen, bei denen von der Anwendung des Hebelarmes, des Torsionsstabes und des Gegenstromverfahrens wegen der zu großen Momente und Kurzschlußleistungen abgesehen werden muß. Ein Drehmoment von 500 mkg dürfte praktisch als obere Grenze überhaupt für Versuche im Stillstand zu betrachten

sein, und wirklich gut und einfach zu messen sind sogar nur Drehmomente bis etwa 200 mkg. Weiterhin gewinnt man durch die punktweise Auswertung des Hochlaufversuches die gesamte *Drehmomentkurve über der Drehzahl* und nimmt daher den Versuch auch an anderen Motoren vor, wenn diese Kennlinie bestimmt werden soll.

Der Versuch wird durchgeführt, in dem man den unbelasteten, üblicherweise mit einer Prüffeldmaschine zusammengekuppelten Motor ans Netz legt und den Verlauf der Drehzahl vom Stillstand bis zur Leerlaufdrehzahl zusammen mit dem Strom und der Klemmenspannung oszillographisch aufnimmt. Als Drehzahlanzeige benutzt man die Spannung der schwach fremderregten Prüffeldmaschine oder bei Alleinlauf die einer kleinen angebauten Tourendynamo. Diese erhält vorzugsweise einen sehr stark vergrößerten Luftspalt, damit ihre Spannungskurve möglichst frei von den durch die Nutung hervorgerufenen Oberwellen bleibt. Im Oszillogramm erhält man dann eine deutliche schwarze Kurvenschrift, die besonders leicht graphisch auszuwerten ist.

Während des Hochlaufes entwickelt der Motor ein von der jeweils durchfahrenen Drehzahl abhängiges Drehmoment, welches erst bei Erreichung der vollen Geschwindigkeit zu Null wird. Dieses Moment dient zum weitaus größten Teil der Beschleunigung der Schwungmassen aller umlaufenden Teile und nur zum geringen Teil der Überwindung der Reibungsmomente sowie der Deckung der kleinen Eisenverluste die in der schwach erregten, angekuppelten Prüffeldmaschine auftreten. Auf Grund des Zusammenhanges zwischen Beschleunigung, Schwungmasse und Drehmoment:

$$Md = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt},$$

wobei GD^2 = Schwungmoment in kgm^2 ,
 n = Drehzahl in Uml/min,
 t = Zeit in sec,
 g = 9,81 m/sec²,
 Md = Drehmoment in mkg ist,

kann nachträglich das Drehmoment bestimmt werden, welches die beim Hochlauf beobachtete Beschleunigung hervorgerufen hat. Wird zu diesem Beschleunigungsmoment noch das Reibungsmoment der Belastungsmaschine zugeschlagen, so ist damit das nutzbar abgegebene Motordrehmoment bekannt. Wird weiterhin noch das eigene Reibungsdrehmoment des Probemotors hinzugefügt, so ist das gesamte vom Motorläufer erzeugte Drehmoment bestimmt. Die Reibungsdrehmomente von großen Motoren sind von der Größenordnung von 0,3 bis 0,7% des Nennmomentes, sofern es sich, wie es fast immer der Fall ist, um Synchron- oder Asynchronmotoren handelt, und das Reibungsmoment der meist gleich großen Belastungsmaschine, die durchweg eine Gleichstrommaschine ist, liegt etwas höher, nämlich bei rund 1,0 bis 2,0% ihres Nennmomentes. Das mittlere beim Hochlauf entwickelte Drehmoment beträgt nun

etwa 50 bis 150% des Nennmomentes, und die Meßgenauigkeit liegt in den Grenzen von $\pm 5\%$. Es genügt demnach wirklich, nur das Beschleunigungsmoment zu bestimmen und dieses als das vom Motor abgegebene Drehmoment zu betrachten. Über die Größenordnung des hiermit begangenen Fehlers sollte man sich bei der Auswertung jedoch Rechenschaft geben.

Die **Auswertung** geht von der Bestimmung der Beschleunigung dn/dt , also des Drehzahlanstieges in der Zeiteinheit, aus. Hierzu stehen mannigfaltige Wege offen. Der gebräuchlichste Weg in der Praxis ist die graphische Auswertung der Drehzahlkurve des Hochlaufoszillogramms. In Abb. 12 ist eine solche Aufnahme wiedergegeben, und es soll beispielsweise die Beschleunigung im Punkt *A* bestimmt werden. Zu diesem Zwecke wird im Punkt *A* mittels eines angelegten Lineals die Tangente gezeichnet. Zwei beliebige Punkte *a* und *b* werden auf ihr eingezeichnet, und durch diese beiden wird eine Senkrechte und eine Waagerechte gelegt, die sich im Punkt *c* treffen. Es entsteht so das Dreieck *abc*. In diesem ist die Höhe *bc* der Drehzahlerhöhung und die Strecke *ac* der Zeit, in welcher sie stattgefunden hat, verhältnismäßig. Der Wert (Drehzahlunterschied = *bc*) geteilt durch (Zeitunterschied = *ac*) ist also gleich der wirklichen Beschleunigung im Punkt *A*; *b-c* ist natürlich eine Strecke in mm, die erst in Uml/min, und *a-c* eine Strecke in mm, die erst in sec umgerechnet werden muß. Dies geschieht mittels des Maßstabes für die Drehzahl m_{drehzahl} und des für die Zeit m_{zeit} durch Malnehmen der Streckenlängen in mm mit diesen Maßstäben. Sie werden errechnet zu

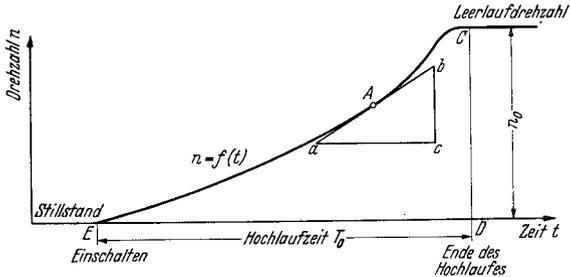


Abb. 12. Hochlaufkurve eines Asynchronmotors. (Bestimmung der Beschleunigung im Punkt *A*).

$$\text{Drehzahlmaßstab } m_{\text{drehzahl}} = \frac{\text{Leerlaufdrehzahl in Uml/min}}{\text{Strecke } CD \text{ in mm}}$$

$$\text{Zeitmaßstab } m_{\text{zeit}} = \frac{\text{Hochlaufzeit in sec}}{\text{Strecke } ED \text{ in mm}}$$

Das rechnerische Ergebnis der Beschleunigung in Uml/min je sec ist also für den Punkt *A*:

$$\text{Beschleunigung}_A = \frac{(\text{Strecke } bc \text{ in mm}) \cdot \text{Drehzahlmaßstab}}{(\text{Strecke } ac \text{ in mm}) \cdot \text{Zeitmaßstab}}$$

Das gesuchte Drehmoment für den gleichen Punkt beträgt dann:

$$\text{Drehmoment}_A \text{ in mkg} = \frac{\text{Beschleunigung}_A \cdot \text{Schwungmoment}}{375}$$

worin das Schwungmoment in kgm^2 einzusetzen ist.

In der gleichen Weise können alle anderen Punkte, insbesondere also auch der Stillstandspunkt, untersucht werden, woraus der Wert des Anzugsmomentes gewonnen wird. Man begnügt sich mit etwa 5 bis 10 Auswertungen, welche zur Darstellung der Drehmomentkurve ausreichen. Aus praktischen Gründen zeichnet man nicht für jeden Punkt ein solches kleines Hilfsdreieck, sondern man bestimmt für die einzelnen Punkte nur die Tangenten. Diese verschiebt man dann parallel zu sich selbst, bis sie alle durch ein und denselben beliebig gewählten Punkt der Drehzahlnulllinie gehen. Dieser ist in Abb. 13 mit F bezeichnet. In an sich beliebigem Abstand nach rechts wird ein zweiter Punkt G auf der Nulllinie eingezeichnet, durch welchen die Senkrechte nach oben gelegt wird. Die parallel verschobenen Tangenten durch den Punkt F schneiden dieselbe in den sinngemäß bezeichneten Punkten $0', 1', 2'$ usw. Die Länge der Strecken zwischen diesen Schnittpunkten und dem Fußpunkt G ist ein unmittelbares Maß für die Beschleunigung und somit

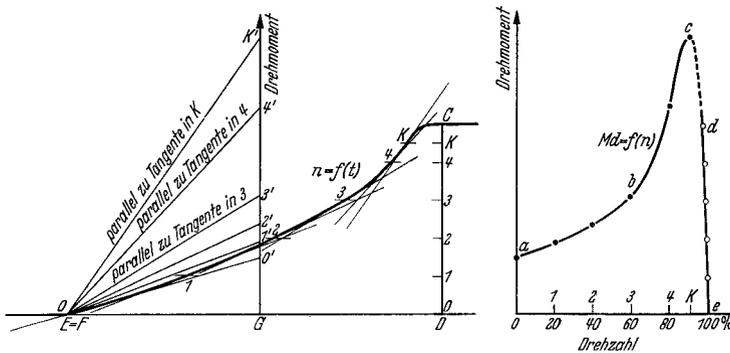


Abb. 13. Auswertung der Hochlaufkurve nach dem Tangentenverfahren.

(a: Hochlaufkurve mit Tangenten, die parallel verschoben durch gemeinsamen Punkt F gehen, der mit Punkt E zusammenfällt. b: Drehmoment — Drehzahlkennlinie. Kurvenast abc aus Hochlaufkurve; Kurvenast ed aus Belastungsversuch; Kurvenast cd sinngemäß ergänzt).

für das Drehmoment selbst in den einzelnen Hochlaufkurvenpunkten $0, 1, 2, \dots$, da sie alle einen Drehzahlanstieg in der gleichen Bezugszeit, nämlich in der Zeitdifferenz entsprechend der Länge FG , darstellen. Die Beschleunigung braucht daher gar nicht erst errechnet zu werden, sondern man bestimmt sofort das Drehmoment in mkg. Dazu braucht nur der Drehmomentmaßstab $m_{\text{drehmoment}}$ berechnet zu werden, der sich ergibt zu:

$$\text{Drehmoment-} \quad m_{\text{drehmoment}} = \frac{(GD^2 \text{ in kg m}^2) \cdot n_0}{375 \cdot (T_0 \text{ in sec})} \cdot \frac{(ED \text{ in mm})}{(CD \text{ in mm}) \cdot (FG \text{ in mm})},$$

wobei n_0 die Leerlaufdrehzahl in Uml/min und T_0 die Hochlaufzeit in sec bedeuten. Das Drehmoment zum Punkte $4'$ z. B. ergibt sich zu: (Länge der Strecke $4'G$) \cdot Drehmomentmaßstab.

Besonders praktisch ist es, die Länge der Strecke FG so zu wählen, daß ein bequemer Wert für den Drehmomentmaßstab in mkg oder aber in % des Nennmomentes der Maschine je 1 mm entsteht. Es ist

dabei zweckmäßig, den Papiervorschub des Oszillogrammes in mm/sec einzuführen, der mit v bezeichnet werden soll. v ist also die Anzahl Millimeter, die auf 1 sec entfällt. Zur Erzielung des gewünschten Drehmomentmaßstabes $m_{\text{drehmoment}}$, also z. B. = 1, 2, 5, 10 oder 50 mkg/mm, ist zu machen:

$$\text{Strecke } (FG) \text{ in mm} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0 v}{(C - D)} \cdot \frac{1}{m_{\text{drehmoment}}}$$

mit

n_0 = Leerlaufdrehzahl in Uml/min,

v = Papiervorschub in mm/sec,

$(C - D)$ = Abstand zwischen Nulllinie und Leerlaufdrehzahl in mm.

Der gewünschte prozentuale Drehmomentmaßstab $m_{\text{drehmoment}}\%$ in % $Md_{\text{nenn}}/\text{mm}$ wird erhalten, wenn man macht:

$$\text{Strecke } (FG) \text{ in mm} = \frac{GD^2}{36,5} \cdot \frac{100 v}{N_{\text{nenn}}} \cdot \left(\frac{n_0}{100}\right)^2 \cdot \frac{1 - s}{(C - D) \cdot m_{\text{drehmoment}}\%_0},$$

wobei N_{nenn} = Nennleistung in kW und s = Schlupf ist.

Wenn das Anzugsmoment im Stillstand gesondert bestimmt worden ist, kann die Auswertung des Hochlaufes auch ohne Kenntnis des GD^2 erfolgen. Man bestimmt dann den Drehmomentmaßstab zu:

$$m_{\text{drehmoment}} = \frac{\text{Anzugsdrehmoment in mkg}}{\text{Länge } OG \text{ in mm}}.$$

Das Anzugsmoment ist natürlich auf die Spannung beim Hochlaufversuch quadratisch umzurechnen, wenn der Stillstandsversuch bei einer anderen Spannung vorgenommen worden ist. Wenn das GD^2 bekannt ist, erhält man aus beiden Versuchen zweimal den Wert des Anzugsmomentes und somit eine gute Kontrolle für beide Versuche.

Bei nachgiebiger Netzspannung ist an den erhaltenen Drehmomentwerten noch eine Korrektur, die den Spannungsabfall berücksichtigt, vorzunehmen. Aus dem Oszillogramm werden zu den einzelnen Drehzahlpunkten die Werte der wahren Netzspannung ermittelt und die Drehmomente quadratisch auf die Soll-Spannung umgerechnet. Die Ströme, die man ebenfalls im Hochlaufkurvenblatt darstellt, werden linear mit der Spannung umgerechnet.

Der steil abfallende Verlauf der Drehmomentkurve in der Nähe der Leerlaufdrehzahl kann bei Asynchronmotoren aus dem Hochlaufversuch nur mit ungenügender Genauigkeit ermittelt werden. Sehr genau zu zeichnen ist er jedoch auf Grund der Ergebnisse des Belastungsversuches, die zusammenhängende Werte von Drehzahl bzw. Schlupf und Drehmoment liefern. Jeder Belastungspunkt gibt einen Punkt dieses Astes der Drehmoment-Drehzahlkennlinie, der anfangs eine Gerade ist, welche nach dem Kippmoment zu sanft abbiegt.

Wenn der Hochlauf wegen zu kleiner Schwungmasse in kürzerer Zeit als 1 bis 2 sec erfolgt, so erhält man Ergebnisse, welche sich infolge der Ausgleichvorgänge innerhalb der Maschinen nicht mit den bei stationärem Betrieb gewonnenen decken. Vor allem wird meist ein zu kleines Kippmoment beobachtet. Zur Erzielung einwandfreier Ergeb-

nisse untersucht man den Probemotor dann mit verringerter Spannung oder aber kuppelt ihn mit der hinreichend großen Schwungmasse einer

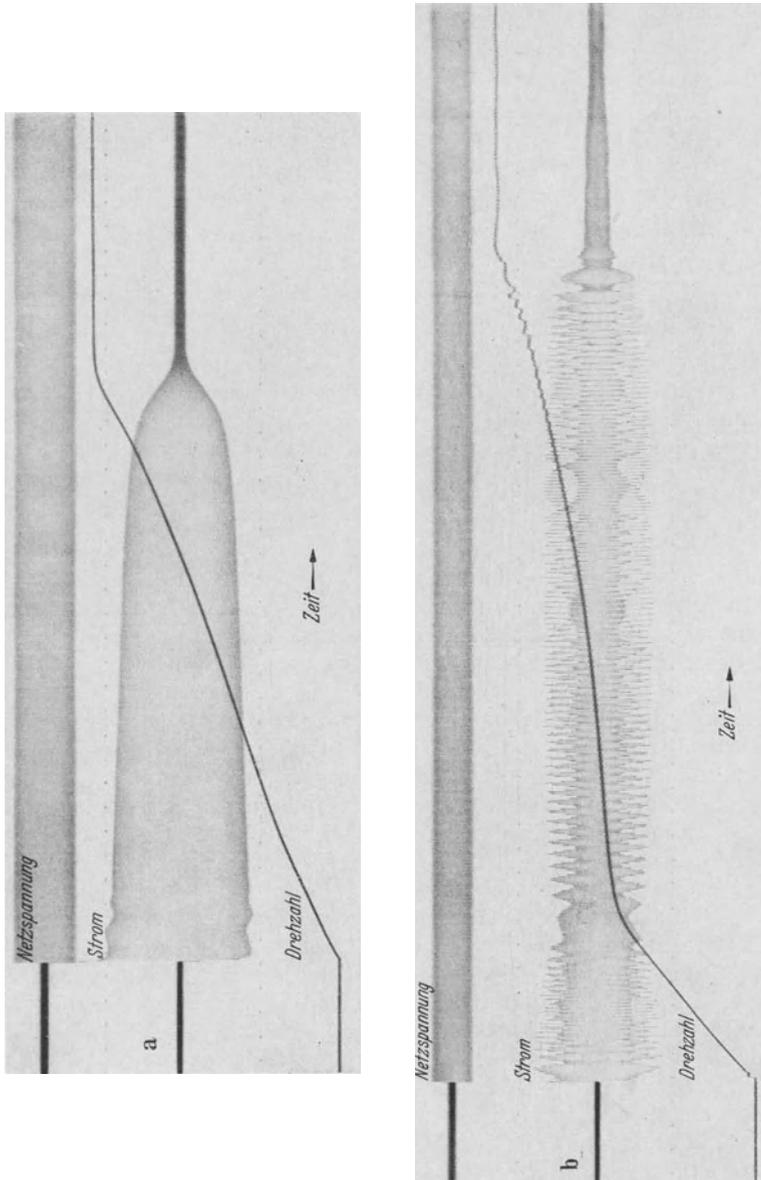


Abb. 14 a und b. Hochlaufoszillogramm (Asynchronmotor a und Synchronmotor b).

Prüffeldmaschine. Abb. 14 a und b zeigt typische Hochlaufoszillogramme einer Asynchron- und einer Synchronmaschine.

H. Der Auslaufversuch.

Zweck und Durchführung des Versuches. Der Auslaufversuch dient der Bestimmung des Schwungmomentes (GD^2) und in geringerem Umfange der Messung und der Aufteilung von Verlusten. Er besteht in der Aufnahme des zeitlichen Verlaufes der Auslaufdrehzahl der Maschine nach dem Abschalten ihres Antriebes. Die Kurve $n = f(t)$ heißt die Auslaufkurve.

Bei der Vornahme des Versuches fährt man die Probemaschine selbst oder ihren Antriebsmotor hoch, und zwar nach Möglichkeit — mit Hilfe gesteigerter Frequenz oder erhöhter Ankerspannung — auf eine Geschwindigkeit, die um 10 bis 20% über der Nenndrehzahl liegt. Dann schaltet man vom Netz ab. Bei großen Maschinen mit einer Auslaufzeit von über 1 min liest man in Zeitabständen von 5 oder 10 sec (Stoppuhr) die Anzeige eines Tachometers oder eines Spannungsmessers ab, der die Spannung entweder der Probemaschine selbst oder ihres Antriebsmotors oder einer angebauten, kleinen Tourendynamo mißt. Die spannungsgebende Maschine muß natürlich fremderregt laufen.

Bei kürzeren Auslaufzeiten, etwa zwischen 1 min und wenigen sec, erfolgt die Aufnahme am besten oszillographisch, da das Umschalten des Tachometers auf die tieferen Meßbereiche nicht schnell genug erfolgen kann und die genaue Ablesung des Spannungsmessers bei dem schnell zurückgehenden Zeiger sehr schwer fällt. Außerdem läßt sich die Auslaufkurve mit Hilfe der wenigen Meßpunkte nur ungenau aufzeichnen.

Kleinere Maschinen werden durch das angedrückte Tachometer zusätzlich belastet und kommen daher beschleunigt zum Stillstand. Bei ihnen sollte man daher möglichst von der Spannungsmessung Gebrauch machen. Ein zusammengehöriges Wertepaar von Drehzahl und Spannung, welches vor dem Abschalten ermittelt wird, erlaubt die Umrechnung der Spannungen in Drehzahlen. Führt die spannungsgebende Maschine dabei motorischen Strom, so zieht man 2 V von der Angabe des Spannungsmessers ab, um den Bürstenspannungsabfall zu berücksichtigen. Die reduzierte Spannung wird dann gleich der gemessenen Drehzahl gesetzt.

Die Auswertung des Auslaufversuches entspricht der des Hochlaufversuches, nur ist statt der Beschleunigung die Verzögerung bei einer bestimmten Drehzahl zu ermitteln. Abb. 15a stellt eine Auslaufkurve dar, in welcher zur Drehzahl n_1 die Verzögerung in Uml/min je sec bestimmt werden soll. Man legt hierzu im Punkte A , der der Drehzahl n_1 entspricht, die Tangente an die Auslaufkurve und verlängert sie bis zum Schnittpunkt mit der Nulllinie. Die Zeitdifferenz T_1 zwischen diesem Schnittpunkt und dem Fußpunkt zu A heißt die „Gedachte Auslaufzeit“. Sie würde gleich der wahren Auslaufzeit nach Durcheilen der Drehzahl n_1 sein, wenn die zu diesem Zeitpunkt wirksamen Bremsmomente sich bis Stillstand nicht ändern würden. Die Verzögerung ergibt sich zu: $(n_1 \text{ in Uml/min}) : (T_1 \text{ in sec})$.

Die Abnahme der Drehzahl beim Auslauf ist eine Folge der bremsenden Drehmomente, die die Luft- und Lagerreibung, die Bürstenreibung und die gegebenenfalls auftretenden weiteren Verluste entwickeln. Zur Überwindung dieser Momente und zur Deckung dieser Verluste steht

nur die lebendige Energie der sich drehenden Schwungmassen zur Verfügung, die unter ständiger Drehzahlabnahme hierzu freigemacht wird, wobei die Beziehung gilt:

$$Md = \frac{GD^2}{4g} \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4 \cdot 9,81} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2 \cdot n_1}{375 \cdot T_1}$$

mit ω = Winkelgeschwindigkeit = $2\pi n/60$,
 n = Drehzahl in Uml/min,
 $9,81 = g$ = Erdbeschleunigung in m/sec²,
 n_1 = betrachteter Drehzahlwert,
 T_1 = zugehörige, Gedachte Auslaufzeit in sec.

Wenn man statt des Bremsdrehmomentes die entsprechenden Bremsverluste N_{brems} in kW einsetzt, kommt man zu der praktisch wichtigeren Beziehung:

$$N_{\text{brems}} = \frac{Md \cdot \omega \cdot 9,81}{1000} = \frac{GD^2}{4 \cdot 9,81} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} \cdot \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{9,81}{1000} = \frac{GD^2 \cdot n_1^2}{365000 \cdot T_1}$$

Man erkennt hieraus, daß bei Kenntnis von dreien dieser vier Werte: GD^2 , N_{brems} , n_1 und T_1 der vierte berechnet werden kann. Der Zusammenhang zwischen n_1 und T_1 ist durch die Auslaufkurve gegeben. Kennt man also die Bremsverluste, die während des Auslaufes auftreten, so ist das GD^2 zu berechnen, kennt man das GD^2 , so kann man die unbekanntenen Verluste errechnen. Macht man zwei oder mehrere Läufe a, b, c usw., so kann man, wenn man die Verluste im ersten Auslauf vorher bestimmt hat, die zusätzlichen Verluste bei den anderen Läufen aus den veränderten „Gedachten Auslaufzeiten“ T_{1a}, T_{1b} usw. ohne Kenntnis des GD^2 berechnen.

Die Bestimmung des GD^2 . a) Gleichstrommaschine oder Synchron- oder Asynchronmaschine, welche durch eine Prüffeldgleichstrommaschine hochgefahren wird. Die Maschine oder die Gruppe wird auf Nenndrehzahl hochgefahren. Nach einigen Minuten wird die Spannung und der dem Netz entnommene Ankerstrom abgelesen. Aus diesen Werten wird die Verlustleistung $V_{\text{fe}} + V_{\text{rbg}} = (U_0 - 2) \cdot I_0/1000$ berechnet. Dann wird die Drehzahl durch Steigern der Ankerspannung, keinesfalls aber durch Feldschwächung, um 20% erhöht. Zur Kontrolle wird noch einmal Spannung und Drehzahl abgelesen. Die erhöhte Spannung minus 2 V muß im gleichen Verhältnis zur erhöhten Drehzahl stehen, wie $(U_0 - 2)$ zu n_{nenn} . Nunmehr wird das Netz abgeschaltet. Die Maschine bzw. die Gruppe beginnt mit unverändertem Erregerstrom den Auslauf. Alle 5 sec wird die Drehzahl bzw. die Ankerspannung gemessen. Der Zeitpunkt des erreichten Stillstandes wird genau abgestoppt. Dann trägt man die Kurve n in Abhängigkeit der Zeit t auf. Im Punkte zur Drehzahl n_{nenn} legt man die Tangente und bestimmt die gedachte Auslaufzeit T_{nenn} . Das GD^2 ergibt sich dann zu:

$$GD^2 = \frac{365000 \cdot T_{\text{nenn}} \cdot (V_{\text{fe}} + V_{\text{rbg}})}{n_{\text{nenn}}^2} \text{ in kgm}^2,$$

$$= \frac{365 \cdot T_{\text{nenn}} \cdot (U_0 - 2) \cdot I_0}{n_{\text{nenn}}^2}$$

Wenn eine genaue Bestimmung des Schwungmomentes gewünscht wird, nimmt man bei unveränderter Erregung zu mehreren Drehzahlen die Verluste auf. Man verändert also die Ankerspannung in weiten Grenzen und mißt zu jedem Punkt die Drehzahl n_0 , die Spannung U_0 und die Ankerstromaufnahme I_0 . Hieraus berechnet man die Werte $(U_0 - 2) \cdot I_0$ und trägt sie am besten über der Drehzahl auf (Abb. 15 b). Dann macht man den Auslauf und wiederholt ihn zur Kontrolle. Nun bestimmt man zu einer Reihe von Drehzahlen n die „Gedachte Auslaufzeit T “, greift aus der Verlustkurve die zugehörigen Werte der Bremsverluste ab und berechnet die sich ergebenden Werte für das GD^2 . Bei sorgfältiger Messung und Auswertung schwanken die einzelnen Werte des Schwungmomentes nur um etwa $\pm 5\%$ um den Mittelwert. Wenn man die GD^2 -Werte über der Drehzahl darstellt, so erhält man eine Zickzackkurve, wie sie in Abb. 15 c dargestellt ist. Wenn

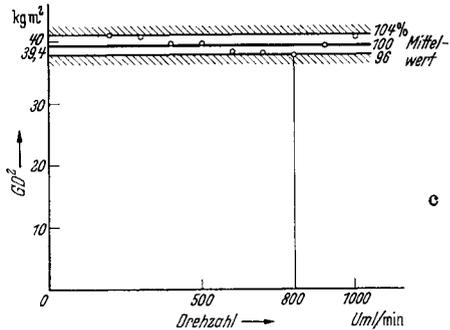
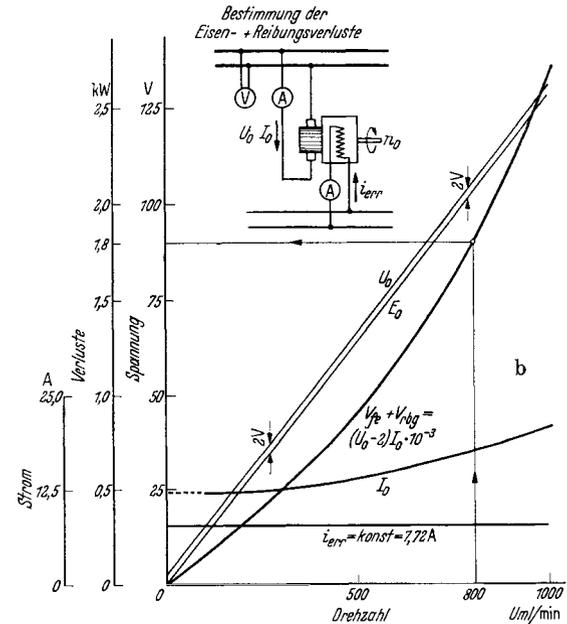
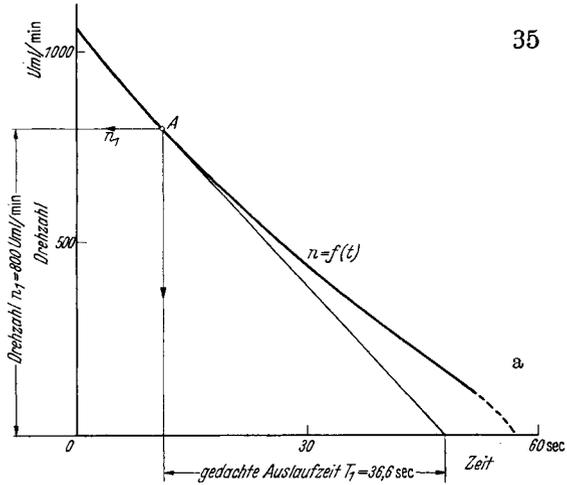


Abb. 15 a—c. Auslaufversuch zur Bestimmung des GD^2 .

- a) Auslaufdrehzahl = f (Zeit);
- b) Bestimmung der Eisen- u. Reibungsverluste;
- c) $GD^2 = f$ (Drehzahl).

Beispiel: $n = 800$ U/min $T = 36,6$ s
 $V_{fe} + V_{rbg} = N_0 = 1,8$ kW
 $GD^2 = \frac{865\,000 \cdot 36,6 \cdot 1,8}{800^2} = 37,6$ kgm².

man den Bürstenspannungsabfall von 2 V nicht berücksichtigt, ergeben sich bei den tieferen Drehzahlen zu hohe Werte für das Schwungmoment.

Man erhält natürlich immer das Gesamt- GD^2 der Maschinengruppe. Das GD^2 der Probemaschine wird erst nach Abzug des Schwungmomentes der angekuppelten Prüffeldmaschine gewonnen, das daher nicht viel größer sein darf, falls genaue Werte gewünscht werden.

b) Alleinlaufende, erregte Synchronmaschine. Die Maschine wird auf Nenndrehzahl gebracht und der Erregerstrom so eingeregelt, daß die Stromaufnahme aus dem Netz ein Minimum, also $\cos \varphi_0 = 1,0$ wird. Dann werden die Leistungsmesser abgelesen. Die Angabe beider Geräte kann wegen der Kleinheit der Ankerkupferverluste gleich $V_{fe} + V_{rbg}$ gesetzt werden. Durch Steigerung der zugeführten Frequenz wird anschließend die Geschwindigkeit um 10 bis 20% gesteigert und dann das Netz abgetrennt. Die Maschine bleibt erregt. Die Aufnahme des Auslaufes geschieht am besten mit Hilfe einer kleinen Drehzahldynamo. Die Auswertung geschieht mit der Formel:

$$GD^2 = \frac{365000 \cdot T \cdot N_0}{n_{\text{nenn}}^2}$$

worin N_0 die Leerlaufverluste in kW bedeuten.

c) Alleinlaufende Asynchronmaschine. Diese Maschine kann den Auslauf nur unerregt machen. Als bremsende Verluste kommen nur die Reibungsverluste in Frage. Diese müssen daher durch eine besondere Messung bestimmt werden. Die Maschine wird auf Nenndrehzahl hochgefahren und die aufgenommene Leistung, der aufgenommene Strom und die zugeführte Spannung abgelesen. Dann wird die Spannung in mehreren Stufen herabgesetzt und jedesmal die Messung durchgeführt. Wie im Abschnitt I D beschrieben, werden nunmehr die Reibungsverluste ermittelt, indem man die um die Stromwärmeverluste verringerten Leerlaufverluste über dem Quadrat der Spannung aufträgt und die durch diese Punkte gelegte Kurve (angenäherte Gerade) zum Schnitt mit der Ordinate bringt. Die Auswertung geschieht nach der Formel:

$$GD^2 = \frac{365000 \cdot T \cdot V_{rbg}}{n_{\text{nenn}}^2}$$

Auch bei dieser Maschine bringt man die Drehzahl durch Frequenzsteigerung vor Beginn des Auslaufes auf einen erhöhten Wert.

d) Durch die Eisenverluste, welche bei erregten Maschinen auftreten, kommen dieselben schneller zum Stillstand, als es bei unerregten Maschinen der Fall ist. Man bevorzugt daher in der Praxis bisweilen jene Auslaufverfahren, bei denen die Probemaschine von einer Prüffeldmaschine angetrieben wird und die Drehzahl durch die Anzeige der besonderen Drehzahldynamo erhalten wird. Man trennt dann nicht nur den Anker, sondern auch die Erregung der Antriebsmaschine bei Beginn des Auslaufes vom Netz. Da nur die Reibungsverluste wirksam werden, müssen dieselben bei einer bestimmten Drehzahl durch Aufnahme der Verluste bei verschiedenen Spannungen, wie unter c) beschrieben, ermittelt werden. Wenn man aus irgendwelchen Gründen die Nenndrehzahl der Probemaschine nicht überschreiten will, also den

Auslauf mit Nenndrehzahl beginnt, so empfiehlt es sich, die Reibungsverluste bei 80 % der Nenndrehzahl zu bestimmen und die Auslaufkurve im entsprechenden Punkte auszuwerten. Niemals bestimme man die gedachte Auslaufzeit für den allerersten Punkt der Kurve, da dort die Tangente nur mit Unsicherheit zu konstruieren ist.

Messung von Verlusten. Dieses Verfahren wird praktisch zur Bestimmung der Kurzschlußverluste großer Synchronmaschinen angewandt, die aus irgendwelchen Gründen nicht mechanisch angetrieben werden können. Die Probemaschine wird mit steigender Frequenz über die Nenndrehzahl hochgefahren. Dann wird das Netz abgetrennt, die Erregung ausgeschaltet, der Klemmenkurzschluß hergestellt und die Erregung wieder eingeschaltet. Der Wert des Erregerstromes wird dabei auf jenen Betrag eingestellt, der den gewünschten Kurzschlußstrom in der Ankerwicklung, also vorzugsweise den Nennstrom hervorruft. Alle Schaltungen und Einstellungen müssen erledigt sein, ehe die auslaufende Maschine durch die Nenndrehzahl gefahren ist. Als Drehzahlanzeige wird die Spannung der schwach erregten, aufgebauten Erregermaschine benutzt.

In der Auslaufkurve wird die Tangente an den Punkt entsprechend der Nenndrehzahl gelegt und die „Gedachte Auslaufzeit“ T_{nenn} bestimmt. Die gesuchten Kurzschlußverluste in kW ergeben sich zu:

$$V_{\text{kz}} = V_{\text{cu}} + V_{\text{zus}} = \frac{GD^2 \cdot n_{\text{nenn}}^2}{365000 \cdot T_{\text{nenn}}} - V_{\text{rbg}}.$$

Der Betrag der Reibungsverluste ist den Ergebnissen des Leerlaufversuches zu entnehmen. Durch Wiederholung des Versuches mit verschiedenen Erregerströmen, also verschiedenen Kurzschlußströmen, erhält man eine Reihe von Werten für die Kurzschlußverluste, die recht angenähert in quadratischer Abhängigkeit vom Strom stehen müssen.

Trennung der Verluste. Wenn man den Auslaufversuch an der gleichen Maschine einmal im unerregten Zustand und dann mit verschiedenen starken Erregerströmen bei offenen Klemmen durchführt, so müssen die „Gedachten Auslaufzeiten“ zu ein und derselben Drehzahl offenbar im umgekehrten Verhältnis der zugehörigen Verluste stehen. Wenn durch Messung ein einziger Wert der Verluste bestimmt worden ist, kann man daher alle anderen Verluste durch einfache Umrechnung aus diesem Wert berechnen. Als Beispiel sei eine Gleichstrommaschine betrachtet. Bei ihr liege die Messung der Eisen- + Reibungsverluste bei Nenndrehzahl und Nennspannung vor, und die Reibungsverluste sollen getrennt bestimmt werden. Man macht also einen Auslauf a' mit voller Erregung und schließt einen zweiten Auslauf b' mit unerregter Maschine an. T_a und T_b seien die entsprechenden gedachten Auslaufzeiten. Dann ergibt sich:

$$V_{\text{rbg}} = (V_{\text{ie}} + V_{\text{rbg}}) \cdot \frac{T_a}{T_b}.$$

Wie man sieht, findet eine Aufteilung der Verluste statt, wonach der Versuch benannt wird. Die praktische Anwendung ist recht selten, da man fast immer die Aufteilung nach dem graphischen Verfahren beim Leerlaufversuch bevorzugt.

I. Der Wirkungsgrad.

Der Wirkungsgrad stellt bei allen Maschinen, Generatoren, Motoren, Transformatoren und Maschinenaggregaten das Verhältnis der nutzbar abgegebenen zur insgesamt zugeführten Leistung dar. Bei schwankender Leistung spricht man auch zuweilen vom mittleren Wirkungsgrad innerhalb eines angegebenen Zeitraumes als dem Verhältnis zwischen nutzbar verwerteter und insgesamt zugeführter Energie. Es gibt, wie besonders betont sei, keine in ihrer Definition voneinander abweichende Formeln etwa für Motoren und für Generatoren. Spricht man manchmal doch von der Motor- oder Generatorformel, so liegt der nur äußerliche Unterschied darin, daß in beiden Fällen die bequem meßbare elektrische Leistung eingeführt ist; diese wird beim Motor zugeführt und beim Generator abgegeben. Allgemein gilt:

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}},$$

wobei (abgegebene Leistung) = (zugeführte Leistung — Gesamtverluste).

Die Verfahren zur Bestimmung des Wirkungsgrades lassen sich grundsätzlich in die beiden Gruppen der direkten und der indirekten Methode scheiden, deren Grundzüge nachstehend entwickelt werden. Der im einzelnen Fall einzuschlagende Weg wird bei den verschiedenen Maschinengattungen genau behandelt.

Direkte Wirkungsgradbestimmung. Der Wirkungsgrad wird bei diesem Verfahren unmittelbar aus dem Verhältnis der abgegebenen zur zugeführten Leistung bestimmt. Bei Transformatoren, Einankerumformern, Kaskadenumformern und Motorgeneratoren treten beide in elektrischer Form auf und werden durch Gerätemessungen ermittelt. Auf der Drehstromseite muß dabei in Drei- oder Zweileistungsmesserschaltung gemessen werden. Auf der Gleichstromseite ergibt das Produkt Spannung mal Strom die Leistung.

Bei Motoren finden alle Arten von Abbremsung Anwendung, in denen eine leichte Ermittlung der Bremsleistung möglich ist. Diese wird, wie in Abschnitt I. K, L angegeben, aus dem Bremsdrehmoment und der Drehzahl bestimmt. Bei Generatoren geht man umgekehrt vor. Man ermittelt die zugeführte mechanische Leistung aus Drehmoment und Drehzahl und mißt die abgegebene elektrische Leistung. Wenn eine geeichte Prüffeldmaschine zur Verfügung steht, können die Motoren oder Generatoren mit dieser zu einer Motorgeneratorgruppe vereinigt werden.

Der Wirkungsgrad ergibt sich dann zu:

$$\begin{aligned} \text{Maschinenwirkungsgrad} &= \frac{\text{Gruppenwirkungsgrad}}{\text{Prüffeldmaschinenwirkungsgrad}} \\ &= \frac{\text{abgegebene elektrische Leistung}}{\text{aufgenommene elektrische Leistung}} \cdot \frac{1}{\text{Prüffeldmaschinenwirkungsgrad}} \end{aligned}$$

Bei diesen direkten Verfahren ist zu beachten, daß ihre Genauigkeit im allgemeinen auf höchstens 1% eingeschätzt werden kann, weil die Fehler, selbst bei genauer Bestimmung der Meßgrößen Spannung,

Strom, Leistung, Drehzahl und Drehmoment bereits jeweils zwischen 0,2 und 0,5% liegen und der Gesamtfehler gleich der Summe aller gemachten Einzelfehler werden kann. Anwendung findet daher die direkte Wirkungsgradbestimmung nur bei Maschinen mit einem Wirkungsgrad von etwa 80 bis 90% und darunter. Sie wird dagegen bevorzugt bei der Prüfung der Wechselstromkommutatormaschinen bis zu den höchsten Leistungen.

Indirekte Wirkungsgradbestimmung. Dieses Verfahren beruht grundsätzlich auf der Messung der Verluste selbst. Die Genauigkeit ist wesentlich höher als bei dem direkten Verfahren, da die Unsicherheiten und Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Verluste erst als Fehler zweiter Ordnung im Wirkungsgrad erscheinen.

Rückarbeitsverfahren. Die Rückarbeit findet Anwendung, wenn zwei völlig gleiche Maschinen vorhanden sind, die sowohl als Generator als auch als Motor gefahren werden können. Die Maschinen werden miteinander gekuppelt und elektrisch zusammengeschaltet. Bei Lauf tritt dann ein Kreislauf der Energie auf. Der Generator gibt elektrische Energie ab, der Motor nimmt diese auf und setzt sie in mechanische Energie um. Diese wird dem Generator wieder über die Welle zugeführt. Die unvermeidlichen Verluste können gedeckt werden durch zusätzlichen mechanischen Antrieb des Generators oder durch zusätzliche elektrische Speisung des Motors aus dem Netz. Letztere geschieht fast immer vom parallel liegenden Netz aus, seltener nur von einer in Reihe liegenden Hilfsmaschine. Dieses letztere Verfahren mag hier nur angedeutet werden.

Gleichstrommaschinen mit Deckung der Verluste durch das Netz werden in der Anordnung nach Abb. 16 geprüft. Man stellt die beiden etwas voneinander abweichenden Ströme so ein, daß ihre Summe gleich dem doppelten Nennstrom ist, also $I_{gen} + I_{mot} = 2 I_{nenn}$ wird. Die Spannung beider Maschinen ist natürlich gleich. Wenn der Wirkungsgrad der Maschinen als Generator bestimmt werden soll, wird die Netzspannung auf den Wert:

$$U = U_{nenn} + I_{nenn} \cdot R + 2,$$

und wenn der Wirkungsgrad als Motor zu untersuchen ist, wird sie auf den Wert:

$$U = U_{nenn} - I_{nenn} \cdot R - 2$$

eingestellt. Dann treten in beiden Maschinen zusammen die doppelten Kupfer-, Bürstenübergangs-, Reibungs- und Eisenverluste des Nenn-

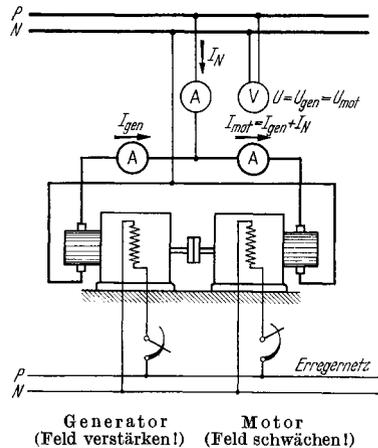


Abb. 16. Rückarbeitsverfahren von Gleichstrommaschinen mit elektrischer Deckung der Verluste durch das Netz.

(Man mache bei Bestimmung des Wirkungsgrades als: Motor: $U = (U_{nenn} - I_{nenn} \cdot R - 2)$; $I_{mot} + I_{gen} = 2 I_{nenn}$; $n = n_{nenn}$. Generator: $U = (U_{nenn} + I_{nenn} \cdot R - 2)$; $I_{mot} + I_{gen} = 2 I_{nenn}$; $n = n_{nenn}$. Die Gesamtverluste einer Maschine bei Nennbetrieb sind gleich: $V_{ges} = \frac{1}{2} U \cdot I_N + U_{err} \cdot i_{errnenn}$.)

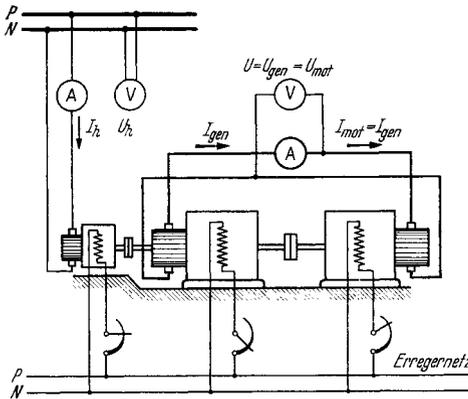
betriebes auf, die gleich der dem Netz entnommenen Leistung N_{Netz} sind. Der Wirkungsgrad wird errechnet zu:

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{2 U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}}}{2(U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} + U_{\text{err}} \cdot i_{\text{err}_{\text{nenn}}}) + N_{\text{Netz}}}$$

bei Generatoren, und

$$\eta_{\text{mot}} = \frac{2 U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} - N_{\text{Netz}}}{2 U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} + 2 U_{\text{err}} \cdot i_{\text{err}_{\text{nenn}}}}$$

bei Motoren. Hierbei ist U die Nennspannung und I_{nenn} der Nennstrom des Ankers; der Erregerstrom $i_{\text{err}_{\text{nenn}}}$ ist aus der Regelkurve der Maschine zu entnehmen.



Hilfsmotor (Feld auf Nenn-drehzahl einstellen) Generator (Feld verstärken!) Motor (Feld schwächen!)

Abb. 17. Rückarbeit von Gleichstrommaschinen mit mechanischer Deckung der Verluste.

(Man mache bei Bestimmung des Wirkungsgrades als: Motor: $U = (U_{\text{nenn}} - I_{\text{nenn}} \cdot R - 2)$; $I_{\text{mot}} = I_{\text{gen}} = I_{\text{nenn}}$; $n = n_{\text{nenn}}$. Generator: $U = (U_{\text{nenn}} + I_{\text{nenn}} \cdot R + 2)$; $I_{\text{not}} = I_{\text{gen}} = I_{\text{nenn}}$; $n = n_{\text{nenn}}$. Die Gesamtverluste einer Maschine bei Nennbetrieb sind gleich: $V_{\text{ges}} = \frac{1}{2} \cdot (U_h I_h - V_{0h} - I_h [2 + I_h \cdot R_h]) + U_{\text{err}} \cdot i_{\text{err}_{\text{nenn}}}$.)

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}}}{(U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} + U_{\text{err}} \cdot i_{\text{err}_{\text{nenn}}}) + 0,5 (U_h \cdot I_h - V_{0h} - I_h [R_h \cdot I_h + 2])}$$

bei Generatoren, und

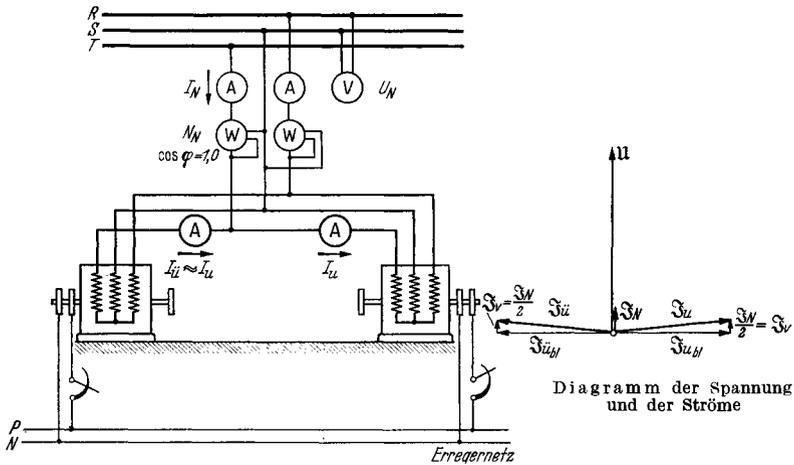
$$\eta_{\text{mot}} = \frac{U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} - 0,5 (U_h \cdot I_h - V_{0h} - I_h [R_h \cdot I_h + 2])}{U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} + U_{\text{err}} \cdot i_{\text{err}_{\text{nenn}}}}$$

bei Motoren.

Die Rückarbeit von Synchronmaschinen mit Deckung der Verluste aus dem Netz kann ohne Kupplung in der Schaltung nach Abb. 18 erfolgen. Beide Maschinen nehmen aus dem Netz praktisch den gleichen, kleinen Verluststrom I_p auf. Die eine Maschine wird übererregt und die andere untererregt. Die Blindstromstärke wird auf Nennstrom ein-

Beimechanischer Deckung der Verluste in Schaltung nach Abb. 17 sind Strom und Spannung beider Maschinen einander gleich. Die Stromstärke wird auf den Nennwert I_{nenn} und die Spannung auf die gleichen Werte wie bei der vorigen Rückarbeitschaltung eingeregelt. Eisen- und Reibungsverluste sowie Stromwärmeverluste im Ankerkreis sind gleich den doppelten normalen Verlusten und gleich der vom Hilfsmotor an der Welle abgegebenen Leistung. Wenn dessen Ankerspannung U_h , der von ihm aufgenommene Strom I_h und seine Leerverluste V_{0h} betragen und sein Ankerkreiswiderstand gleich R_h ist, errechnet sich der Wirkungsgrad zu:

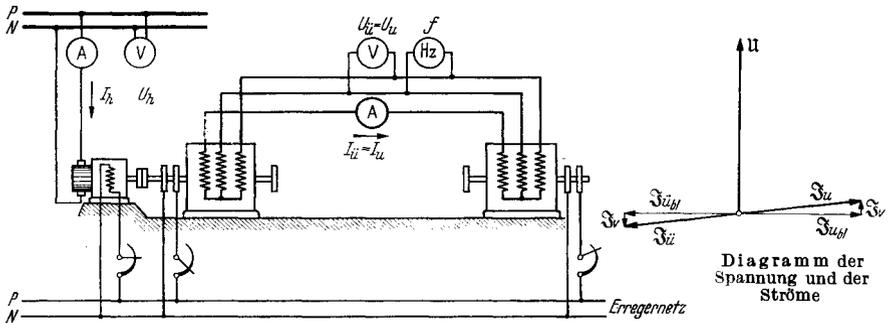
gestellt. Durch feine Nachreglung des Erregerstromes wird die Netzstromstärke auf den Kleinstwert gebracht. Dem Netz wird also nur



Blindleistungserzeuger (ü) (Feld übererregen!) Blindleistungsverbraucher (u) (Feld untererregen!)

Bei mechanischer Kupplung läßt sich entsprechend der gegenseitigen Verdrehung der Kupplungshälften jede beliebige Wirkleistung einstellen.

Abb. 18. Rückarbeit von Synchronmaschinen mit elektrischer Deckung der Verluste durch das Netz. (Man mache bei Bestimmung des Wirkungsgrades als Motor oder Generator: $U = U_{nenn}$; $I_{\bar{u}} \approx I_u = I_{nenn}$; $f = f_{nenn}$. Die Gesamtverluste einer Maschine bei Nennbetrieb betragen: $V_{ges} = \frac{1}{2} N_N + U_{err} \cdot i_{err_{nenn}}$)



Hilfsmotor Blindleistungserzeuger (ü) (Feld übererregen!) Blindleistungsverbraucher (u) (Feld untererregen!)

Bemerkungen siehe Abb. 18

Abb. 19. Rückarbeit von Synchronmaschinen mit mechanischer Deckung der Verluste durch Hilfsmotor.

(Man mache bei Bestimmung des Wirkungsgrades als Motor oder Generator: $U_{\bar{u}} = U_u = U_{nenn}$; $I_{\bar{u}} = I_u = I_{nenn}$, $f = f_{nenn}$. Die Gesamtverluste einer Maschine bei Nennbetrieb betragen: $V_{ges} = \frac{1}{2} (U_h I_h - V_{0h} - I_h [2 + I_h R_h]) + U_{err} \cdot i_{err_{nenn}}$.)

Wirkleistung entnommen, die in den beiden Leistungsmessern gemessen wird. Sie betrage N_{Netz} . Der Wirkungsgrad wird bestimmt zu:

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} \cdot \cos \varphi_{\text{nenn}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} \cdot \cos \varphi_{\text{nenn}} + 0,5(N_{\text{Netz}}) + U_{\text{err}} \cdot i_{\text{err}_{\text{nenn}}}}$$

bei Generatoren, und

$$\eta_{\text{mot}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} \cdot \cos \varphi_{\text{nenn}} - 0,5(N_{\text{Netz}})}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} \cdot \cos \varphi_{\text{nenn}} + U_{\text{err}} \cdot i_{\text{err}_{\text{nenn}}}}$$

bei Motoren.

Die Netzspannung ist bei diesem Versuch auf den Wert U_{nenn} einzustellen. Der Erregerstrom $i_{\text{err}_{\text{nenn}}}$ ist der Regelkennlinie oder dem Schwedendiagramm zu entnehmen (S. 171).

Die Deckung der Verluste von einem Hilfsmotor aus ist in Abb. 19 dargestellt. Die Nennspannung wird auf den Nennwert U_{nenn} gebracht. Der Wirkungsgrad errechnet sich zu:

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} \cdot \cos \varphi_{\text{nenn}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} \cdot \cos \varphi_{\text{nenn}} + U_{\text{err}} \cdot i_{\text{err}_{\text{nenn}}} + 0,5(U_h \cdot I_h - V_{0h} - I_h [R_h \cdot I_h + 2])}$$

bei Generatoren, und

$$\eta_{\text{mot}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} \cdot \cos \varphi_{\text{nenn}} - 0,5(U_h \cdot I_h - V_{0h} - I_h [R_h \cdot I_h + 2])}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{nenn}} \cdot I_{\text{nenn}} \cdot \cos \varphi_{\text{nenn}} + U_{\text{err}} \cdot i_{\text{err}_{\text{nenn}}}}$$

bei Motoren.

Wenn die rückarbeitenden Synchronmaschinen gekuppelt werden, kann durch gegenseitige Verstellung beider Kupplungshälften jeder beliebige Wirkleistungsaustausch und durch verschiedene Erregung beider Maschinen jeder beliebige Blindleistungsaustausch eingestellt werden. Insbesondere können die Maschinen mit dem Nennleistungsfaktor gefahren werden. Meist nimmt man jedoch hiervon Abstand.

Über- und Untererregungsverfahren bei Synchronmaschinen. Wenn man eine einzelne Synchronmaschine als leerlaufenden Motor an das Netz von Nennfrequenz und Nennspannung legt und die Maschine durch Über- oder Untererregung auf Abgabe oder Aufnahme von Blindstrom von Nennstromstärke bringt, so treten praktisch die vollen Eisen-, Reibungs-, Kupfer- und Zusatzverluste wie bei Nennbetrieb auf. Tatsächlich sind die Eisenverluste im ersten Fall (Übererregung) etwas zu hoch und im zweiten Fall (Untererregung) etwas zu tief. Wenn man den Mittelwert der dem Netz entnommenen Leistungen nimmt, kann man diesen Betrag, vermehrt um die wirklichen Erregerverluste bei Nennbetrieb, gleich den Gesamtverlusten der Synchronmaschine setzen und daraus den Wirkungsgrad ermitteln. Zu bedenken sind allerdings die Fehler, die durch Verwendung der Wandler und Meßgeräte entstehen und prozentual von recht großem Einfluß sein können, da der $\cos \varphi$ bei diesen Versuchen zwischen 0,02 bei ganz großen und 0,06 bei mittleren Maschinen liegt. Bei diesen kleinen Leistungsfaktoren machen sich die Fehlwinkel der Wandler bereits bemerkbar. Das Verfahren, welches an und für sich den geringsten Aufwand zu erfordern scheint, wird daher in der Praxis nur selten angewandt.

Einzelverlustverfahren. Die wichtigste Art der Wirkungsgradbestimmung bei den Maschinen fast aller Gattungen ist die rechnerische Ermittlung auf Grund der in der Maschine auftretenden Einzelverluste. Diese lassen sich in drei Hauptgruppen einteilen: Leerverluste, Erregerverluste und Lastverluste, in denen die Zusatzverluste enthalten sind.

Die *Leerverluste* umfassen die Eisenverluste bei Leerlauf und die Reibungsverluste. Zu den Eisenverlusten rechnen vor allem die eigentlichen durch Ummagnetisierung und durch Wirbelströme entstehenden Verluste im aktiven Eisen; außerdem zählen dazu alle anderen bei spannungsführender, leerlaufender Maschine auftretenden Verluste, die in den Preßplatten, in der Isolation, in der Polschuhoberfläche, in Kurzschlußkäfigen und Dämpferwicklungen und in allen dem Streufeld ausgesetzten Teilen auftreten. Die Reibungsverluste entstehen in den Lagern, an den aufliegenden Bürsten und durch die Luftreibung an allen bewegten Teilen.

Erregerverluste sind die Stromwärmeverluste in der Nebenschluß- und Fremderregungswicklung auf den Hauptpolen sowie die Übergangsverluste bei der Speisung dieser Wicklungen über Schleifringe. Die Verluste in den zugehörigen Regelwiderständen und in den angebauten Erregermaschinen sind nach den REM mit zu berücksichtigen.

Die *Lastverluste* treten auf als Stromwärmeverluste in den Ankerwicklungen, in den Wendepol- und Reihenschlußspulen sowie als Übergangsverluste am Kommutator oder an den Schleifringen, die den Laststrom führen. Als *Zusatzverluste*, unter denen alle restlichen Verluste zu verstehen sind, werden betrachtet die Wirbelstromverluste in Wechselstrom- und Gleichstromankerwicklungen und die Verluste, welche bei stromführender Maschine zusätzlich im Eisen, in den Konstruktionsteilen und im Dämpferkäfig entstehen.

Die Summe dieser Verluste ergibt die Gesamtverluste der Maschine, also den Unterschied zwischen nutzbar verwerteter und insgesamt zugeführter Leistung. Der rechnerische Wirkungsgrad aus den Einzelverlusten ist mithin:

$$\eta = \frac{\text{Leistungsabgabe}}{\text{Leistungsabgabe} + (\text{Leer-} + \text{Erreger-} + \text{Last-} + \text{Zusatzverluste})}$$

oder

$$\eta = \frac{\text{Leistungsaufnahme} - (\text{Leer-} + \text{Erreger-} + \text{Last-} + \text{Zusatzverluste})}{\text{Leistungsaufnahme}} .$$

Die Ermittlung der Verluste erfolgt im Leerlaufversuch und zum Teil im Kurzschlußversuch. Man geht dabei von der grundsätzlichen Annahme aus, daß bei Leerlauf außer den meistens sehr geringfügigen Stromwärmeverlusten durch den Leerlaufstrom keine Lastverluste auftreten, die Leerverluste dagegen voll vorhanden sind, und daß im Kurzschluß nur die Last- und die Zusatzverluste neben den Reibungsverlusten auftreten, die eigentlichen Eisenverluste aber vernachlässigbar klein sind. Die Erregerverluste ergeben sich rechnerisch als Produkt aus Erregerstrom und Erregerspannung unter Berücksichtigung der unmittelbar im Erregerkreis noch weiter auftretenden Verluste. Die

eigentlichen Kupferverluste werden aus I^2R gerechnet. Die Zusatzverluste werden allerdings nur bei Synchronmaschinen, Drehreglern und Transformatoren im Kurzschluß bestimmt. Bei allen anderen Maschinen begnügt man sich in Ermangelung eines einfachen und zuverlässigen Meßverfahrens mit einem in den REM festgelegten Prozentsatz der bei Nennbetrieb umgesetzten elektrischen Leistung, also bei Generatoren der erzeugten und bei Motoren der zugeführten Leistung. Bei Umformern wird die gleichstromseitig abgegebene Leistung zugrunde gelegt. Die so bestimmten Zusatzverluste gelten bei Nennstrom und werden auf andere Stromstärken quadratisch umgerechnet. Es gelten folgende Sätze:

Gleichstrommaschinen kompensiert	0,5 %
Gleichstrommaschinen unkompensiert	1,0 %
Asynchronmotoren	0,5 %
Einankerumformer	0,5 %
Kaskadenumformer	1,0 %

Dies sind also vereinbarte Werte, die in Wirklichkeit je nach Ausführung und Größe der Maschinen größer oder kleiner sein können.

Die Wirkungsgradkennlinie. Die zu den einzelnen Lastpunkten errechneten Wirkungsgrade werden in Form der Wirkungsgradkennlinie entweder über der aufgenommenen oder über der abgegebenen Leistung oder bei regelbaren Motoren auch über dem abgegebenen Drehmoment dargestellt. Diese η -Kurven haben drei typische Arten des Verlaufes, der von der Aufteilung der Verluste in im wesentlichen lastunabhängige und in lastabhängige Verluste abhängt. Zu dem lastabhängigen Anteil gehören in erster Linie die Lastverluste und weiter die Zusatzverluste und jener Teil der Erregerverluste, der bei belasteter Maschine zu den Leerlaufverlusten hinzukommt. In

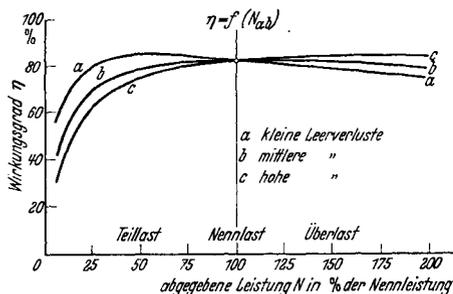


Abb. 20. Wirkungsgradkennlinien bei verschiedener Aufteilung der gleichen Gesamtverluste bei Vollast. Leerverluste bei Kurve a: $\frac{1}{3}$, Kurve b: $\frac{2}{3}$, Kurve c: $\frac{2}{3}$ der Gesamtverluste bei Vollast.

erster Annäherung können diese Verluste als quadratisch von der Last abhängig betrachtet werden. Zu den lastunabhängigen Verlusten gehören alle übrigen, also die Reibungsverluste, die Eisenverluste und die Erregerverluste bei Leerlauf. In Abb. 20 sind für gleiche Gesamtverluste bei 100% Last die Wirkungsgradkennlinien dargestellt, wie sie sich für die drei typischen Fälle ergeben: überwiegend lastabhängige, gleiche last- und lastunabhängige und überwiegend lastunabhängige Verluste bei Nennlast. Im ersten Fall hat der Wirkungsgrad sein Maximum bei Teillast, im zweiten Fall bei Vollast und zuletzt bei Überlast. Bei bekannter Aufteilung kann man sich

also den Verlauf der Kurven vorstellen, und bei Ansicht der gegebenen Kurven gewinnt man umgekehrt einen Anhalt über die Aufteilung der Verluste.

Einen tieferen Einblick in den Verlauf der Wirkungsgradkennlinien erhält man, wenn der *prozentuale* Einfluß der Leer-, der Übergangs- und der Lastverluste getrennt berücksichtigt wird. Dies ist bei allen Maschinen möglich, wo die

elektrisch umgesetzte Leistung, also Aufnahme bei Motoren oder Abgabe bei Generatoren, dem Strome proportional ist. Dies trifft zu bei den Gleichstrom- und den Synchronmaschinen, in gewisser Annäherung auch bei den Asynchronmaschinen. Unter Übergangsverlusten sollen alle Verluste betrachtet werden, die linear vom Strom abhängen, also z. B. ein Teil der bei Last auftretenden Erregerverluste. Trägt man, wie in Abb. 21a und b die drei Verlustgruppen in Prozent der jeweils umgesetzten elektrischen Leistung auf, so werden die Leerverluste durch eine Hyperbel, die Übergangsverluste durch eine Parallele zur Nulllinie und die Kupferverluste durch eine Gerade durch den Nullpunkt dargestellt. Die Summe aller drei Kurven stellt die prozentualen Gesamtverluste dar. Diese haben also ein Minimum, und zwar bei jener Last,

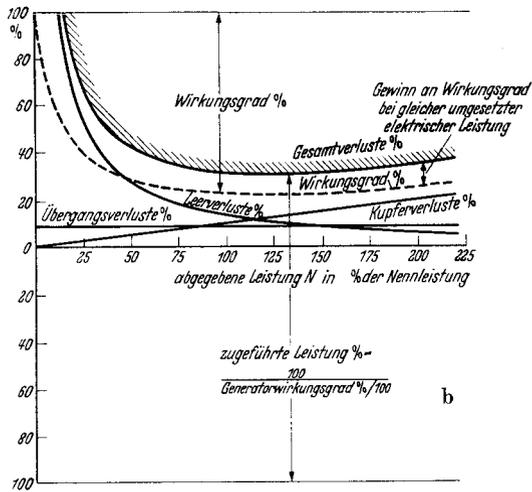
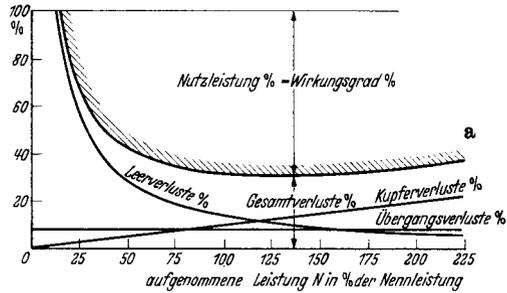


Abb. 21 a und b. Der prozentuale Anteil der Leerverluste, Übergangsverluste und Kupferverluste an den Gesamtverlusten über der elektrisch umgesetzten Leistung bei Motoren (a) und Generatoren (b), wenn diese proportional dem Strom ist.

wo sich Leer- und Lastverluste schneiden. Bei Motoren stellt die Kurve der Gesamtverluste bereits unmittelbar den Verlauf des Wirkungsgrades dar, wenn man als zugehörige Nulllinie die Waagerechte durch 100% auf der Ordinaten wählt. Bei Generatoren erhält man, wie in der Abbildung gezeigt, unmittelbar nur den reziproken Wert des Wirkungsgrades, also den Wert $1/(\text{Generatorwirkungsgrad})$, aus dem leicht die tatsächliche Kurve bestimmt werden kann. Es ist auch zu sehen, wie die gleiche Maschine, bei gleicher umgesetzter Leistung, einen höheren Wirkungsgrad als Generator gegenüber dem Motorbetrieb besitzt.

K. Die Belastungsverfahren.

Die elektrischen Maschinen werden bei der Prüfung möglichst vollbelastet und ihrer späteren Anwendung entsprechend gefahren. Der Generator wird als Stromerzeuger geschaltet und der Motor zum Antrieb von Belastungsmaschinen oder Bremsen benutzt. Zu diesem Zwecke werden die *Generatoren* von einem ihrer Leistung angepaßten Prüffeldmotor über Riemen oder Kupplung angetrieben. Als Stromverbraucher dienen entweder ruhende Widerstände oder ein aufnahmefähiges Netz, welches vorhanden ist oder durch einen besonderen Prüffeldumformer gebildet wird. Als Widerstände werden bei den kleineren Leistungen bis etwa 80 kW Drahtspiralen benutzt, die frei hängend in einem Eisenrahmen befestigt sind. Durch geeignet angeordnete Schalter ist es möglich, den Widerstandsbetrag in weiten Grenzen durch Reihen- oder Parallelschalten der einzelnen Gruppen zu verändern und der Spannung und der Stromstärke des Generators anzupassen. Für größere Leistungen bis zu einigen hundert kW verwendet man Wasserwiderstände mit regelbarem Zufluß. Diese bestehen im wesentlichen aus einem Wasserbehälter, in welchen mehrere in der Höhe verstellbare Elektroden eintauchen. Eine geringe Sodabeigabe verringert den Flüssigkeitswiderstand, ist aber oft gar nicht erforderlich. Die bei Stromdurchgang frei werdende Wärme erhitzt und verdampft einen Teil des Wassers, der durch den regelbaren Zufluß wieder ersetzt wird. Bei Verwendung der Wasserwiderstände sind einige Vorsichtsmaßnahmen zu beachten: Trog und Zuleitungen dürfen bei Betrieb nicht berührt werden. Die Elektroden müssen so durchgebildet sein, daß sie sich nicht einander nähern oder gar berühren können. Bei Versuchen an Generatoren höherer Spannung dürfen die Elektroden zur Erzielung des richtigen Belastungswiderstandes nicht unmittelbar bis zu ihrer unteren Kante ausgefahren werden. In diesem Falle besteht die Gefahr eines sich über der Oberfläche ausbreitenden Flamm Bogens, der leicht zur Inbrandsetzung benachbarter Teile führen kann. Die Wasserzufuhr muß vor Beginn der Versuche angestellt werden und ist während derselben zu überwachen.

Höhere Generatorleistungen werden fast ausschließlich an das Netz zurückgeliefert, ein Verfahren, das aus rein wirtschaftlichen Gründen bei Dauerversuchen auch schon bei kleineren Leistungen unter 100 kW Anwendung findet. Oft fährt man die Maschine wegen der bequemen Regelbarkeit während der Belastungsaufnahmen auf Widerstände und schaltet sie erst bei Dauerlauf auf das Netz.

Die *Motoren* treiben bei ihrer Belastung Prüffeldmaschinen an, die ihrerseits als Generatoren auf Widerstände oder das Netz arbeiten. Wegen ihrer allgemeinen Verwendbarkeit sind fast alle Prüffeldmaschinen Gleichstromnebenschlusmaschinen. Als solche können sie in gleicher Weise zur Belastung von Motoren und zum Antrieb von Generatoren innerhalb eines großen Drehzahlbereiches Verwendung finden. Zur besseren Anpassung von Leistung und Drehzahl werden die Probenmotoren bis zu den mittleren Leistungen meistens über Riemen mit der Prüffeldmaschine verbunden. Die direkte Kupplung, die mehr

Arbeit erfordert, findet Anwendung bei den Schnellläufern und bei den größeren Motoren über 100 kW. Sie wird bei der Vornahme von Hochlauf- oder Auslaufversuchen bevorzugt.

Wenn mehrere gleiche Maschinen zur Prüfung kommen, so können diese oft in Rückarbeit aufeinander belastet werden, indem die eine als Motor arbeitend die zweite antreibt, welche als Generator läuft und die von ihr erzeugte elektrische Leistung an den Motor zurückgibt. Zur Deckung der Verluste wird das Netz oder ein kleiner, mechanischer Zusatzantrieb herangezogen. Eine eingehende Beschreibung dieses Rückarbeitsverfahrens findet sich in Abschnitt I, I.

Die rein mechanische Belastung der Motoren mittels irgendwelcher *Bremsen*, also die sog. Abbremsung, tritt in der elektrischen Prüffeldpraxis weitgehend hinter der Belastung auf Generatoren zurück. Nur noch selten findet man den PRONYSchen Zaum und die Wasserwirbelbremse in den Prüffeldern vor. Beide arbeiten nach dem gleichen Grundsatz. Durch trockene oder flüssige Reibung wird ein auf die Maschinenwelle aufgesetzter Körper gebremst, wobei das auftretende Bremsdrehmoment am Ende eines mit dem ruhenden Teil der Bremse verbundenen Hebelarmes durch Gewichte oder eine Waage bestimmt werden kann. Aus der Beziehung:

$$\text{Leistung in kW} = \frac{\text{Drehmoment in mkg} \cdot \text{Drehzahl in Uml/min}}{973},$$

$$\left(973 = \frac{60000}{2\pi \cdot 9,81}\right)$$

ergibt sich dann bei bekannter Drehzahl unmittelbar die vom Motor abgegebene Leistung. Da diese in Wärme umgesetzt wird und durch Kühlwasser von der Bremse weggeführt werden muß, ist die ganze Anlage mit einem Wasserzufluß und Abfluß auszurüsten.

Die Regelung der Bremsleistung findet beim Bremszaum durch verschieden starkes Anspannen und bei der Wasserwirbelbremse durch Veränderung des Wasserinhaltes im Innern der Bremse statt. Der verhältnismäßig einfache Aufbau, die leicht übersichtbare Wirkungsweise und der geringe Raumbedarf werden zum Teil von den Nachteilen aufgewogen. Der unbedingt erforderliche Wasseranschluß, der oft schwierig zu bewerkstelligende Abfluß und die weniger feine Regelbarkeit haben diese Bremsen sogar bei den kleineren Leistungen im elektrischen Prüffeld fast ganz verschwinden lassen. Die Unmöglichkeit der nutzbaren Wiedergewinnung der vom abgebremsten Motor abgegebenen Leistung schließt ihre Anwendung bei der Prüfung größerer elektrischer Motoren heute wohl völlig aus.

L. Die Pendelmaschine.

In steigendem Umfang wird als Prüffeldmaschine die Pendelmaschine verwendet, die die Vorzüge der elektrischen Belastungsmaschinen mit denen der mechanischen Bremsen, nämlich die Energierückgewinnung mit der leichten und zuverlässigen Drehmomentbestimmung, vereinigt. Sie kann zum Antrieb und zur Belastung benutzt

werden. Mit Pendelbremse, Pendelbremsdynamo oder elektrischer Leistungswaage werden alle jene Prüfmaschinen bezeichnet, welche bei sonst ganz normalem elektrischem Aufbau als Gleich- oder Wechselstrommaschine ein drehbar gelagertes Gehäuse besitzen. Diese Maschinen erlauben in einfachster und sehr genauer Weise das Drehmoment zu messen, welches ihrer Welle zugeführt oder von ihr abgegeben wird. Die Bestimmung desselben erfolgt genau wie bei den mechanischen Bremsen durch Gewichte oder Waagen am Ende eines Hebelarmes, der am Gehäuse angesetzt ist. Gewicht in kg mal Hebelarm in m ergibt bei waagrechttem Arm und senkrecht angreifender Kraft das Drehmoment in mkg. Die Leistungsbestimmung ergibt sich wie oben zu: Leistung in kW = Drehmoment mal Drehzahl geteilt durch 973.

Aus unten näher angeführten Gründen tritt zu der gemessenen Kraft noch ein kleiner Korrekturwert, der nur von der Drehzahl abhängt und bei der einmaligen Eichung der Pendelmaschine ermittelt wird. Man stellt ihn in einer Tabelle oder Korrekturkurve dar.

Die Wirkungsweise der Pendelmaschine beruht auf der Wechselwirkung der Kräfte zwischen Läufer und Ständer der elektrischen Maschinen. Läuft z. B. eine Maschine als Motor und treibt eine Arbeitsmaschine mit einem Drehmoment von 100 mkg an, so wirkt das gleiche Drehmoment, und zwar in umgekehrter Richtung auf ihren Ständer zurück. Dieses Drehmoment wird normalerweise von den Fundamentalschrauben auf den Sockel übertragen und bleibt daher der Beobachtung oder gar der Messung unzugänglich. Fehlt die starre Gehäusebefestigung dagegen, und tritt an ihre Stelle eine drehbare Lagerung, so versucht das Gehäuse der belasteten Maschine sich zu verdrehen, und zwar in Gegenrichtung zur Ankerdrehung bei motorischem und in Drehrichtung bei generatorischem Betrieb. Man merkt sich leicht: Der Motorläufer stößt sein Gehäuse nach hinten ab, der Generatorläufer zieht den Ständer mit. Wenn das Gehäuse waagerechte Hebelarme erhält, so kann durch daran in richtigem Sinne ansetzende Kräfte, seien es Gewichte oder der Gegendruck einer Waage, die Verdrehung des Gehäuses gerade vermieden werden. Bei zu geringer Kraft verdreht es sich im einen, bei zu großer Kraft im anderen Sinne. Anschläge begrenzen die Ausschläge nach beiden Seiten. Bei richtigem Auswiegen spielt das Gehäuse und das Drehmoment kann abgelesen werden.

Der grundsätzliche Aufbau einer älteren Gleichstrompendelmaschine ist in Abb. 22 dargestellt. Die Ankerwelle läuft in den beiden äußeren Lagern, die fest mit der Grundplatte verbunden sind. Das Gehäuse kann sich mittels zweier weiterer Lager frei auf der ruhenden oder umlaufenden Welle drehen. Ein Gehäusezeiger und eine auf der Grundplatte befestigte Gegenmarke kennzeichnen die Nullage, die durch genaues Auswiegen eingestellt werden muß.

Bei den neueren Ausführungen nach Abb. 23 fehlen die beiden äußeren Lager. Die Welle läuft in normal angeordneten Gehäuselagern und das Gehäuse selbst dreht sich in besonderen, mit der Grundplatte verbundenen Lagern. Auf diese Weise wird die Reibung zwischen der Welle und den festen Lagern vermieden, die bei der Bestimmung des

Gehäusedrehmomentes nicht unmittelbar mit erfaßt werden konnte. Fast alle Kräfte laufen über das Gehäuse. Es fehlen nur die geringfügigen Kräfte, die ein Teil des ein- und austretenden Kühlluftstroms auf den Ständer ausübt. Sie werden durch die Korrektur erfaßt. Die

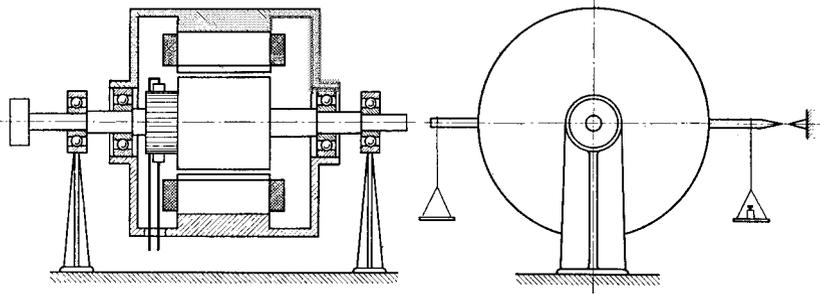


Abb. 22. Pendelmaschine älterer Bauart. (Welle läuft in Bocklagern.)

stillstehenden Gehäuselager verursachen infolge ihrer Reibungsmomente der Ruhe eine gewisse Ansprechempfindlichkeit, die bei laufender Maschine durch das stets auftretende geringe Zittern des Gehäuses stark zurückgeht. Die Vorzüge der neueren Bauweise, die also in der wesentlichen Verringerung der Korrekturwerte bestehen, wiegen diesen kleinen Nachteil auf.

Die Pendelmaschine wird entweder durch Eigenlüfter oder bei großem Regelbereich durch einen aufgesetzten Fremdlüfter gekühlt. Die Luftführung wird so angeordnet, daß der Luftstrom möglichst axial ein- und ausgeleitet wird. Dies trägt zur weiteren Verringerung der Korrektur bei. Bei der Eichung der Pendelmaschine werden alle ungewollterweise auftretenden Drehmomente erfaßt.

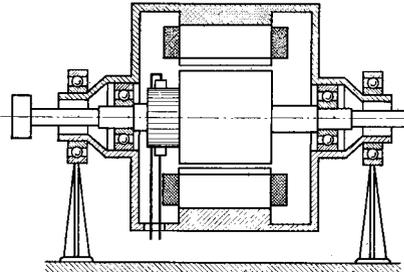


Abb. 23. Pendelmaschine neuerer Bauart. (Welle läuft in Gehäuselagern.)

Fest angebaute Drehzahlmeßgeräte und selbsttätig arbeitende Waagen, die auf großen Skalen die Drehzahl und das Drehmoment in mkg anzeigen, vervollkommen mitunter die Ausrüstung der Pendelmaschine. Umlaufzähler in Verbindung mit einer Stoppuhr gewährleisten die genaueste Ermittlung der Drehzahl.

Aufnahme von Belastungskennlinien. Die Pendelmaschine ist die gegebene Prüfmaschine für alle Motoren, die in einem großen Drehzahlregelbereich arbeiten und innerhalb desselben geprüft werden sollen. Hierzu gehören viele Gleichstrommotoren und alle Arten von Wechselstrom-Kommutatormaschinen. Während bei ersteren auf die Aufnahme vieler Belastungskennlinien im verlangten Geschwindigkeitsbereich noch eher verzichtet werden kann, da die Lastpunkte auch ohne großen Aufwand rechnerisch oder zeichnerisch ermittelt werden können, liegen die

Verhältnisse bei der Prüfung der Wechselstrommotoren schwieriger. Nur mit Mühe und wesentlich geringerer Genauigkeit kann das Verhalten zwischen Leerlauf und Vollast auf Grund der Vorausrechnung oder einfacher Meßergebnisse bestimmt werden. Die unmittelbare Messung ist stets erwünscht. Weiterhin ist bei diesen Maschinen infolge ihrer besonderen Wirkungsweise oft die Möglichkeit der Beeinflussung ihrer Kennlinien gegeben. Daher besteht bei der Prüfung die Aufgabe, die Belastungskennlinien bei neu eingestellter Maschine zu wiederholen. Häufig soll die Belastung der geregelten Motoren einem bestimmten Gesetz in Abhängigkeit der Drehzahl folgen, sei es, daß das Drehmoment konstant bleibt oder linear oder quadratisch mit der Geschwindigkeit zunimmt. Eine Prüfung solcher Betriebskennlinien mit Hilfe von normalen, wenn auch geeichten Prüffeldmaschine ist lästig, zeitraubend und nicht immer frei von Fehlern. Bei Verwendung der Pendelmaschine wird vor Beginn der Prüfung eine Tabelle aufgestellt, in welcher zu den einzelnen Drehzahlen die zugehörigen Drehmomente eingetragen werden. Dann wird die Probemaschine angefahren, auf die einzelnen Geschwindigkeiten hochgeregelt und mit dem der Tabelle entnommenen Drehmoment belastet. Auf diese Weise erhält man schnell die Vollast- und gegebenenfalls die Teillastkurven. Jede Umrechnungsarbeit, die sonst bei nicht genau eingehaltenen Lastwerten geleistet werden muß, entfällt. Diese Vorzüge führen zur weitgehenden Verwendung der Pendelmaschine auch bei der Prüfung anderer Motoren.

Bestimmung des Wirkungsgrades. Außer zur Aufnahme der Belastungskennlinien wird die Pendelmaschine sehr häufig zur unmittelbaren Bestimmung des Wirkungsgrades der zu prüfenden Maschine benutzt. Dies gilt besonders für die Wechselstromkommutatormaschinen, bei denen andere Wirkungsgradermittlungen in der Praxis gänzlich zurücktreten.

Mit der genauen Kenntnis des Drehmomentes an der Kupplung und der Drehzahl liegt der Wert der abgegebenen oder zugeführten Leistung der Probemaschine fest. Die Messung der elektrisch umgesetzten Leistung ist bei allen Maschinen mit Hilfe der in die Netzzuleitungen eingebauten Meßgeräte mit recht großer Genauigkeit möglich. Das Verhältnis beider Leistungen ergibt den Wirkungsgrad, und zwar mit einer Genauigkeit, welche der Genauigkeit der Einzelmessungen entspricht. Da die Drehmomentbestimmung auf die Messung einer Länge und eines Gewichtes zurückgeführt wird, ist sie sehr genau durchzuführen. Der Fehler dürfte etwa $\pm 0,1\%$ nicht überschreiten. Die Drehzahlermittlung ist wesentlich ungenauer, wenn sie mit einem Drehzahlmesser erfolgt. Selbst gute Geräte haben einen Fehler von $\pm 0,5\%$. Bei Verwendung von Umlaufzählern, die nicht springen, wozu sie allerdings nur bei unsorgfältigem Anhalten und bei zu hohen Drehzahlen neigen, ist die Geschwindigkeitsmessung mittels einer guten Stoppuhr als fast fehlerfrei anzusehen. Die Ansprechempfindlichkeit der Pendelmaschine liegt etwa bei $0,2\%$ des vollen Drehmomentes. Die Korrekturwerte müssen berücksichtigt werden. Sie werden bei der Eichung gemessen und ändern sich bei den Maschinen der neueren Bauart nicht im Laufe der Zeit.

Unter Berücksichtigung dieser Fehler kann bei sorgfältigen Messungen eine Leistungsbestimmung von unter 1,0% Gesamtfehler erwartet werden. Der direkt gemessene Wirkungsgrad wird also auf $\pm 1,0\%$ genau bestimmt.

Bestimmung des Korrekturdrehmomentes der Pendelmaschine. Aus Abb. 24 sind in schematischer Darstellung die die Korrektur bedingenden Drehmomente zu entnehmen. Sie gehen ausschließlich auf jene Kräfte

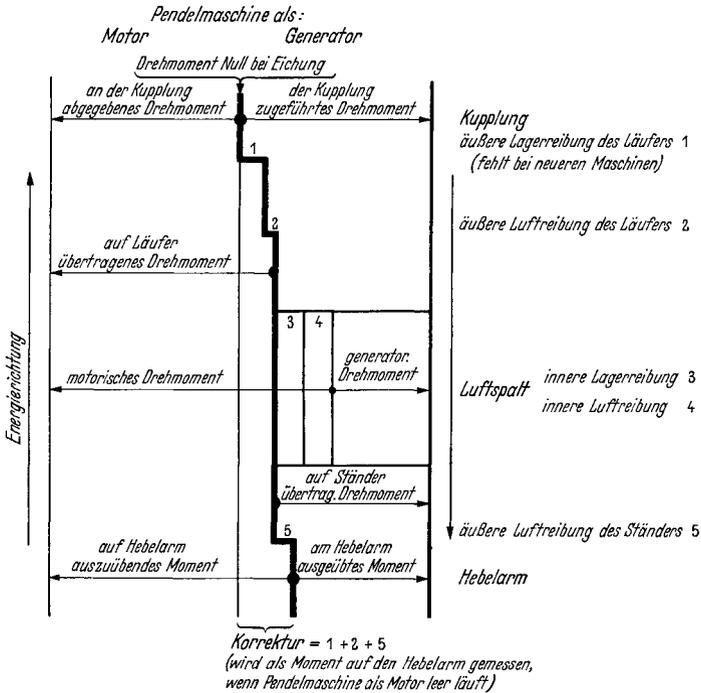


Abb. 24. Drehmomentfluß in der Pendelmaschine.
 $Md_{\text{kupplung}} = Md_{\text{Hebelarm}} + K$ bei Generatorbetrieb
 $Md_{\text{kupplung}} = Md_{\text{Hebelarm}} - K$ bei Motorbetrieb
 $K =$ Korrekturdrehmoment.

zurück, die von außen her entweder nur auf die Welle und den Läufer oder nur auf den Ständer einwirken. Alle Kräfte zwischen Läufer und Welle einerseits und Ständer andererseits werden dagegen beim Auswiegen des Ständers mit erfaßt. Auf die Welle wirken ein die Reibungskräfte der äußeren festen Lager bei der älteren Ausführung nach Abb. 22 und die Reibungskräfte der mitgerissenen Luft. Auf den Läufer wirken bei vollkommen geschlossener Maschine überhaupt keine äußeren Kräfte ein. Bei der offenen Maschine tritt jedoch eine Reibung mit der Außenluft auf, die allerdings nur einen sehr kleinen Teil der Gesamtluftreibung der bewegten Teile ausmacht. Der weitaus größte Teil der durch die innere Luftwirbelung hervorgerufenen Momente wird auf den Ständer übertragen und äußert sich nur in der meßbaren Grundlast

der Maschine, d. h. daß man die Bremse nicht völlig entlastet fahren kann, auch wenn der Erregerstrom auf Null gebracht wird. Auf das Gehäuse wirken als äußere Kräfte vor allem Unbalancen ein. Diese werden durch Gegengewichte von vornherein ausgeglichen. Weiter kann der von einem aufgebauten Fremdlüfter angesaugte Luftstrom tangential äußere Kräfte verursachen, die durch die Korrektur zu erfassen sind. Drittens kommt bei der neueren Ausführung nach Abb. 23 die Reibung der Gehäuselager hinzu. Sie kann durch die Korrektur nicht erfaßt werden, da die Richtung dieser Reibungskräfte unbestimmt ist. Sie bedingen den Ungenauigkeitsgrad der Anzeige. Die Bestimmung der Korrekturdrehmomente geht von folgender Überlegung aus. Wenn die Pendelmaschine als leerlaufender Motor an einem Netz beliebiger Spannung liegt, so muß offenbar das an ihrer freien Kupplung abgegebene Drehmoment gleich Null sein, da ja keinerlei Verbraucher mechanischer Energie angekuppelt ist. Das Gehäuse zeigt jedoch bei diesem Versuch einen Ausschlag, und es kann erst nach Auflegen eines Gewichtes auf der einen oder anderen Seite in die Nullage gebracht werden. Dieses Drehmoment muß nun so korrigiert werden, daß es zu Null wird. Das Korrekturdrehmoment ist daher von umgekehrt gleicher Größe. Die Eichung besteht also in der Vornahme des Leerlaufes als Motor bei verschiedenen Drehzahlen. Zu jeder Drehzahl wird das Drehmoment $Md_0 = K$ in mkg bestimmt, welches nötig ist, um das Gehäuse auszuwiegen. Es ist positiv zu bezeichnen, wenn unter seiner alleinigen Wirkung sich das Gehäuse im Sinne der Läuferdrehrichtung verstellen würde. Es ist negativ zu benennen, wenn es allein wirkend gedacht den Ständer in Gegenrichtung zum Anker verdrehen würde. (Negative Werte für die Korrektur K ergeben sich in dem praktisch fast nie vorkommenden Fall, daß der einseitig wirkende Luftzug des Fremdlüfters größer als die von außen auf den Anker einwirkenden Verlustdrehmomente ist und in anderer Richtung wie diese wirkt.) Da der Korrekturwert für beide Drehrichtungen grundsätzlich verschiedene Werte annehmen kann, ist der Leerlaufversuch auch in beiden Drehrichtungen durchzuführen und eine getrennte Darstellung von K_{rechts} und K_{links} über der Rechts- bzw. Linksdrehzahl vorzunehmen.

Wenn die Pendelmaschine als Motor läuft, ist ihr wahres an der Kupplung abgegebenes Drehmoment:

$$Md_{\text{kupplung}} = Md_{\text{Hebelarm}} - K \quad (\text{Pendelmaschine treibt an})$$

und wenn sie als Generator arbeitet, hat es den Wert:

$$Md_{\text{kupplung}} = Md_{\text{Hebelarm}} + K \quad (\text{Pendelmaschine wird angetrieben}).$$

Man merkt sich leicht folgende Regel, die für positive Korrekturwerte, also für die meisten Fälle gilt:

Die mit der Pendelmaschine gemessenen Drehmomente werden durch die Korrektur so geändert, daß sich für den Wirkungsgrad der geprüften Maschine höhere Werte ergeben. Wenn die Korrektur nicht berücksichtigt wird, zeigen die geprüften Maschinen, Motoren oder Generatoren, daher zu kleine Wirkungsgrade.

Die Wirkungsgradformeln lauten bei:

$$\text{Motorprüfung} \quad \eta \% = 102,7 \frac{(Md + K) \cdot n}{N_{zu}},$$

$$\text{Generatorprüfung} \quad \eta \% = 97,3 \frac{N_{ab}}{(Md - K) \cdot n},$$

Md = gemessenes Gehäusedrehmoment in mkg,

K = Korrektur in mkg,

n = gemessene Drehzahl in Uml/min,

N_{zu} = zugeführte Leistung in W,

N_{ab} = abgegebene Leistung in W,

$\eta\%$ = Wirkungsgrad in %,

$$102,7 = \frac{9,81\pi}{30} \cdot 100,$$

$$97,3 = \frac{30}{9,81\pi} \cdot 100.$$

M. Die Drehmoment-Drehzahlkennlinien der Antriebs- und der Belastungsmaschinen.

Während der Prüfung der elektrischen Maschinen zeigt sich die Erscheinung, daß in der einen Anordnung die Belastung schnell und sicher eingestellt werden kann, während bei anderen Verfahren oft erst ein geduldiges und feinfühliges Hin- und Herregeln an den Erregerwiderständen zur genauen Einstellung der gewünschten Werte führt. Lästig wird solch ein unsicheres Verhalten der Maschinen besonders bei der Ablesung vieler Meßgeräte, da während der längeren Beobachtungszeit schon wieder wesentliche Laständerungen eingetreten sein können. Die Ursache dieser Erscheinungen wird klar, wenn man die Belastungskennlinien sowohl der Probe- wie auch der Prüffeldmaschine untersucht. Man geht am besten von den Drehmomentkennlinien über der Drehzahl aus und untersucht die Größe des Einflusses, den geringe Änderungen der Drehzahl, der Netzspannung oder des Erregerstromes ausüben.

Die Gleichstrommaschine. Zuerst werde als wichtigste Prüffeldmaschine die Gleichstrommaschine mit Fremderregung untersucht. Sie arbeitet als Motor oder Generator auf das Netz oder als Generator auf Widerstände. Bei Netzanschluß gehört zur Leerlaufdrehzahl das Drehmoment Null. Wenn sie als Motor belastet wird, sinkt die Drehzahl mit steigendem Drehmoment etwas ab. Durch Feldschwächung oder Erhöhung der Netzspannung kann man den Leerlaufpunkt und mit ihm die Drehmomentlinie auf Werte höherer Drehzahl verschieben. Im großen und ganzen verlaufen diese Linien parallel zueinander.

Wenn die gleiche Maschine als Generator auf das Netz arbeiten soll, muß die Drehzahl über die Leerlaufgeschwindigkeit erhöht werden. Mit steigendem Generator Drehmoment steigt die Drehzahl etwas an. Die Drehmomentkennlinien über der Drehzahl stellen eine Verlängerung

der Motorkennlinien dar. Beide sind gemeinsam in Abb. 25 wieder gegeben. Es sei besonders darauf hingewiesen, daß die Kennlinien ganz

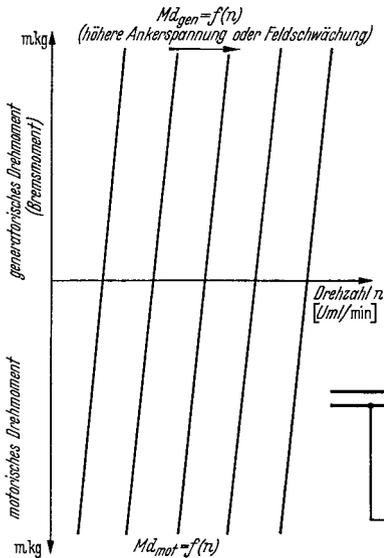


Abb. 25. Drehmomentkennlinien der Gleichstrommaschine am Netz.

allgemein den dargestellten Verlauf haben müssen, daß also die Motordrehzahl bei Last sinkt und die Generatorgeschwindigkeit bei Last steigt. Je größer die Steilheit der Kennlinien wird, desto härter arbeitet die Maschine. Wenn sie weniger steil verlaufen, spricht man von einer weichen Maschine. Die harte Maschine beantwortet geringste Änderungen der Drehzahl, der Netzspannung oder des Erregerstromes mit starken Lastschwankungen, während die weiche Maschine sich wesentlich unempfindlicher verhält. Durch Verdrehen der Bürstenbrücke kann der Härtegrad in ge-

wissen Grenzen eingestellt werden, und zwar gilt, unabhängig ob Motor oder Generatorbetrieb vorliegt, die Regel:

Bürstenverschiebung *in* Ankerdrehrichtung macht die Maschine *weicher*,

Bürstenverschiebung *gegen* die Drehrichtung macht sie *härter*.

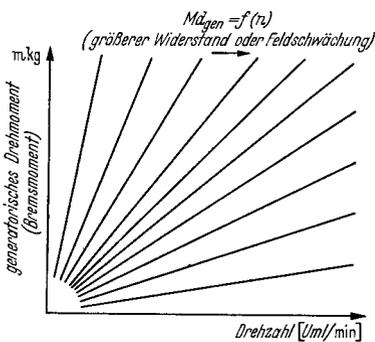


Abb. 26. Drehmomentkennlinien der Gleichstrommaschine mit Widerstandsbelastung.

Da das zu harte Arbeiten einer Maschine Gefahren mit sich bringen kann, wird bei Prüffeldmaschinen die Bürstenbrücke immer etwas in der jeweiligen Drehrichtung vorge-schoben. Die Gefahr der harten Maschine, bei der also die Brücke in der neutralen Stellung steht oder gar rückwärts verschoben

wurde, besteht bei Motoren in der Neigung zum Durchgehen und bei Generatoren in der Neigung zu übermäßiger Belastungsaufnahme.

Die Drehmoment-Drehzahlkennlinien des Gleichstromgenerators, der auf Widerstände als Verbraucher geschaltet ist, haben einen grundsätzlich anderen Verlauf. Bei gleichbleibendem Erregerstrom steigt die Spannung und mit ihr der Ankerstrom verhältnismäßig mit der Drehzahl an. Das Drehmoment, welches bei gleichbleibendem Fluß nur vom Strom abhängt, wächst also ebenfalls mit der Drehzahl an. Die Drehmoment-Drehzahlkurve ist mithin eine Gerade durch den Nullpunkt (Abb. 26). Ihre Neigung hängt ab vom Wert des Belastungswiderstandes und von der Höhe des Erregerstromes. Erhöhte Erregung oder veringertes Widerstand bewirken einen steileren Anstieg der Kennlinien. Bei schwacher Erregung und hohen Belastungswiderständen verlaufen sie flacher. Man erkennt, daß eine kleine Änderung des Erregerstromes oder der Drehzahl nur eine geringe Drehmomentänderung zur Folge hat, daß also der Generator in dieser Schaltung gegenüber dem Netzbetrieb sehr weich arbeitet. Hieraus erklärt sich die große Beliebtheit des Belastungsverfahrens auf Widerstände.

Die Synchronmaschine, welche nur in geringerem Umfange als Prüfmaschine bei verschiedenen Drehzahlen benutzt wird, hat ganz

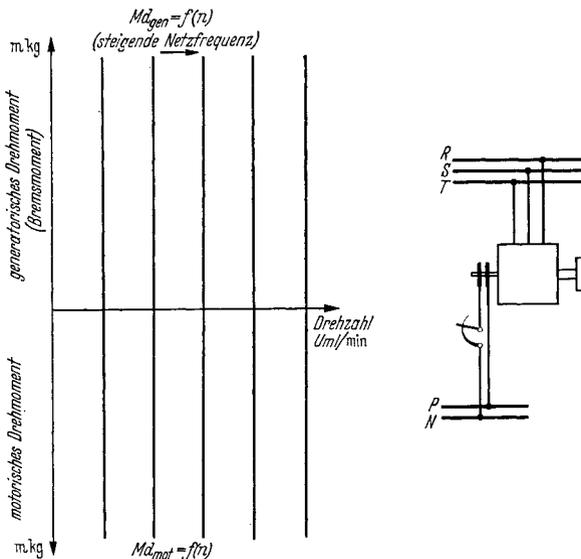


Abb. 27. Drehmomentkennlinien der Synchronmaschine am Netz.

andere Kennlinien. Wenn sie als Motor oder Generator am Netz arbeitet, so ist ihre Drehmomentkennlinie eine Senkrechte durch den Punkt der synchronen Drehzahl (Abb. 27). Wird die Synchronmaschine dagegen auf Widerstände belastet, so ändert sich der Verlauf wesentlich. Bei ganz kleinen Geschwindigkeiten gelten noch dieselben Überlegungen wie bei der Gleichstrommaschine. Die Spannung, der Strom und infolgedessen auch das Drehmoment steigen linear mit der Drehzahl an. Der

Erregerstrom und der Belastungswiderstand beeinflussen die Neigung der Drehmoment-Drehzahllinie zu Beginn wie beim Gleichstromerzeuger. Die bei Synchronmaschinen auftretende Rückwirkung des Ankerstromes auf das Feld führt nun aber bei steigender Drehzahl zu einer immer stärkeren Feldschwächung, die trotz steigenden Ankerstromes zu einer Wiederabnahme des Drehmomentes führt, nachdem dieses einen Höchstwert erreicht hat. Abb. 28 zeigt die Kennlinien für verschieden hohe Belastungswiderstände und verschieden starke Erregerströme. Das Höchstmoment tritt meistens unterhalb des benutzten Drehzahlbereiches auf, so daß innerhalb desselben mit einem fast gleichbleibenden Drehmoment gerechnet werden kann. Dies bedeutet manchmal einen großen Vorteil, da Drehzahlschwankungen praktisch überhaupt

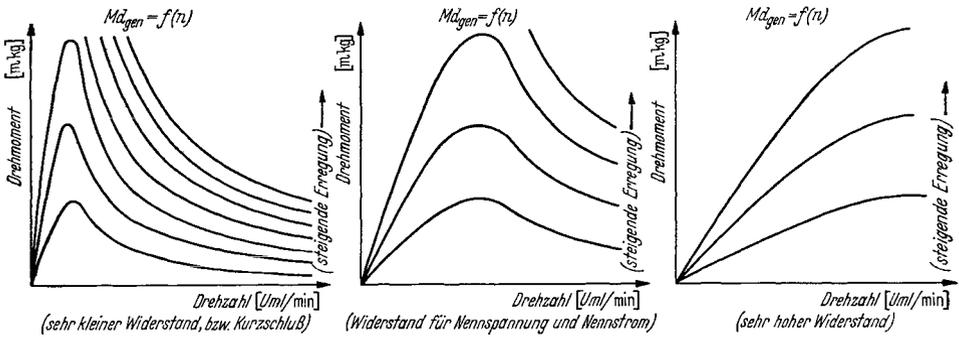
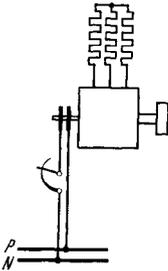


Abb. 28. Drehmomentkennlinie der Synchronmaschine mit Widerstandsbelastung.



keine Drehmomentänderungen hervorrufen. Lediglich die Einstellung des Erregerstromes oder des Belastungswiderstandes bestimmt das bremsende Moment. Bei der Prüfung von Nebenschlußmotoren mit regelbarer Geschwindigkeit sind Synchronmaschinen, besonders wenn sie als Pendelbremsen ausgeführt sind, bequeme und angenehme Belastungsmaschinen.

Man kann während der Belastungsaufnahmen ruhig die Drehzahl der Probemaschine höher regeln, ohne gleichzeitig aufmerksam die Erregung der Belastungsmaschine nachstellen zu müssen, und läuft dabei doch nicht Gefahr, daß sich die Belastung allzu schroff ändert.

Stabilität und Unstabilität. Stabile Arbeitspunkte bei der Untersuchung eines Motors ergeben sich nur dort, wo sich die Drehmomentkennlinien des Motors und des ihn belastenden Generators schneiden und wo überdies bei steigender Drehzahl das Drehmoment des Motors weniger stark als das Bremsmoment des Generators zunimmt. Im allgemeinen ergeben sich also insbesondere dort stabile Punkte, wo die Drehmomentkennlinie des Motors mit zunehmender Geschwindigkeit abfällt. Wenn man zu jeder Drehzahl die Differenz aus Motordrehmoment und Bremsmoment bestimmt und über der Drehzahl aufträgt,

so schneidet diese Restmomentkurve die Abszisse in allen Punkten, wo überhaupt eine Belastung möglich ist. Von diesen Punkten sind aber nur jene als stabil zu bezeichnen, wo die Kurve bei steigender Drehzahl negativ wird, unstabil dementsprechend jene anderen Punkte, wo die

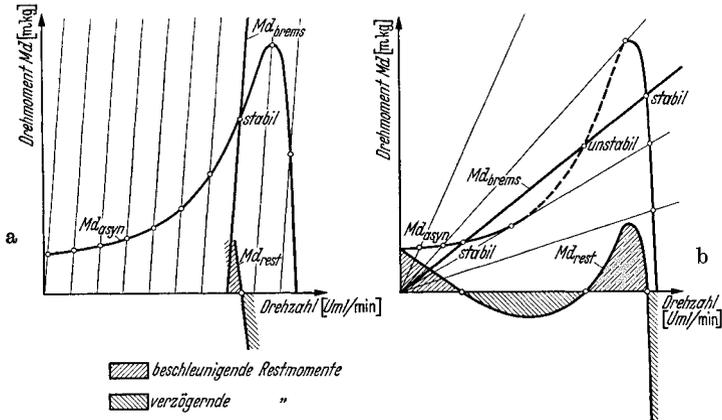


Abb. 29. Abbremsung eines Asynchronmotors durch Gleichstrommaschine, die (a) auf ein Netz, (b) auf einen Widerstand belastet wird. Im Fall (a) kann die ganze Drehmomentkennlinie, im Fall (b) nur der ausgezogene Teil stabil untersucht werden. Stabile Arbeitspunkte ergeben sich, wo Restdrehmomentkurve bei steigender Drehzahl negativ wird.

Kurve wieder positiv wird. In Abb. 29 ist der praktisch wichtige Fall der Untersuchung eines Asynchronmotors (es könnte auch ein Synchronmotor sein) dargestellt, dessen ganze Drehmomentkurve Punkt für Punkt aufgenommen werden soll. Man erkennt, daß dies nur mit einer am Netz liegenden Gleichstrommaschine möglich ist, da mit einer auf Widerstand arbeitenden Maschine ein großer Teil der Kurve nicht aufgenommen werden kann.

Abschnitt II.

Die besondere Maschinenprüfung.

A. Der Transformator.

Allgemeines. Die technischen Leistungstransformatoren dienen der Umspannung von Wechselstrom gegebener Spannung in solchen einer anderen Spannung unter Übergabe von Wirk- und Blindleistung aus dem speisenden Primärnetz in das gespeiste Sekundärnetz. Der Transformator besteht im wesentlichen aus dem aktiven Eisenkörper und den darauf aufgebrauchten Wicklungen, von denen die Primärwicklung die Leistung aufnimmt und eine oder mehrere Sekundärwicklungen die Leistung an Verbraucher abgeben. Gelegentlich vorgesehene Tertiärwicklungen in Dreieckschaltung dienen der Verbesserung der Magnetisierungsverhältnisse und werden nicht nach außen geführt. Je nach

Schaltung unterscheidet man den einfachen Transformator, der ohne leitende Verbindung zwei Netze miteinander kuppelt und den Spartransformator, bei dem die Wicklungen so in Reihe geschaltet sind, daß die ankommende Primärspannung um den kleinen Betrag der Sekundärspannung vergrößert oder verkleinert wird; ferner den Zusatztransformator, dessen Sekundärspannung meist unter Phasenschwenkung mit der Spannung eines anderen Stromkreises in Reihe geschaltet ist und den Stromtransformator, der als einziger in Reihenschaltung im Primärnetz liegt. Er speist irgendwelche Verbraucher nennenswerter Leistungsaufnahme mit einer dem primären Strom proportionalen Stromstärke. Die Drosselspule besitzt den Aufbau eines Transformators, der nur eine Primärwicklung trägt. Sie hat entweder einen Eisenkern oder wird als Luftdrossel ausgeführt.

Der leerlaufende Transformator entnimmt dem Netz einen kleinen Leerlaufstrom, dessen Blindanteil der Magnetisierung des Eisens und dessen Wirkanteil der Deckung der Eisenverluste und der meist verschwindend geringen Leerlaufkupferverluste dient.

Der sekundärseitig belastete Transformator nimmt einen erhöhten Primärstrom auf, der um den Betrag des auf die Primärseite umgerechneten Sekundärstromes größer als der Leerlaufstrom ist. Bei Speisung von Wirk- und Blindlastverbrauchern sinkt dabei die sekundäre Spannung infolge der an den eigenen Wirk- und Blindwiderständen auftretenden Spannungsabfälle ab. Der auf die sekundäre Nennspannung bezogene Abfall wird in Prozent ausgedrückt und Spannungsänderung genannt.

Der widerstandslos kurzgeschlossene Transformator führt einen den primären Nennstrom um ein Mehrfaches überragenden Kurzschlußstrom, dessen Höhe von der Größe der Wirk- und Streublindwiderstände abhängt. Er darf den 30fachen Wert nicht überschreiten.

Die Prüfung der Transformator erstreckt sich auf den Leerlaufversuch, den Kurzschlußversuch, den Erwärmungsversuch, die Proben der elektrischen Festigkeit und die rechnerischen Bestimmungen der Spannungsänderung und des Wirkungsgrades. Die Kontrolle auf richtige Schaltgruppen erfolgt durch gegenseitige Ausmessung der Spannungen der einpolig verbundenen Primär- und Sekundärseite. Stoßkurzschlußversuche werden meist nur an Modellen, an Erstaussführungen einer Typenreihe und an Transformatoren für Gleichrichterbetrieb vorgenommen.

Die Schaltgruppen (vgl. Zusammenstellung). Die Wicklungen der Primär- und der Sekundärseite der mehrphasigen Transformatoren können in Stern, in Dreieck oder in Zickzack geschaltet werden. Die Art der gewählten Schaltung hängt vom Verwendungszweck ab. Man unterscheidet kleine Verteilungstransformatoren, mit wenig oder vollbelastbarem Nullpunkt, große Verteilungstransformatoren mit vollbelastbarem Nullpunkt für Netze mit neutralem Leiter sowie große Transformatoren für Kraftwerke und Stationen, die nicht der Verteilung dienen.

Bei der Stern-Sternschaltung der Gruppe A 2 ist Nullpunktbelastung der Kerntransformatoren nur bis zu einem geringen Betrag

von etwa 10% der Nennleistung zulässig. Abb. 30 läßt erkennen, daß auf der Primärseite auch die Wicklungen der beiden unbelasteten Schenkel Strom führen müssen. Die Stromwindungssumme in beiden Fenstern ist zwar gleich Null, jedoch verbleibt eine in allen drei Schenkeln gleichgerichtete Magnetisierung mit einem Rückschluß der Kraftlinien über die Luft und den Kessel. Die Folge ist eine empfindliche Störung der Spannungssymmetrie.

In der Stern-Zickzack-schaltung (Gruppe C 3) kann der Nullpunkt voll belastet werden. Der Strom der einphasigen Last (Abb. 31) verteilt sich gleichmäßig auf die Sekundär- und auf die Primärseite zweier Schenkel. Diese Schaltung wird bei kleineren Leistungen bevorzugt.

Bei Dreieck - Stern-schaltung (Gruppe C 1) ist der Nullpunkt ebenfalls voll belastbar. Dem einphasigen sekundären Belastungsstrom wirkt auf der Primärseite ein Primärstrom entgegen, der, ohne eine weitere Phase zu durchfließen, unmittelbar dem Netz entnommen wird. Der belastete Schenkel verhält sich wie ein Einphasentransformator. Diese Schaltung wird bei großen Einheiten gewählt (Abb. 32).

Die Schaltung Stern-Dreieck (Gruppe C 2) wird bei großen Transformatoren bevorzugt, da bei ihr das Aus-treten von Streuflüssen der dreifachen Periodenzahl verhindert wird. Im Innern der Dreieckwicklung kann sich der zur Magnetisierung benötigte Strom dreifacher Periodenzahl ausbilden. Bei ganz großen Einheiten, die sekundär mit einer Erdschlußspule ausgerüstet werden, wählt man wieder die Stern-Sternschaltung A 2, versieht aber

Zusammenstellung gebräuchlicher Schaltgruppen von Drehstromtransformatoren

Schaltgruppe	Vektorbild		Schaltungsbild	
	Ober-Spannungen	Unter-Spannungen	Ober-Spannungen	Unter-Spannungen
A ₁				
A ₂				
A ₃				
B ₁				
B ₂				
B ₃				
C ₁				
C ₂				
C ₃				
D ₁				
D ₂				
D ₃				

den Transformator mit einer Dreieck-Tertiärwicklung von etwa 20 bis 30% des Kupferaufwandes einer Arbeitswicklung.

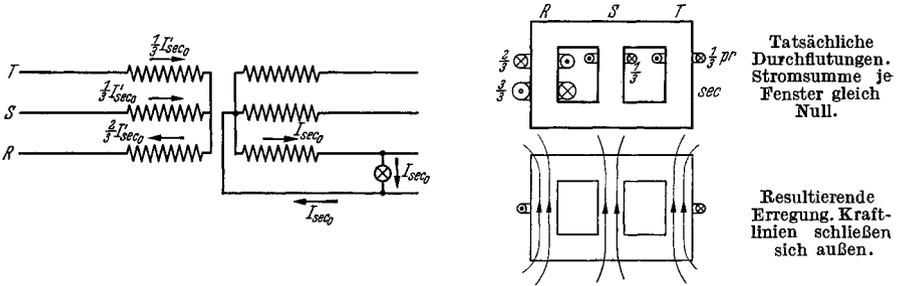


Abb. 30. Einphasige Belastung eines λ/λ -Schenkeltransformators. Zulässiger Strom etwa 10% des Nennwertes.

Die Schaltgruppen nach RET sind auf Seite 59 zusammengestellt. In Gruppe A liegen die Sekundärklemmenspannungen gleichphasig mit den primären, in Gruppe B dagegen in Gegenphase. In Gruppe C

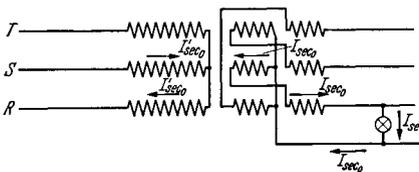
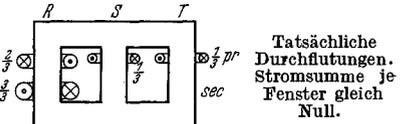
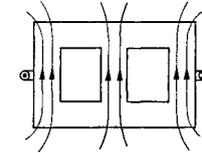


Abb. 31. Einphasige Belastung eines λ/λ -Transformators. Summe der Stromwindungen je Schenkel gleich Null. Zulässiger Strom gleich Nennstrom.



Resultierende Erregung. Kraftlinien schließen sich außen.



haben die Sekundärspannungen eine Phasenschwenkung von 210° und in Gruppe D eine solche von 30° gegenüber den Primärspannungen. Bei freier Wahl der Gruppen zieht man A der Gruppe B und C der Gruppe D vor. B und D werden nur verwendet, wenn neue Transformatoren mit vorhandenen parallellaufen sollen.

Die Einphasentransformatoren, die zur Gruppe E gehören, haben gleiche Phasenlage beider Spannungen.

Die Klemmenbezeichnungen lauten UVW auf der Oberspannungsseite, uvw auf der Unterspannungsseite. O und o bezeichnet die Sternpunkte.

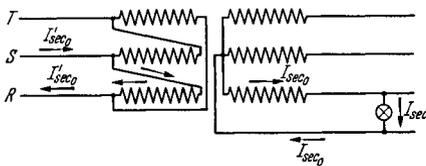


Abb. 32. Einphasige Belastung eines Δ/λ -Transformators. Summe der Stromwindungen je Schenkel gleich Null. Zulässiger Strom gleich Nennstrom.

Einphasentransformatoren haben die Klemmenbezeichnung UV und uv , wobei der Wickelsinn von gleichbezeichneten Klemmen aus gesehen derselbe ist.

Parallelarbeit. Parallel arbeitende Transformatoren müssen gleiches Leerlaufübersetzungsverhältnis und gleiche Kurzschlußspannung haben sowie der gleichen Schaltgruppe angehören.

Nur bei Leerlauf keine Ausgleichsströme auf und verteilen sich bei Last die Ströme der Größe nach prozentual richtig auf beide Einheiten. Damit auch die Phasenlage beider Ströme die gleiche wird, muß als weitere Bedingung die eines gleichen Kurzschlußwinkels erfüllt sein, d. h. sowohl Streuspannung als auch relative Ohmsche

Spannung müssen miteinander übereinstimmen. In der Praxis zeigt sich, daß Transformatoren mit einer prozentualen Abweichung der Übersetzung bis $\frac{1}{20}$ des Prozentsatzes der Kurzschlußspannung noch befriedigend parallellaufen können. Es darf also bei einem Transformator mit 10% Kurzschlußspannung die Übersetzung um 0,5% von der eines parallellaufenden abweichen. Für die Kurzschlußspannung beträgt die zulässige Abweichung 10% ihres Wertes.

Der Parallellauf von Transformatoren mit einem größeren Unterschied in der Leistung als etwa 1:3 wird vermieden. Zur Vermeidung der Überlastung des kleineren Transformators soll dessen Kurzschlußspannung die größere sein. Abweichende Kurzschlußspannungen können durch Drosselspulen dem Betrag nach gleichgemacht werden. Die Prüfung auf Richtigkeit der Schaltung, also der gleichen Phasenlage der sekundären Spannungen beim Zuschalten eines zweiten Transformators, erfolgt nach Abb. 33. Der zweite Transformator wird einpolig mit den Sekundärschienen verbunden. Dann darf ein an die beiden offenen Trennstellen gelegter Spannungsmesser keine Spannung anzeigen. Wenn dies zutrifft, kann unbedenklich zugeschaltet werden.

Das Transformatordiagramm.

Die Spannungen und Ströme der Primär- und Sekundärwicklung des Transformators werden im sog. Transformatordiagramm dargestellt. Dies wird nur für eine Phase gezeichnet, da die Darstellung für die übrigen Stränge nur eine Wiederholung aller um denselben Winkel geschwenkten Größen bedeuten würde. Es empfiehlt sich, die Sekundärspannung und den Sekundärstrom so zu zeichnen, wie es allgemein für einen Stromverbraucher üblich ist. Auch die Primärgrößen werden am besten in der gleichen Weise dargestellt, wobei man sich vorstellen kann, daß ja die Primärseite für das speisende Netz ebenfalls ein Verbraucher ist. Diese Darstellung hat den Vorzug, daß die beiden Spannungen und die beiden Ströme im Diagramm nicht etwa um nahezu 180° gegeneinander verdreht erscheinen, sondern daß man in einfacher Weise sieht, wie die Sekundärspannung aus der Primärspannung nach Abzug der Ohmschen und der induktiven Abfälle hervorgeht, und wie sich der Primärstrom als Summe von Leerlaufstrom und umgerechneten Sekundärstrom ergibt. Außerdem erkennt man, daß der ideale Transformator ohne Magnetisierungsstrom und ohne Spannungsabfälle so wirkt, als ob er gar nicht vorhanden wäre. U_1 und U_2 sowie I_1 und I_2 fallen zusammen. Darstellungen, in welchen U_2 um fast 180° gegen U_1 verdreht erscheint, sind zu verwerfen, da sie den irreführenden Eindruck erwecken, als ob die sekundäre Klemmenspannung auch bei gleichsinniger Wicklung wirklich um diesen großen Winkel gegen U_1 verdreht würde.

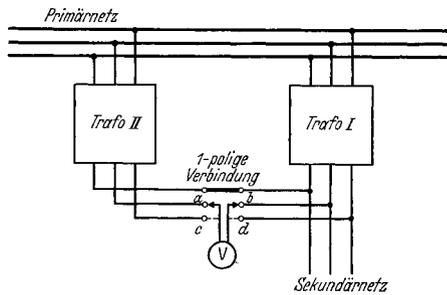
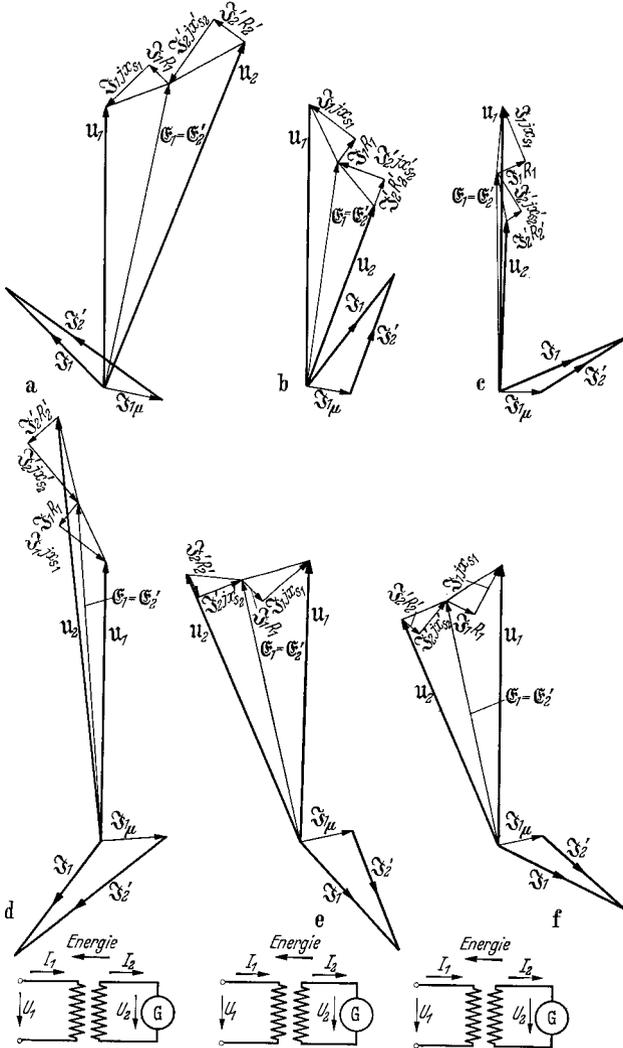
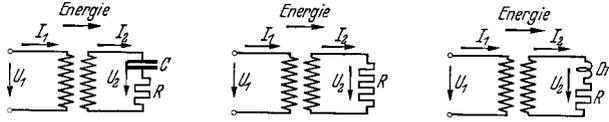


Abb. 33. Kontrolle der richtigen Schaltung vor dem sekundärseitigen Zuschalten des Trafos II. Nach einpoliger Verbindung Spannung zwischen $a b$ und zwischen $c d$ messen. Wenn diese gleich Null ist, kann dreipolig zugeschaltet werden.

$\cos \varphi_2 = 0,30$ vor
Belastung auf kapazitiven
Verbraucher (z. B. überer-
regter Synchronmotor)

$\cos \varphi_2 = 1,0$
Belastung auf rein
Ohmschen Verbraucher
(z. B. Lampen)

$\cos \varphi_2 = 0,56$ nach
Belastung auf indukti-
ven Verbraucher (z. B.
Asynchronmotor)



$\cos \varphi_2 = 0,53$ über
„Belastung“ auf über-
erregten Generator

$\cos \varphi_2 = 1,0$
„Belastung“ auf
Generator

$\cos \varphi_2 = 0,9$ unter
„Belastung“ auf unter-
erregten Generator

Abb. 34. Transformatoridiagramme; a, b, c für Energieabgabe auf der Sekundärseite; d, e, f, für Energierücklieferung. (Die Diagramme sind als Verbraucherdiagramme gezeichnet. Die Ohmschen Abfälle $\mathfrak{Z}_1 R_1$ und $\mathfrak{Z}_2 R_2$ liegen in Phase mit den Strömen, die induktiven Abfälle $\mathfrak{Z}_1 \cdot jx_{s1}$ und $\mathfrak{Z}_2 \cdot jx_{s2}$ eilen ihnen um 90° vor. Die dargestellten Gleichungen lauten: $U_1 - \mathfrak{Z}_1 R_1 - \mathfrak{Z}_1 \cdot jx_{s1} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}'_2$. $\mathcal{E}'_2 - \mathfrak{Z}_2 R_2 - \mathfrak{Z}_2 \cdot jx_{s2} = U_2$; $\mathfrak{Z}_1 = \mathfrak{Z}_{1\mu} + \mathfrak{Z}'_2$.)

In Abb. 34 sind die Diagramme für alle möglichen Belastungsfälle einschließlich der Leistungsrücklieferung gezeichnet und zwar unter getrennter Berücksichtigung der einzelnen Widerstände auf der Primär- und der Sekundärseite. In der Abb. 35 ist die vereinfachte, aber in der Praxis ausreichende Darstellung nach KAPP gegeben, welche nur mit

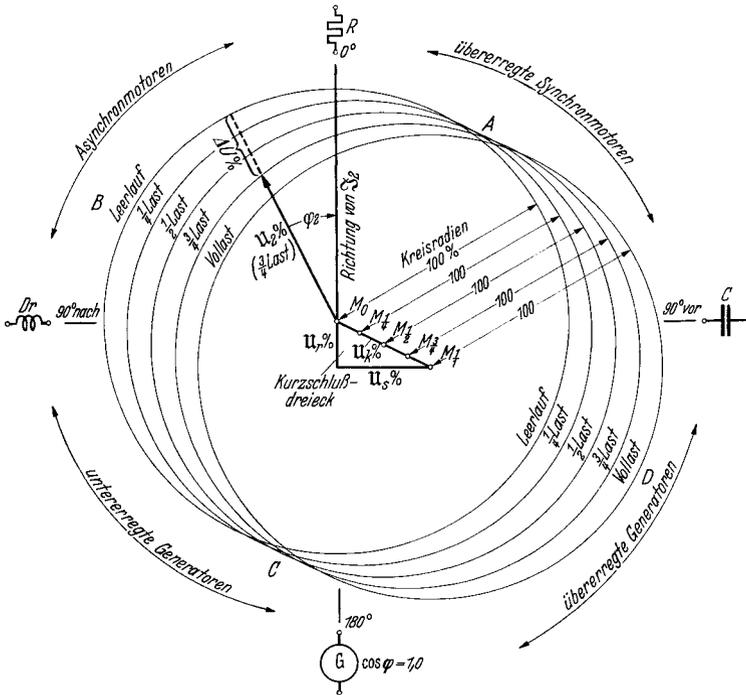


Abb. 35. KAPPSches Diagramm. (Eingezeichnete Spannungsvektor u_2 gilt für Belastung auf induktiven Verbraucher mit $\frac{1}{2}$ des Nennstromes und einem Leistungsfaktor von 0,89; ΔU beträgt 30%. Im Bereich ABC tritt Spannungsabsenkung, im Bereich CD A Spannungserhöhung auf. Übertrieben große Kurzschlußspannung!)

einem Gesamtspannungsabfall rechnet. Als solcher wird die Nennkurzschlußspannung gewählt, sofern das Diagramm, wie üblich, für Nennstrom = 100% und für Nennspannung = 100% gezeichnet wird.

Die Sekundärgrößen $\mathfrak{S}'_2, U'_2, jX'_{s2}$ und R'_2 in den Diagrammen entsprechen den auf Primärseite umgerechneten Strömen, Spannungen und Widerständen. Es gilt dabei:

$$\begin{aligned}
 U_2 &= U'_2 \cdot \ddot{u} & \text{und} & & U_2 &= \frac{U'_2}{\ddot{u}} & \text{mit} & & \ddot{u} &= \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{w_1}{w_2} \\
 \mathfrak{S}'_2 &= \frac{\mathfrak{S}_2}{\ddot{u}} & & & \mathfrak{S}_2 &= \mathfrak{S}'_2 \cdot \ddot{u} \\
 R'_2 &= R_2 \cdot \ddot{u}^2 & & & R_2 &= \frac{R'_2}{\ddot{u}^2} \\
 jX'_{s2} &= jX_{s2} \cdot \ddot{u}^2 & & & jX_{s2} &= \frac{jX'_{s2}}{\ddot{u}^2} .
 \end{aligned}$$

Die Spannungsänderung. Die Spannungsänderung, also der bei Last auftretende und auf die Leerlaufspannung U_{20} bezogene Spannungsabfall wird rechnerisch nach der Formel ermittelt:

$$\begin{aligned} u_{\varphi} &= u'_{\varphi} + 1 - \sqrt{1 - u''_{\varphi}{}^2} \quad (\text{genau}) \\ &= u'_{\varphi} + 0,5 u''_{\varphi}{}^2 \quad (\text{sehr angenähert}). \end{aligned}$$

Hierbei bedeuten:

$$u'_{\varphi} = u_r \cos \varphi + u_s \sin \varphi \quad \text{und} \quad u''_{\varphi} = u_r \sin \varphi - u_s \cos \varphi.$$

Die Werte der relativen Ohmschen Spannung u_r und der Streuspannung u_s sind als die Anteile $u_k \cos \varphi_k$ und $u_k \sin \varphi_k$ der Nennkurzschlußspannung u_k aus dem Ergebnis des Kurzschlußversuches bekannt.

Beträgt z. B. die Nennkurzschlußspannung 10%, die relative Ohmsche Spannung 8% und die Streuspannung also 6%, so ist bei einem $\cos \varphi$ von 0,8

$$\begin{aligned} u'_{\varphi} &= 0,08 \cdot 0,8 + 0,06 \cdot 0,6 = 0,100 \\ u''_{\varphi} &= 0,08 \cdot 0,6 - 0,06 \cdot 0,8 = 0,00 \\ u_{\varphi} &= 0,10 + 0,5 \cdot 0,00^2 = 0,10 = 10\%. \end{aligned}$$

Die Berechnung des Wirkungsgrades. Im Transformator treten bei Last nur zwei Gruppen von Verlusten auf, die Leerlaufverluste und die Wicklungsverluste; sie werden im Leerlauf- und im Kurzschlußversuch gemessen. Die Gesamtverluste betragen also:

$$V_{\text{gesamt}} = V_0 + V_{\text{kz}} \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \quad \begin{array}{l} V_0 = \text{Leerlaufverlust bei Nennspannung,} \\ V_{\text{kz}} = \text{Kurzschlußverlust bei Nennstrom,} \\ I = \text{Laststrom, } I_n = \text{Nennstrom.} \end{array}$$

Der Wirkungsgrad errechnet sich aus dem Verhältnis der Wirklastabgabe zur Wirklastaufnahme zu:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{Leistungsabgabe in kW}}{\text{Leistungsabgabe in kW} + \text{Verluste in kW}} \\ &= \frac{(\text{Scheinleistung in kVA}) \cdot \cos \varphi}{(\text{Scheinleistung in kVA}) \cdot \cos \varphi + \text{Verluste in kW}} \end{aligned}$$

Der Wirkungsgrad ist stark vom Leistungsfaktor abhängig, da die Verluste nur vom Strom, die Leistungsabgabe dagegen vom Produkt Strom \cdot Leistungsfaktor abhängt. Bei gleichem kVA-Betrag, aber anderen Werten des Leistungsfaktors, erscheinen daher die Gesamtverluste im Verhältnis $1/\cos \varphi$ erhöht.

Die Aufteilung der Verluste bei Auslegung des Transformators wird entsprechend seinem späteren Verwendungszweck vorgenommen. Transformatoren für die Landwirtschaft, welche nur kurze Zeit im Jahre vollbelastet werden, erhalten möglichst geringe Leerlaufverluste, solche für die Industrie dagegen geringere Lastverluste. Auf diese Weise werden die besten Jahreswirkungsgrade erzielt.

Die Prüfung des unbewickelten Kernes. Der Eisenkern des Transformators wird bereits ohne Wicklung zur Probe gegeben. Er wird mit einer provisorischen Wicklung im Prüffeld versehen und mit einer

Spannung zwischen 1000 und 1500 V auf vollen Fluß erregt. Dies wird erreicht, indem man je Probewicklung genau die gleiche Spannung zuführt, wie sie beim fertigen Wandler vorhanden sein wird. Natürlich muß mit gleicher Frequenz gefahren werden. Die Windungsspannung steht mit Frequenz und Fluß in dem Zusammenhang:

$$U_{\text{windung}} = 2,22 \cdot \frac{f}{50} \cdot \Phi' = \frac{U_{\text{nennphase}}}{w_{\text{phase}}},$$

wobei $2,22 = \frac{\pi}{\sqrt{2}}$, $\Phi' = \text{Flu\ss in } 10^6 \text{ Maxwell,}$

$f = \text{Frequenz in Hz}$ und $w_{\text{phase}} = \text{Windungszahl je Phase ist.}$

Die Kernprüfung dient erstens der Feststellung etwaiger Fehler im Aufbau oder in der Ausführung, die sich in Brummen, Vibrieren oder starker örtlicher Erwärmung äußern können. Zweitens werden schon jetzt die aufgenommenen *Leerlaufverluste* N_0 , der Magnetisierungsstrom I_0 in allen drei Phasen und die zugeführte Spannung U_0 , die natürlich nicht mit einer der wirklichen Nennspannungen übereinzustimmen braucht, gemessen. Die Leerlaufverluste bestehen im wesentlichen aus Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverlusten, also aus den sog. Eppsteinverlusten in den Blechen des Eisenkörpers. Nur etwa 5 bis 10 % kommen noch als sog. zusätzliche Eisenverluste infolge der Bearbeitung der Bleche hinzu. Die Leerlaufkupferverluste, die der Magnetisierungsstrom verursacht, sind stets verschwindend klein. Die verwendete Schaltung der Meßgeräte nimmt Rücksicht auf

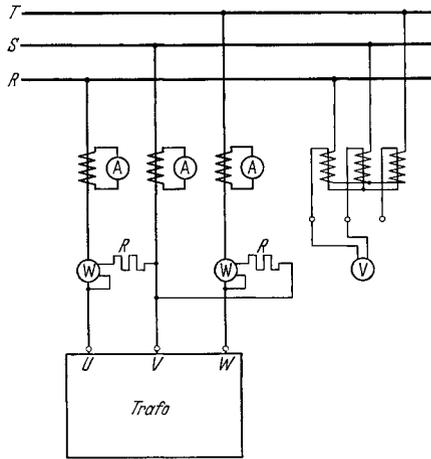


Abb. 36. Schaltung der Meßgeräte beim Leerlauf- und beim Kurzschlußversuch. Die Spannungs- und Strommesser liegen über Wandler, die Leistungsmesser zur Vermeidung von Korrekturen direkt am Netz. Die Verluste in den Vorwiderständen sind abzusetzen.

den sehr kleinen Leistungsfaktor $\cos \varphi_0$, der etwa zwischen 0,05 und 0,08 liegt. Die beiden Leistungsmesser sind nach Abb. 36 geschaltet. Der Strompfad ist unmittelbar in die Netzleitungen gelegt, und die Spannungsspulen liegen über Vorwiderständen an der vollen Spannung. Strom- und Spannungswandler werden zur Vermeidung von Meßfehlern oder von langwierigen Korrekturen gänzlich vermieden. Die Ströme dürfen bei dieser Anordnung bis 400 A groß werden, und Vorschaltwiderstände werden bis zu 10000 V verwendet. Der Strom und die Spannung werden jedoch über Wandler gemessen. Die Verluste in den Vorwiderständen der Leistungsmesser sind zu berücksichtigen.

Bei großen Transformatoren, die mit Oberwellenkompensationswicklungen versehen sind, werden auch diese provisorisch aufgebracht und ihre Wirkung durch oszillographische Aufnahme des

Magnetisierungsstromes geprüft. Wenn die Annäherung dieser Stromkurve an die gewünschte Sinusform unter 0,5% Abweichung zu liegen kommt, genügt die graphische Untersuchung des Oszillogrammes nicht mehr. Oberwellenmeßgeräte mit hoher Empfindlichkeit zeigen noch geringere Abweichungen an. Als störende Oberwellen kommen vor allem die dritte, fünfte und siebente Harmonische in Betracht.

Die Prüfung wird beendet durch einen Versuch mit um 10% erhöhtem Kraftfluß, der 15 min lang dauert. Wenn sich auch jetzt keine Anstände ergeben, wird der Eisenkörper als fehlerfrei betrachtet und zum Aufbringen der Wicklungen zurückgeschickt.

Die Prüfung des gewickelten Transformators ohne Öl und ohne Kessel. Transformatoren mit *parallelen Wicklungszweigen* werden vor Fertigstellung der Schaltung wieder angeliefert. Eine der — nicht parallele Zweige enthaltenden — Wicklungen wird erregt, und zwar am besten so, daß genau 1 V Spannung je Windung auftritt. Dann kann die Windungszahl in jeder anderen Wicklung leicht durch Spannungsmessung kontrolliert werden, da genau soviel Windungen vorhanden sein müssen, wie der angelegte Spannungsmesser in Volt anzeigt. Alle Gruppen, insbesondere auch die Anzapfungen, werden durchgemessen. Wenn an den parallel zu schaltenden Zweigen gleiche Spannung herrscht, wird ausgeschaltet und die Enden werden miteinander verbunden. Mit einem Spannungsmesser für sehr kleinen Meßbereich (Gleichrichtergerät für 1,0 bis 1,5 V) mißt man nun die etwa doch vorhandenen Differenzspannungen an den noch freien Enden. Wenn keine Spannungen zu messen sind, liegen auch keine Fehler der Windungszahl vor. Die Parallelschaltung kann also vorgenommen werden. In besonderen Fällen verschafft man sich vorher noch besondere Sicherheit, indem man die Parallelschaltung erst mit dünnen Drähten herstellt. Diese schmelzen dann bei erregtem Transformator durch, sofern innerhalb der Parallelschaltung doch Ausgleichsströme auftreten. Nunmehr wird die Schaltung der Zweige und der ganzen Wicklung fertiggestellt und auch die Klemmen werden genau bezeichnet.

Die nächste Prüfung besteht in der Bestimmung der *Übersetzung*. Es gilt zur Vermeidung von Unfällen die Regel, nur die Oberspannungsseite zu speisen, wobei eine Spannung von 1000 bis 1500 V gewählt wird. Die Spannung der freien Klemmen kann dann keinesfalls höhere Werte als diesen Betrag annehmen. Bei den üblichen Nennspannungen der Oberspannungsseite von 3000 V ab aufwärts wird der Transformator also höchstens mit 50% seiner Nennspannung erregt. Wandler für 200000 V führen bei diesem Versuch sogar nur 0,5% der Nennspannung. Der Magnetisierungsstrom kann völlig vernachlässigt werden, und das Verhältnis der auf Ober- und Unterspannungsseite gemessenen Spannungen stimmt genau unter Berücksichtigung der Schaltung mit dem Verhältnis der Windungszahlen überein. Zur genauesten Ermittlung des Übersetzungsverhältnisses verwendet man einen Hilfstransformator, der primär z. B. insgesamt 1000 und sekundär 100 Windungen besitzt. Entsprechende Unterteilungen erlauben die Wahl jeder von 1 zu 1 veränderlichen Windungszahl auf beiden Seiten. Der Hilfstransformator

wird nach Abb. 37 in Gegenschaltung zum Probetransformator gelegt und seine Übersetzung gleich der Übersetzung des letzteren gemacht. Ein 1,0 V-Spannungsmesser zeigt die Übereinstimmung der Übersetzungen an, wenn er keine Differenzspannungen auf der Sekundärseite mißt. Auch bei diesem Versuch macht man am besten die Windungszahl gleich 1 V, da man dann gleich die Windungszahlen messen kann. Aus dem etwaigen Ausschlag des Differenzspannungsmessers kann ohne weiteres auf eine Abweichung der Übersetzung geschlossen werden.

Bei direkter Messung der Spannungen zur Bestimmung der Übersetzung verzichtet man am besten auf Spannungswandler und benutzt nur Vorwiderstände.

Anschließend wird die Richtigkeit der *Schaltung* geprüft, indem man die Erfüllung der Bedingungen der vorgeschriebenen Schaltgruppe kontrolliert. Die Abb. 38a—h dienen der Erläuterung der nachstehenden Versuche, die mit dem Spannungsmesser an dem über UVW erregten Wandler stattfinden.

Schaltgruppe A. Die Klemmen U und u werden miteinander verbunden und die Spannungen $v - W$ und $w - W$ gemessen. Beide müssen gleich $U_{pr} - U_{sec}$ sein (Abb. 38c).

Schaltgruppe B. Wiederum sind die Klemmen U und u zu verbinden. Die Spannungen $v - V$ und $w - W$ müssen gleich $U_{pr} + U_{sec}$ sein (Abb. 38d).

Schaltgruppe C mit zugänglichem Sternpunkt auf der Sekundärseite. Die primäre Klemme U wird mit dem sekundären Sternpunkt verbunden. Es genügen auch hier zwei Spannungsmessungen zwischen $u - V$, die gleich $U_{pr} - \frac{U_{sec}}{\sqrt{3}}$ sein muß, und zwischen $w - W$, die gleich $U_{pr} + \frac{U_{sec}}{\sqrt{3}}$ ist (Abb. 38e).

Schaltgruppe C ohne zugänglichem Sternpunkt auf der Sekundärseite. In diesem Falle ist U mit u zu verbinden. Es müssen vier Spannungsmessungen durchgeführt werden, und zwar zwischen $V - v$, $V - w$, $W - v$ und $W - w$. Mit Hilfe dieser Messungen wird mit dem Zirkel die Lage der Punkte v und w bestimmt, die, wie in Abb. 38f gezeigt, liegen müssen.

Schaltgruppe D mit zugänglichem sekundärem Sternpunkt. Der Sternpunkt wird mit U verbunden. Zwei Spannungsmessungen müssen ergeben, daß Spannung $W - w$ gleich $U_{pr} - \frac{U_{sec}}{\sqrt{3}}$ und Spannung $V - u$ gleich $U_{pr} + \frac{U_{sec}}{\sqrt{3}}$ ist (Abb. 38g).

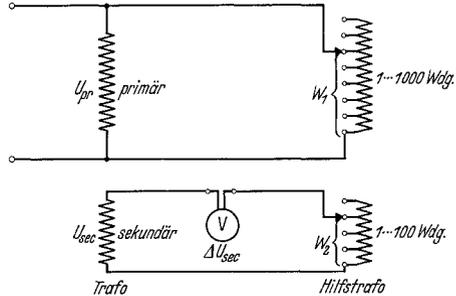
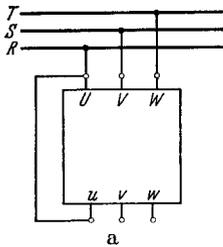


Abb. 37. Messung der Übersetzung mittels Hilfsrafo, dessen Windungszahlen von 1 zu 1 gewählt werden können.

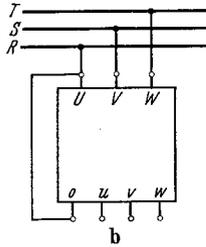
$$\dot{u} = \frac{U_{pr}}{U_{sec}} = \frac{w_1}{w_2}, \text{ wenn Spannungsmesser die Differenzspannung } \Delta U_{sec} = 0 \text{ anzeigt.}$$

Schaltgruppe *D* ohne sekundären, zugänglichen Nullpunkt. *U* wird mit *u* verbunden. Auf Grund der Messungen der Spannungen $V - v$, $V - w$, $W - v$, $W - w$ wird mit dem Zirkel die Lage der Punkte *v* und *w* bestimmt, die nach Abb. 38h liegen müssen.

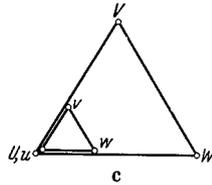
Wenn das Übersetzungsverhältnis des Transformators über 25:1 liegt, wird die Spannungsausmessung unsicher, da $U_{pr} + U_{sec}$ kleiner als $1,04 \cdot U_{pr}$ und $U_{pr} - U_{sec}$ größer als $0,96 \cdot U_{pr}$ ist. Beide Werte



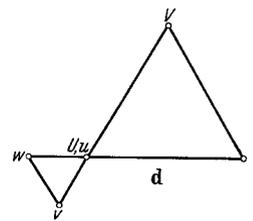
Schaltung I bei Gruppe: A und B, sowie C und D, wenn bei diesen beiden der sekundäre Nullpunkt nicht zugänglich ist.



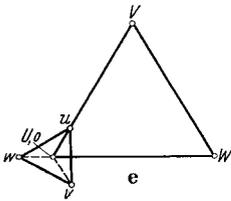
Schaltung II bei Gruppe: C und D bei zugänglichem sekundärem Nullpunkt.



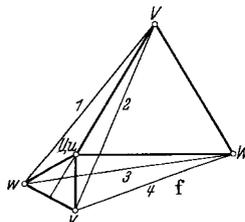
Gruppe A. 2 Spannungsmessungen:
 $v - V = U_{pr} - U_{sec}$
 $w - W = U_{pr} - U_{sec}$
 Schaltung I.



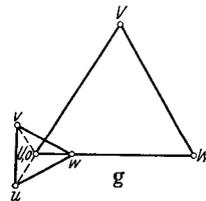
Gruppe B. 2 Spannungsmessungen:
 $v - V = U_{pr} + U_{sec}$
 $w - W = U_{pr} + U_{sec}$
 Schaltung I.



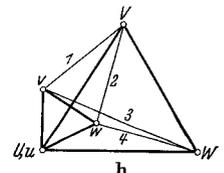
Gruppe C. 2 Spannungsmessungen:
 $u - V = U_{pr} - \frac{U_{sec}}{\sqrt{3}}$
 $w - W = U_{pr} + \frac{U_{sec}}{\sqrt{3}}$
 Schaltung II.



Gruppe C. 4 Spannungsmessungen zwischen *V*, *W* und *v*, *w*
 Schaltung I



Gruppe D. 2 Spannungsmessungen:
 $u - V = U_{pr} + \frac{U_{sec}}{\sqrt{3}}$
 $w - W = U_{pr} - \frac{U_{sec}}{\sqrt{3}}$
 Schaltung II.



Gruppe D. 4 Spannungsmessungen zwischen *V*, *W* und *v*, *w*.
 Schaltung I.

Abb. 38a—h. Kontrolle der Schaltgruppe A, B, C, D durch Spannungsausmessung. Aufzeichnung der Ergebnisse ist nur nötig bei Gruppe C und D ohne zugänglichen Sekundär-Nullpunkt, entspr. f und h. U_{pr} und U_{sec} sind die verketteten Spannungen.

haben also fast die gleiche Größe. In diesen Fällen hilft man sich in einfacher Weise, indem man die Sekundärspannung durch einen Stern-Stern geschalteten Hilfstransformator auf höhere Werte unter Beibehaltung der Phasenlage umspannt. Die offene Seite des Hilfstransformators wird nun als Sekundärseite des Probetransformators behandelt, also ihre Klemme *u* bzw. ihr Sternpunkt *o* mit der Klemme *U* des Probetransformators verbunden.

Wenn die Übersetzung und die Schaltgruppe sich bei diesen Untersuchungen als richtig erwiesen haben, kann eindeutig auf richtige Schaltung des Transformators geschlossen werden.

Nunmehr wird der *Kurzschlußversuch* vorgenommen. Die Schaltung entspricht der beim Leerlaufversuch benutzten, jedoch werden die unterspannungsseitigen Klemmen möglichst widerstandslos kurzgeschlossen. Normale Meßwandler im Kurzschlußkreis können das Ergebnis unter Umständen empfindlich stören und werden daher nicht eingeschaltet. Will man jedoch den sekundären Kurzschlußstrom auch messen, so kann man unbedenklich einen Dietzeanleger benutzen, der nur einen sehr kleinen zusätzlichen Wirk- und Streublindwiderstand besitzt. Die Speisung erfolgt deshalb von der Hochspannungsseite aus, weil es im Prüffeld leichter möglich ist, den kleineren Kurzschlußstrom dieser Seite bei entsprechend höherer Kurzschlußspannung zur Verfügung zu stellen. Die Schaltung ist in Abb. 39 wiedergegeben. Die zugeführte Spannung wird schnell so weit hochgeregelt, bis der Transformator einen Kurzschlußstrom von $\frac{1}{2}$ oder $\frac{1}{1} I_{\text{nenn}}$ aufnimmt. Die Ablesung muß innerhalb von etwa 2 min nach Beginn des Versuches beendet sein, damit unzulässige Temperaturzunahmen vermieden werden. Diese können auftreten, da die kühlende Wirkung des Öles noch fehlt. Gemessen werden die Spannung U_k , der Strom I_k und die Leistung N_k . Bei Transformatoren mit besonderer Tertiärwicklung mißt man, wenn deren Dreieckschaltung an einer Stelle geöffnet werden kann, die dort auftretende Spannung dreifacher Frequenz, die von den Flüssen dreifacher Periodenzahl induziert wird.

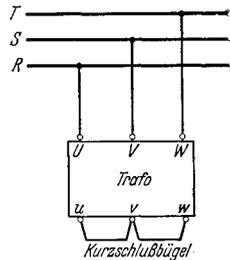


Abb. 39. Schaltung bei Kurzschluß. Geräte wie in Abb. 36.

Aus den Versuchsergebnissen errechnet man die

Nennkurzschlußspannung u_k in %

$$= \frac{\text{(Kurzschlußspannung, bei der Nennstrom fließt)} \cdot 100}{\text{Nennprimärspannung}}$$
 und
 relative Ohmsche Spannung $u_r\%$ = $u_k \cdot \cos \varphi_k$,
 Streuspannung $u_s\%$ = $u_k \cdot \sin \varphi_k$.

Die Lastverluste ergeben sich aus den bei Nennstrom gemessenen Kurzschlußverlusten nach Abzug etwaiger merklicher Verluste im äußeren Kurzschlußbügel. Wenn die Verluste bei anderer Stromstärke bestimmt wurden, sind sie quadratisch auf Nennstrom umzurechnen. Sie setzen sich zusammen aus den reinen Ohmschen Verlusten in beiden Wicklungen und den zusätzlich auftretenden Wirbelstromverlusten im Kupfer und in den der Wicklung benachbarten Konstruktionsteilen. Wenn die Temperatur der Wicklung nicht 75° betragen hat, so sind die Ohmschen Verluste auf diese Temperatur umzurechnen, indem man sie im Verhältnis $(235 + 75) : (235 + \text{Versuchstemperatur})$ erhöht. Die Zusatzverluste sind meist so geringfügig, daß man auf ihre Umrechnung verzichten kann. Will man es doch tun, so muß es im umgekehrten Verhältnis geschehen, da die Wirbelstromverluste mit steigender Temperatur fallen. Bei Aluminiumwicklungen ist statt 235 der Wert 245 einzusetzen. Die Verluste im äußeren Kurzschlußbügel machen sich

nur bei kleinen Sekundärspannungen, jedoch hohen Sekundärströmen, also z. B. bei Ofentransformatoren bemerkbar. Man bestimmt sie zu:

wobei
$$V_{\text{kzBügel}} = 2,5 \cdot G \cdot j^2 \text{ in W,}$$

$$G = \text{Gewicht des Bügels in kg,}$$

$$j = \text{Stromdichte im Bügel in A/mm}^2 \text{ ist.}$$

Die Kurzschlußströme ändern sich in weiten Grenzen linear mit der Spannung. Auch bei Kurzschlüssen mit voller Spannung ergeben sich Stromstärken, welche aus dem Ergebnis des Kurzschlußversuches umgerechnet werden können. Der Kurzschlußstrom bei Nennspannung als Vielfaches des Nennstromes ergibt sich zu $100/u_k\%$. Er darf den 30fachen Wert nicht überschreiten, da hierbei bereits der bei Stoßkurzschluß auftretende augenblickliche Höchstwert in einer Phase den $30 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,8 = 75$ fachen Wert von I_{nenn} erreichen kann. Höheren Strömen ist die Wicklung nicht mehr gewachsen. Die Nennkurzschlußspannung der Transformatoren darf daher den Wert 3,3% nicht unterschreiten. Anderenfalls ist durch Strombegrenzungsdröseln für ihre Erhöhung Sorge zu tragen.

Für die Zeichnung des Diagrammes benötigt man noch folgende Werte, die aus den Meßwerten des Versuches gewonnen werden:

Bei Einphasentransformatoren

$$\text{Kurzschlußimpedanz } Z_k = \frac{\text{Kurzschlußspannung}}{\text{Kurzschlußstrom}} = \frac{U_k}{I_k} \text{ in } \Omega,$$

$$\text{Kurzschlußwiderstand } R_k = \frac{\text{Kurzschlußleistung}}{(\text{Kurzschlußstrom})^2} = \frac{N_k}{I_k^2} \text{ in } \Omega,$$

$$\text{Kurzschlußreaktanz } X_k = \frac{1}{I_k} \sqrt{U_k^2 - (N_k/I_k)^2} \text{ in } \Omega,$$

und entsprechend:

Bei Dreiphasentransformatoren in Stern auf der Oberspannungsseite

$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot I_k}, \quad R_k = \frac{N_k}{3 \cdot I_k^2}, \quad X_k = \frac{1}{I_k} \cdot \sqrt{\frac{U_k^2}{3} - \left(\frac{N_k}{3 I_k}\right)^2}.$$

Bei in Dreieck geschalteten Oberspannungswicklungen ist das Dreifache dieser Werte, auf die Phase bezogen, einzusetzen. Unter Z_k , R_k und X_k sind die auf einen Strang der Oberspannungsseite bezogenen Summenwerte aus Primär- und Sekundärimpedanz bzw. Widerstand und Streuwiderstand zu verstehen. Will man eine Aufteilung auf beide Seiten vornehmen, so kann man unbedenklich je den halben Wert einsetzen. Die Widerstände, Reaktanzen und Impedanzen für die beim Kurzschlußversuch kurzgeschlossen gewesene Unterspannungsseite sind natürlich mit $1/u^2$ malzunehmen. Zwischen den Werten bestehen noch folgende Zusammenhänge:

$$R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k, \quad X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k$$

mit $\cos \varphi_k = \text{Kurzschlußleistungsfaktor}$ und $\sin \varphi_k = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_k}$.

Die Bestimmung der *Nullreaktanz* erfolgt bei den Transformatoren, die mit Erdschlußkompensation durch Petersenspule arbeiten sollen, in einem weiteren Kurzschlußversuch nach Abb. 40. Die Nullreaktanz ist der Blindwiderstand, der sich einem einphasigen Strom entgegensetzt, der gleichzeitig über alle drei Schenkel fließt. Von entscheidendem Einfluß auf ihre Größe ist das Vorhandensein einer Arbeits- oder einer Tertiärwicklung in Dreieckschaltung. Sobald sich nämlich eine Dreieckwicklung auf den drei Schenkeln befindet, kann in deren Innern ein Gegenstrom fließen, der die Magnetisierungswirkung des Nullstromes gleicher Phasenlage in allen Phasen praktisch aufhebt. Da der Kessel von Einfluß auf die Ausbildung der sich außen herum schließenden Kraftlinien sein kann, ist der Versuch nach Einbau des Wandlers in denselben am besten zu wiederholen. Die Nullreaktanz aller drei parallel liegenden Phasen ergibt sich zu:

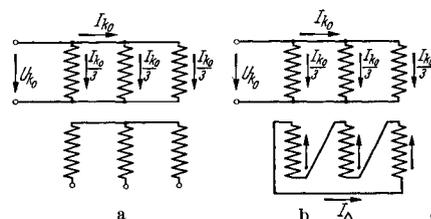
$$X_0 = \frac{U_{k_0}}{I_{k_0}} \cdot \sin \varphi_{k_0},$$

wobei U_{k_0} die zugeführte Spannung und I_{k_0} der zugeführte Strom ist. Die Nullreaktanz je Phase ist dreimal so groß. In den einzelnen Phasen fließt $I_{k_0}/3$. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi_{k_0}$ — und daraus $\sin \varphi_{k_0}$ — wird aus der Leistungsaufnahme berechnet. Die der Nullreaktanz entsprechende Streuspannung beträgt 25 bis 35% bei Wandlern ohne Dreieckwicklung und nur 2,5% bei solchen mit Dreieckwicklung, wenn im Nullpunkt der Nennstrom abgenommen wird.

Die Prüfung des fertigen Transformators mit ölgefülltem Kessel. Erst nach Fertigstellung des ganzen Wandlers ist es möglich, die *Proben der elektrischen Festigkeit* vorzunehmen. Diese Proben sind in den RET vorgeschrieben und bestehen aus der Wicklungsprobe, der Sprungwellenprobe und der Windungsprobe. Die Sprungwellenprüfung, die bei Maschinen aus den auf S. 6 angegebenen Gründen von vielen Herstellern nicht durchgeführt wird, hat bei Transformatoren einen ziemlich harmlosen Charakter. Tatsächliche Aufschlüsse liefern die beiden anderen Proben.

Die *Wicklungsprobe* wird mit der den RET zu entnehmenden Prüfspannung durchgeführt, indem man den einen Pol der Stromquelle an die zu prüfende Wicklung und den anderen an die übrigen unter sich und mit dem Körper verbundenen Wicklungen legt. Bis zu 150 kV mißt man die Prüfspannung auf der Oberspannungsseite des Hochspannungsprüftransformators mittels Spannungswandler. Noch höhere Werte bestimmt man dagegen mit der Funkenstrecke, wobei man allerdings zur Sicherheit auch noch die niederspannungsseitige Spannung mißt. Die Probe erfolgt mit sinusförmigem Strom von 50 Hz und dauert 1 min.

Die *Sprungwellenprobe* erfolgt in der in den RET angegebenen Weise.



a
Trafo ohne Δ -Wicklung, große Nullreaktanz.

b
Trafo mit Δ -Wicklung, kleine Nullreaktanz.

Abb. 40. Messung des Nullreaktanz.

Die *Windungsprobe* dient der Untersuchung ausreichender gegenseitiger Isolation der einzelnen Windungen. Sie wird nach den RET möglichst mit 2facher Nennspannung durchgeführt. In der Praxis untersucht man fast durchweg mit dieser Spannung. Der Transformator wird mit Strom von 150 Hz gespeist, hat also nur eine Kraftliniendichte im Eisen von 66,7% des normalen Wertes. Man wählt die Frequenz so hoch, um unliebsame Verluste im Eisen zu vermeiden. Während der 5 min, die die Probe dauert, regelt man bei Transformatoren mit unter Last regelbaren Stufen den ganzen Bereich durch und führt auf diese Weise gleichzeitig eine scharfe Prüfung aller Kontaktstellen durch.

Anschließend an diese Versuche bestimmt man den *Widerstand* der Wicklungen, wobei man je nach Größe desselben wie bei den Maschinen die Wheatstone- oder die Thomsonbrücke benutzt. Bei besonders kleinen Wicklungswiderständen führt man die Messung auch mit Strom und Spannung durch (S. 332).

Der *Leerlaufversuch* wird wiederholt. Bei Transformatoren bis etwa 10000 kVA bestimmt man nur den einen Punkt für Nennspannung, während man bei größeren Einheiten drei Meßpunkte bei 90, 100 und 110% der Nennspannung aufnimmt. Die Leistungsmesser werden wiederum ohne Verwendung von Wandlern benutzt. Ströme bis 400 A und Spannungen bis 10000 V können so den Geräten noch unmittelbar bzw. über Vorwiderstände zugeführt werden. Bei noch höheren Spannungen muß man die Leistung vor dem Prüffeldtransformator, der zur Erregung benutzt wird, messen und dessen Verluste absetzen. Diese werden ein für allemal unter den verschiedensten Verhältnissen bestimmt und in Verlustkurven übersichtlich dargestellt. Die Speisung des Probetransformators erfolgt fast ausschließlich über die Niederspannungsseite, da man anderenfalls ja die Zuleitungen alle für die hohen Oberspannungen von mitunter einigen hundert kV isolieren und vor allem auch einen geeigneten Prüffeldtransformator besitzen müßte. Ströme und Spannungen werden jedoch über Wandler am Probetransformator selbst gemessen.

Eine erneute Bestimmung der *Übersetzung* und der *Schaltgruppen* gibt die Gewißheit, daß sich beim Einbau des Wandlers in den Kessel nichts geändert hat.

Der *Kurzschlußversuch* wird ebenfalls wiederholt. Bei Transformatoren ohne Dreieckwicklung können sich nunmehr höhere Verluste ergeben, die auf zusätzliche Wirbelstromverluste im Kessel zurückzuführen sind. Wenn dagegen eine solche Wicklung vorgesehen ist, zeigt sich praktisch kein Unterschied gegen die frühere Messung. Tertiärwicklungen werden fast immer zu zwei Klemmen über Deckel geführt, die betriebsmäßig verbunden sind und das Dreieck schließen. In diesen Fällen macht man zwei Aufnahmen mit geöffnetem und geschlossenem Dreieck, wobei also im ersten Fall die erhöhten Verluste zu erwarten sind. Die Versuchsdauer kann ausgedehnt werden, da das Öl für gute Kühlung der Wicklung sorgt. Man führt den Versuch bei Nennstrom durch und wiederholt ihn bei Regeltransformatoren für die höchste und tiefste Stellung.

Der Erwärmungslauf. Im Erwärmungslauf wird die Übertemperatur bestimmt, die die Wicklungen und das Öl gegenüber dem eintretenden Kühlmittel annehmen. Nur bei Wandlern für kurzzeitigen Betrieb bestimmt man statt dessen die Erwärmung gegenüber dem kalten Ausgangszustand. Die großen Leistungen können bei der Dauerprobe nur sehr selten zur Verfügung gestellt werden, und es sind daher eine Reihe von Kunstschaltungen angegeben worden, bei denen dem Prüffeldnetz nur eine Leistung von der Höhe der einfachen oder doppelten Verluste entnommen wird. In der Praxis beschränkt man sich oft auf zwei dieser Verfahren, und zwar bevorzugt man bei Transformatoren unter 1000 kVA das Rückarbeitsverfahren und bei größeren Typen das Kurzschlußverfahren.

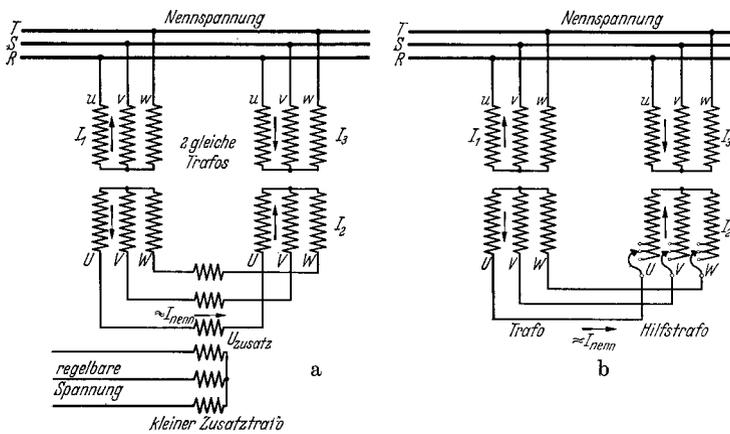


Abb. 41. Rückarbeitschaltung beim Erwärmungslauf. Die beiden Trafos liegen primär an der vollen Spannung. Sekundär sind sie über Zusatztrafo (a) oder unmittelbar parallel geschaltet (b). Im ersten Fall treibt die Zusatzspannung, im zweiten Fall die Spannungsdifferenz der Sekundärspannungen den Laststrom durch die Leitungen.

Zum *Rückarbeitsverfahren* werden zwei gleiche Transformatoren benötigt, von denen der eine natürlich ein Prüffeldwandler sein kann. Meistens stehen allerdings mehrere gleiche Transformatoren bei diesen Leistungen zur Verfügung. Abb. 41 zeigt die Schaltung. Die beiden Primärwicklungen liegen am Netz von Nennspannung und Nennfrequenz. Beide Wandler werden also mit vollem Kraftfluß gefahren und haben daher auch die richtigen Eisenverluste. Die Sekundärwicklungen sind über einen Hilfstransformator mit offener Schaltung parallelgeschaltet. Dieser Hilfstransformator wird von einem Prüffeldgenerator regelbarer Spannung gespeist, die so weit erhöht wird, bis die beiden Probetransformatoren sekundärseitig den Nennstrom führen. Die Primärströme weichen etwas voneinander ab, da sich der dem Hauptnetz entnommene Magnetisierungsstrom verschiedenartig dem Kurzschlußstrom überlagert. Man regelt so lange fein nach, bis in einem der beiden Transformatoren in beiden Wicklungen zusammen die Verluste auftreten, die dem Nennbetrieb entsprechen. Der Temperaturlauf

dauert einige Stunden und kann abgebrochen werden, wenn die Temperaturzunahme nicht mehr als 1° je Stunde beträgt. Gemessen wird wenigstens die Öltemperatur dicht unter dem Deckel. Bei Neuausführungen nimmt man aber auch die Temperatur des Eisenkernes und wenn möglich der Wicklungen mit Hilfe von eingebauten Thermoelementen auf. Auch werden hierbei noch weitere Thermometer zur Messung der Öltemperaturen in verschiedener Höhe angebracht, aus deren Ablesung man Rückschlüsse auf die Güte der Kühlvorrichtungen ziehen kann.

Bei dem *Kurzschlußlauf* benötigt man keinen zweiten Transformator. Man schließt den Transformator kurz und führt ihm eine solche Spannung zu, daß er den 1,5fachen Nennstrom aufnimmt. So fährt man 1 Stunde. In den nächsten 2 Stunden verringert man den Strom auf den 1,3fachen Betrag. Zu Beginn etwa der 4. Stunde verringert man den Strom noch einmal, und zwar so weit, daß die Wicklungsverluste gleich den normalen Gesamtverlusten einschließlich der Eisenverluste werden. Dies bedeutet also, daß sich die Ölerwärmung richtig einstellen wird, die Wicklung jedoch etwas überlastet wird. Sobald die Öltemperatur nicht mehr steigt, wird der Strom auf Nennstrom verringert und der Lauf noch etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 Stunde fortgesetzt. Nunmehr kann angenommen werden, daß auch die Wicklungserwärmung ihren richtigen Wert angenommen hat, die Ölerwärmung jedoch noch nicht nennenswert abgesunken ist. Jetzt wird abgeschaltet, die etwa vorhandene zusätzliche Luft- oder Wasserkühlung abgestellt und die Temperatur des Öles an der heißesten Stelle gemessen.

Die *Bestimmung der mittleren Wicklungstemperatur* erfolgt wie bei den Maschinen aus der prozentualen Widerstandszunahme der Primär- und der Sekundärwicklungen. Man benutzt folgende Formeln:

$$t_{ii} = \frac{R_{\text{warm}} - R_{\text{kalt}}}{R_{\text{kalt}}} \cdot (235 + t_{\text{kalt}}) - (t_{\text{kühlmittel}} - t_{\text{kalt}}), \quad \text{bei } DB,$$

$$\text{bzw.} \quad = \frac{R_{\text{warm}} - R_{\text{kalt}}}{R_{\text{kalt}}} \cdot (235 + t_{\text{kalt}})$$

bei *KB* und *DKB* unter 1 Stunde.

Hierbei bedeutet: R_{warm} und R_{kalt} den warmen und den kalten Wicklungswiderstand, t_{kalt} die Wicklungstemperatur bei der kalten Messung und $t_{\text{kühlmittel}}$ die Eintrittstemperatur des Kühlmittels.

Größere Transformatoren erhalten heute sehr häufig eine Vorrichtung, die es auf Grund einer *thermischen Abbildung* erlaubt, die mittlere Wicklungstemperatur dauernd im Betriebe zu überwachen. Unter dem Deckel befindet sich ein elektrisches Widerstandsthermometer (S. 340), welches von einer Heizwicklung umgeben ist. Diese besteht aus mehreren Windungen Drahtes, der eine der Hauptwicklung thermisch ähnliche Isolation besitzt. Gespeist wird die Heizwicklung über einen besonderen Stromwandler, der vom Strom des Transformators durchflossen wird. Die Heizwicklung ist reichlich bemessen, so daß ein Teil des Heizstromes zu einem regelbaren Parallelwiderstand geführt werden muß. Dieser erlaubt den Abgleich der Anordnung. Er wird so eingestellt,

daß das an das Widerstandsthermometer angeschlossene Meßgerät genau die jeweilige Übertemperatur der Wicklung anzeigt. Falls gewünscht, kann auch die höchste Übertemperatur der Wicklung über das Öl angezeigt werden. Die Anordnung ist herausnehmbar und wird in einem kleinen Ölbad, dessen Temperatur auf die Öltemperatur des Transformators gebracht werden kann, außerhalb desselben eingestellt. Die Öltemperatur des Transformators wird durch ein normales, eingebautes elektrisches Widerstandsthermometer ferngemessen.

Transformatoren in Sparschaltung. Diese Transformatoren dienen der meist nur geringfügigen Erhöhung oder Verringerung der Spannung des sekundären Netzes, welches an das primäre Netz angeschlossen ist. Beide Netze sind über die Windungen der Sekundärwicklung leitend miteinander verbunden. Diese Wicklung besitzt häufig Anzapfungen, die eine Spannungsregelung in einigen Stufen erlauben. Die Untersuchung dieser Transformatoren entspricht der der normalen Wandler. Nur der *Kurzschlußversuch* wird nicht in der betriebsmäßigen Schaltung vorgenommen, sondern nach Abb. 42 in einer Schaltung, die der Verwendung als gewöhnlicher Wandler entsprechen würde. Man speist also die dünndrähtige Primärwicklung und schließt die dickdrähtige Sekundärwicklung kurz. Wenn man mit $i_{k_{pr}}$ den auf Nennspannung U_{pr} umgerechneten Kurzschlußstrom¹ bezeichnet, so sind die in der betriebsmäßigen Schaltung auftretenden *Kurzschlußströme* mit den Bezeichnungen nach Abb. 43a folgende:

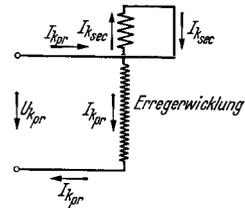


Abb. 42. Kurzschlußschaltung beim Kurzschlußversuch des Spartransformators.

$$I_{k_{pr}} = i_{k_{pr}} \cdot \frac{U_{pr} + U_{sec}}{U_{sec}},$$

$$I_{k_{sec}} = I_{k_{verbr}} = i_{k_{pr}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sec}} \cdot \frac{U_{pr} + U_{sec}}{U_{sec}},$$

$$I_{k_{netz}} = I_{k_{pr}} + I_{k_{sec}} = i_{k_{pr}} \cdot \left(\frac{U_{pr} + U_{sec}}{U_{sec}} \right)^2.$$

Wenn der Spartransformator zur Verringerung der ankommenden Netzspannung dient, ergeben sich mit den Bezeichnungen nach Abb. 43b die Werte:

$$I_{k_{pr}} = i_{k_{pr}} \cdot \frac{U_{pr} + U_{sec}}{U_{sec}},$$

$$I_{k_{sec}} = I_{k_{netz}} = i_{k_{pr}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sec}} \cdot \frac{U_{pr} + U_{sec}}{U_{sec}},$$

$$I_{k_{verbr}} = I_{k_{sec}} + I_{k_{pr}} = i_{k_{pr}} \cdot \left(\frac{U_{pr} + U_{sec}}{U_{sec}} \right)^2.$$

Die Kurzschlußleistung des speisenden Netzes erhöht sich gewaltig gegenüber der Kurzschlußleistung n_k des nur im Sekundärteil kurzgeschlossenen Wandlers. Sie ist in beiden Schaltungen gleich groß und beträgt:

$$N_k = n_k \cdot \left(\frac{U_{pr} + U_{sec}}{U_{sec}} \right)^2.$$

¹ In Abb. 42 mit $I_{k_{pr}}$ bezeichnet.

Man sieht, daß die Ströme und Leistungen im Kurzschluß um so größer werden, je geringer die Zusatzspannung U_{sec} bei gegebener Primärspannung U_{pr} wird. Sie sind im Verhältnis $(U_{pr} + U_{sec}) : U_{sec}$ größer als bei einem Leistungstransformator für die gleiche Durchgangsleistung.

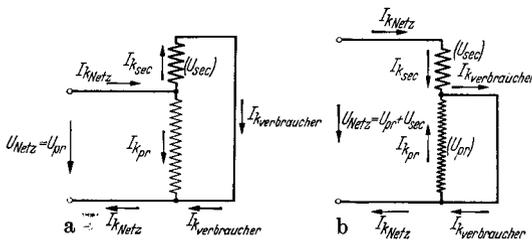


Abb. 43. Bezeichnungen der Kurzschlußströme beim Kurzschluß des Spartrafos auf der Verbraucherseite. Eingezeichnete Spannungen gelten bei Leerlauf.

$(U_{pr} + U_{sec}) : U_{sec}$ fache seiner Eigenleistung. Er ist also praktisch gesprochen nur für den Prozentsatz der Durchgangsleistung auszulegen, den die Zusatzspannung auf die Netzspannung bezogen ausmacht.

Die Drehregler, welche meistens als Spartransformator geschaltet sind, werden im Abschnitt über die Asynchronmaschinen behandelt.

Toleranzen. Nach den RET gelten für Transformatoren folgende Toleranzen:

Gewährleistung für:	Zulässige Abweichung:
Leerlaufverlust	10%
Kurzschlußverlust: a) im betriebswarmen Zustand	15%
b) bei Umrechnung auf 75°	10%
Kurzschlußspannung	± 10%

B. Die Asynchronmaschinen.

Aufbau und Wirkungsweise. Die Asynchronmaschine besteht aus einem Ständer und einem Läufer, die beide aus Blechen geschichtet sind und in Nuten gebettete Wicklungen tragen. Als Drehstrommaschine besitzt sie im Ständer eine Dreiphasenwicklung und im Läufer entweder ebenfalls eine dreiphasige oder seltener eine zweiphasige Wicklung. Diese ist zu Schleifringen geführt. Die Kurzschlußmotoren tragen in ihren Läufernuten gezogene oder gegossene Stäbe, die durch Ringe auf beiden Seiten des Ankers zu Käfigen, entweder einem einzigen oder mehreren, verbunden sind. Die sog. Staffelläufer besitzen einen weiteren Ring in der Mitte des Ankers. Die Querschnittsformen der Nuten und der Stäbe bei Kurzschlußläufern sind sehr mannigfaltig. Man findet runde, rechteckige, ovale und keilförmige Abmessungen.

Als Werkstoff für die Ständerwicklungen kommt ausnahmslos Kupfer zur Verwendung. Das gleiche gilt für gewickelte Läufer. Kurzschlußkäfige werden dagegen aus Kupfer, Bronze, Messing und Aluminium, letzteres als Guß, gebaut.

Die ruhende Asynchronmaschine mit offenem Sekundärkreis verhält sich, wenn sie ans Netz gelegt wird, wie ein leerlaufender Transformator. Sie nimmt einen stark nachteiligen Strom auf, dessen Blindanteil der Magnetisierung, also dem Aufbau des magnetischen Kraft-

flusses, und dessen Wirkanteil der Deckung der Eisenverluste im Läufer und Ständer sowie der kleinen Leerlaufkupferverluste dient. Der Leerlaufstrom ist allerdings wesentlich größer als beim Transformator, da außer dem Eisen auch noch der Luftspalt mit seinem hohen Bedarf an Erreger-AW zu magnetisieren ist; er beträgt etwa 20 bis 80% des Nennstromes.

Ein an die Schleifringe angelegter Spannungsmesser zeigt eine Spannung an, die etwas kleiner ist, als dem Verhältnis der Ständerwindungszahl zur Läuferwindungszahl unter Berücksichtigung der Schaltung und der Wickelfaktoren entspricht. Die Frequenz der Schleifringspannung bei Stillstand ist natürlich gleich der Netzfrequenz. Der grundlegende Unterschied gegenüber einem Transformator besteht darin, daß es möglich ist, die Phasenlage der Schleifringspannung durch Verdrehen des Läufers beliebig im vor- oder nacheilenden Sinne zu schwenken. Auf dieser Eigenschaft beruht die Wirkungsweise der Drehregler.

Wenn der Läufer durch irgendeinen Antrieb in Drehung versetzt wird, so ändert sich die Schleifringspannung nach Größe und Frequenz. Erfolgt die Drehung im Sinne des Drehfeldes, so nehmen beide linear mit dem Schlupf ab. Unter Schlupf versteht man das Verhältnis (Synchrondrehzahl—Läuferdrehzahl):(Synchrondrehzahl). Man drückt ihn meistens in Prozent aus. Bei Synchronismus werden Läuferspannung und Läuferfrequenz gleich Null. Wegen der Abhängigkeit von dem Schlupf spricht man von der Schlupfspannung und der Schlupffrequenz des Läufers.

Die synchrone Drehzahl hängt ab von der Netzfrequenz f und der Polzahl $2p$ der Maschine. Sie ist gleich $(120 \cdot f):2p$. Insbesondere errechnet man die Synchrondrehzahl der Motoren am 50 Hz-Netz zu:

$$n_{\text{syn}} = \frac{6000}{\text{Polzahl}} \text{ in Uml./min.}$$

Legt man an die Schleifringe des stillstehenden Motors einen Anlaßwiderstand, so nimmt dieser einen von der Stillstandsspannung und dem Widerstand abhängigen Strom auf. Dieser durchfließt die Ankerleiter und ruft in gemeinsamer Wirkung mit dem Kraftfluß das Anfahrtdrehmoment hervor. Wenn dieses größer als das Gegenmoment der Last ist, läuft der Motor an. Die Kurzschlußankermotoren laufen natürlich von selbst an, sobald sie an das Netz gelegt werden. Der aufgenommene Strom ist sehr hoch, da der Motor bei Stillstand sich im Kurzschluß befindet.

Grundsätzlich läßt sich feststellen, daß der Asynchronmotor nur dann ein Anlaufdrehmoment entwickeln kann, wenn in seinem Sekundärkreis Wirkleistung umgesetzt wird. Dieser Umsatz findet beim Schleifringläufer zum weitaus größten Teil im äußeren Anlaßwiderstand, beim Kurzschlußläufer aber ausschließlich in den Ankerstäben und Kurzschlußringen statt. Bei gegebener Maschine ist er also nur bei ersterem zu beeinflussen. Das Anlaufdrehmoment beträgt:

$$M d_a = \frac{N_{\text{sec.e1}}}{n_{\text{syn}}} \cdot 973 \text{ in mkg,}$$

wobei $N_{\text{sec el}}$ = im Sekundärkreis umgesetzte elektrische Leistung in kW,
 n_{syn} = Synchrondrehzahl in Uml/min.

Sobald der Motor läuft, gilt eine andere Gleichung, die die Abhängigkeit des vom Motor im Lauf ausgeübten Drehmomentes vom Schlupf berücksichtigt, nämlich:

$$Md = \frac{N_{\text{sec el}}}{s} \cdot \frac{973}{n_{\text{syn}}}, \quad \text{wobei } s = \text{Schlupf bzw. } \frac{\text{Schlupf}\%}{100}.$$

Man sieht, daß bei sehr kleinen Schlüpfen, also bei Geschwindigkeiten nahe dem Synchronismus, der elektrische Leistungsumsatz auf der Sekundärseite bei gleichen Drehmomenten sehr stark zurückgeht. In der Tat gehören zu einem Schlupf von 1 bis 2% auch nur Sekundärkupferverluste von 1 bis 2% der Nennleistung. Bei Stillstand müssen dagegen zur Erzielung eines Drehmomentes von 100% des Nennmomentes, weil der Schlupf 100% beträgt, auch 100% Leistung im Ankerkreis umgesetzt werden.

In der Abb. 44 ist der Fluß der dem Netz entnommenen Wirkleistung innerhalb der Maschine dargestellt. $N_{\text{pr el}}$ ist die aufgenommene Leistung. Von ihr gehen im Ständer als Verluste ab die Eisenverluste und die Ständerkupferverluste. Auch die sog. Zusatzverluste V_{zus} können als im Ständer entstanden betrachtet werden, obwohl sie sich wie die Eisenverluste zu einem gewissen Teil auch auf den Läufer aufteilen. Durch den Luftspalt tritt die Luftspaltleistung N_L , die gleich der Differenz aus Netzaufnahme und Ständerverlusten ist. Sie wird auf den Läufer übertragen und spaltet sich dort in zwei Teile auf, von denen der eine gleich der im Ankerkreis umgesetzten elektrischen Leistung $N_{\text{sec el}}$ und der andere gleich der vom Anker abgegebenen mechanischen Leistung N_{mech} ist. Beide stehen in dem nur vom Schlupf s und sonst nichts abhängigen Verhältnis:

$$\frac{N_{\text{mech}}}{N_{\text{sec el}}} = \frac{1-s}{s},$$

wobei $N_{\text{mech}} + N_{\text{sec el}} = N_L = N_{\text{pr el}} - (V_{\text{fe}} + V_{\text{cu}_1} + V_{\text{zus}})$ und

$$N_{\text{mech}} = (1-s) N_L,$$

$$N_{\text{sec el}} = s N_L \quad \text{ist.}$$

Diese Beziehungen sind von Bedeutung bei den Schleifringmotoren, welche durch Widerstand im Läuferkreis in der Drehzahl geregelt werden, da sie erkennen lassen, daß sich eine gewünschte mechanische Leistungsabgabe beim Schlupfe s nur erreichen läßt, wenn man die entsprechenden Verluste im Ankerkreis in Kauf nimmt.

Die an der Welle abgegebene Leistung verringert sich natürlich noch um die Reibungsverluste des Motors selbst.

Wenn die Asynchronmaschine als Periodenwandler benutzt wird, dann ist die im Sekundärkreis umgesetzte Leistung gleich der Nennleistung des Wandlers. Die obengenannten Gleichungen lassen dann erkennen, daß der Wandler zusätzlich angetrieben oder abgebremst

werden muß, sobald er belastet wird. Ersteres ist der Fall, wenn der Periodenwandler die Frequenz heraufsetzt, wenn also der Schlupf größer als 1,0 wird, letzteres, wenn die Sekundärfrequenz kleiner als die Netzfrequenz ist und der Schlupf kleiner als 1,0 ist.

Wenn sich im Läuferkreis der Asynchronmaschine nur Widerstände befinden, also z. B. wenn der Läufer im Kurzschluß arbeitet, so kann

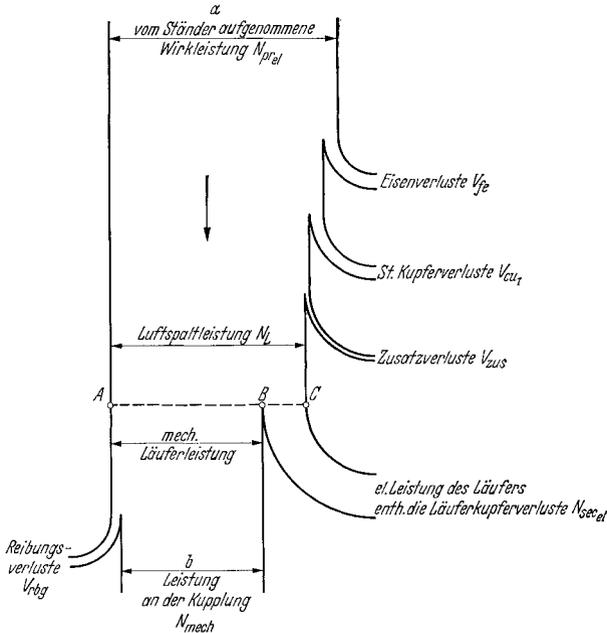


Abb. 44. Wirkleistungsfluß der Asynchronmaschine als Motor.

Strecke AC entspricht der synchronen Drehzahl, Strecke AB der wirklichen Drehzahl und Strecke BC dem Schlupf.

$$\text{Wirkungsgrad } N = \frac{b}{a}$$

bei Auftreten von Läuferstrom die sekundäre, elektrische Leistung $N_{sec_{el}}$ nur positiv sein, da sie gleich $m_{sec} \cdot I_{sec}^2 \cdot R_{sec}$ ist. Nun ist aber

$$N_{sec_{el}} = N_L \cdot s$$

und daher

$$N_L = \frac{N_{sec_{el}}}{s}$$

Sobald der Schlupf negative Werte annimmt, muß demnach die den Luftspalt vom Ständer her durchsetzende Leistung N_L negativ werden. Dies bedeutet aber Rücklieferung von Leistung an den Ständer und somit an das Netz. Der Asynchronmotor wird daher bei Durchgang durch den Synchronismus zum Asynchrongenerator. Die mechanische Leistung N_{mech} wird ebenfalls negativ; die Welle muß also in diesem Betriebszustand von außen angetrieben werden. Dies folgt natürlich auch aus dem Energieprinzip.

Wenn der Läufer der Asynchronmaschine mit Gleichstrom gespeist wird oder, seltener, an ein Netz konstanter Frequenz gelegt wird, wird er zu einem Synchronmotor bzw. Synchrongenerator. Er besitzt dann auch die typischen Eigenschaften dieser Maschinen. Im letztgenannten Fall spricht man auch von einer doppeltgespeisten Maschine, bei der aber nur der Anschluß von Ständer und Läufer an das gleiche Netz von Interesse ist. Der Motor nimmt dann die doppelte synchrone Drehzahl an, die er auch bei Last nicht ändert.

a) Der Drehstromasynchronmotor.

Der Drehstromasynchronmotor ist die wichtigste Antriebsmaschine und steht zahlenmäßig im Prüffeld an erster Stelle. Die Prüfung beginnt mit der Messung der Widerstände der kalten Maschine. Dann folgt der Leerlauf oder der Kurzschlußversuch. Die Belastungsaufnahmen werden oft während des Dauerlaufes vorgenommen. Der Hochlaufversuch gibt Aufschluß über das Anzugs-, das Hochlauf- und das Kippmoment und über den Kurzschlußstrom der Maschine. Das Schwungmoment wird im Auslauf bestimmt. Während die Windungsprobe im Anschluß an den Leerlaufversuch vorgenommen wird, steht die Wicklungsprobe ganz zu Ende der Prüfung.

Bei Prüfung ganzer Maschinenreihen gleicher Ausführung genügt es, etwa $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{5}$ aller Motoren genau zu untersuchen, während man sich bei den übrigen auf Leerlauf- und Kurzschlußversuch beschränkt. Allerdings wird dann der Leerlauf auf einige Stunden ausgedehnt.

Der Leerlaufversuch. Man beginnt mit der *Widerstandsmessung* der Ständerwicklung. Wenn es möglich ist, mißt man die Phasenwiderstände; sonst begnügt man sich mit der Messung der Widerstände zwischen den Anschlußklemmen. Dieser Wert wird mit R_{kl} bezeichnet. Er erlaubt die Bestimmung der Kupferverluste auch ohne Kenntnis der inneren Schaltung in Stern oder Dreieck, denn diese betragen $I^2 \cdot 1,5 \cdot R_{kl}$. Die genaue rechnerische Ermittlung der wirklichen Phasenwiderstände ist nach den auf S. 3 gegebenen Formeln möglich. Sie wird praktisch nie durchgeführt.

Der Läuferwiderstand wird nur bei Schleifringankern gemessen. Man mißt unmittelbar an den Ringen, nicht etwa an den Bürsten oder den Anschlußklemmen. Bei dreiphasigen Läufern kann man immer nur die verketteten Widerstände R_{schl} messen, da der Sternpunkt nicht herausgeführt wird. Nur ganz große Motoren haben sechs Ringe bei offener Phasenschaltung. Der Widerstand von Kurzschlußläufern wird nicht gemessen.

Bei Anlaß- und Regelmotoren wird anschließend die *Übersetzung* im Stillstand bestimmt. Der Ständer wird bei offenem Ankerkreis an die volle Spannung gelegt und die Spannung zwischen den Ringen gemessen. Das Übersetzungsverhältnis ist:

$$\dot{u} = \frac{U_{1verk}}{U_{20verk}} = \frac{w_1 \cdot f_{w_1}}{w_2 \cdot f_{w_2}} \cdot \left(1 + \frac{\tau_h}{2}\right)$$

bei Stern/Stern oder Dreieck/Dreieckschaltung des Motors. Wenn nur eine Wicklung in Stern geschaltet ist, ist deren Windungszahl mit $\sqrt{3}$ multipliziert einzusetzen. τ_h ist der sog. HEYLANDSche Streufaktor der Maschine, der zwischen 0,02 und 0,10 schwankt. Er kann aus den Meßergebnissen berechnet werden zu:

$$\tau_h = \frac{I_0}{I_{k_i} - I_0}$$

mit I_0 = Leerlaufstrom bei Nennspannung, I_{k_i} = ideeller Kurzschlußstrom bei Nennspannung $\approx I_k/\sin\varphi_k$.

Da I_0 von der Ständerspannung nicht linear abhängt, ist der Streufaktor und somit auch die Übersetzung von derselben abhängig. Man bevorzugt daher die Messung bei Nennspannung. Die Übersetzung ist ein wichtiger Wert, da sie auch das Verhältnis (Sekundärstrom) zu (Primärstrom \triangleq Leerlaufstrom) darstellt, wenn man die in den Zuleitungen fließenden Linienströme einsetzt.

Nunmehr wird der Motor hochgefahren. Bei Regel- und Anlauf läufer benutzt man einen Anlasser. Kurzschlußmotoren werden entweder direkt oder in Stern/Dreieckschaltung an das Netz gelegt. Wenn die erforderliche Leistung, die das 3,5- bis 6fache (bzw. ein Drittel hiervon) der Nennscheinleistung des Motors beträgt, nicht aufgebracht werden kann, fährt man mit verringerter Spannung hoch. Abb. 45 gibt die Schaltung der Meßgeräte wieder. Man bestimmt in Abhängigkeit der veränderlichen Netzspannung U_0 die Stromaufnahme I_0 , die Leistungsaufnahme V_0 und den Leistungsfaktor $\cos\varphi_0$. Die Spannung wird bis auf etwa ein Drittel des Nennwertes verringert. Die Drehzahl wird dauernd überwacht, da der Versuch nicht weitergetrieben werden soll, wenn sie mehr als etwa 1% abfällt. Bei zu geringer Spannung wird die Maschine instabil und bleibt unter Umständen stehen.

Die Meßergebnisse werden als Leerlaufkennlinien dargestellt. Man trägt auf über U_0 die Werte von V_0 , I_0 und $\cos\varphi_0$. Die Verluste werden um den Betrag der Leerlaufkupferverluste $1,5 \cdot R_{kl} \cdot I_0^2$ verringert, wobei für R_{kl} der kalte Widerstand einzusetzen ist. Die verbleibenden Verluste stellen die Summe aus Eisen- und Reibungsverlusten dar, deren Aufteilung durch Verlängerung der Kurve bis zum Schnitt mit der Ordinate gelingt. Besser erhält man die Reibungsverluste, wenn man die Verluste nach S. 15 über dem Quadrat der Spannung aufträgt.

Die Meßergebnisse werden als Leerlaufkennlinien dargestellt. Man trägt auf über U_0 die Werte von V_0 , I_0 und $\cos\varphi_0$. Die Verluste werden um den Betrag der Leerlaufkupferverluste $1,5 \cdot R_{kl} \cdot I_0^2$ verringert, wobei für R_{kl} der kalte Widerstand einzusetzen ist. Die verbleibenden Verluste stellen die Summe aus Eisen- und Reibungsverlusten dar, deren Aufteilung durch Verlängerung der Kurve bis zum Schnitt mit der Ordinate gelingt. Besser erhält man die Reibungsverluste, wenn man die Verluste nach S. 15 über dem Quadrat der Spannung aufträgt.

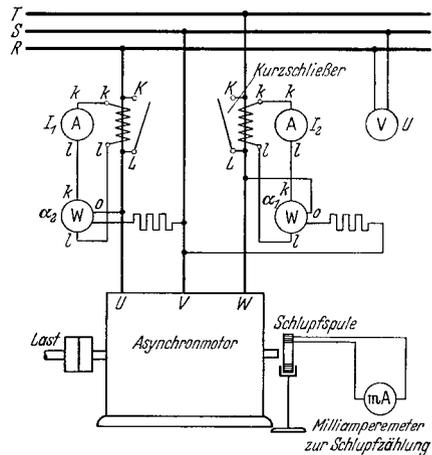


Abb. 45. Schaltung der Meßgeräte beim Asynchronmotor. Bei Spannungen über 600 Volt werden Spannungswandler benutzt.

Abb. 46 zeigt den Verlauf dieser Kennlinien. Die Eisenverluste nehmen praktisch quadratisch mit der Spannung ab. Der Leerlaufstrom nimmt den Verlauf einer Sättigungskennlinie, solange der $\cos \varphi_0$ nicht über etwa 0,1 bis 0,15 geht. Der Leistungsfaktor nimmt mit fallender Spannung zu. Dies beruht darauf, daß die konstanten Reibungsverluste prozentual immer stärker ins Gewicht fallen, der mit kleiner Spannung betriebene Motor also schließlich gar nicht mehr leer läuft, sondern verhältnismäßig stark belastet wird. Man beachte, daß das Kippmoment bei 32% Spannung nur noch 10% des normalen Kippmomentes beträgt.

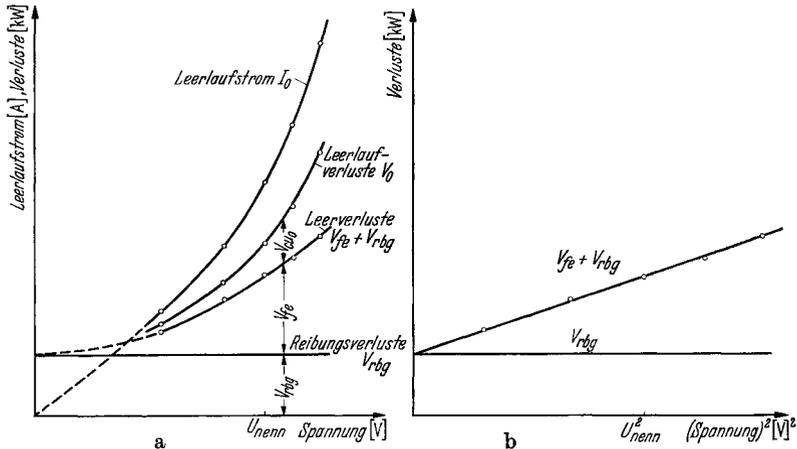


Abb. 46. Leerlaufkennlinien des Asynchronmotors (hochgesättigter Schnellläufer). Verluste und Strom über der Spannung (a) und Verluste über dem Quadrat der Spannung (b).

Wenn der Leerlaufversuch sehr weit nach unten ausgedehnt wird, nimmt der Leerlaufstrom sogar wieder zu. Die Maschine gerät anschließend in den Kurzschlußzustand.

Der Kurzschlußversuch. Der Kurzschlußversuch wird an allen Motortypen, ob mit Anlaß-, Regel- oder Kurzschlußankern, in gleicher Weise vorgenommen. Der Läufer wird durch einen auf das Wellenende aufgesetzten Hebelarm festgehalten und der Ständer an eine Spannung von Nennfrequenz gelegt, welche bei kleineren Maschinen etwa $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{1}$, bei größeren Motoren aber nur $\frac{1}{6}$ bis $\frac{1}{3}$ der Nennspannung betragen kann. Motoren für besonders kleine Anfahrströme, die nur das 3,5- bis 4,5fache des Nennstromes betragen, werden allerdings auch bei größeren Leistungen mit voller Spannung im Stillstand geprüft. Wenn die Wicklung des Ständers betriebsmäßig in Dreieck liegt, nimmt man gern den Kurzschlußversuch mit Nennspannung in Sternschaltung des Ständers vor. Dies entspricht einer Spannung von

$$\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577 \cdot U_{nenn}.$$

Beim Kurzschlußversuch werden abgelesen: die Kurzschlußspannung U_k , der zufließende Kurzschlußstrom I_k , die aufgenommene Leistung N_k und bei den größeren Schleifringmotoren auch noch der Läufer-

strom I_{2k} . Die Messung wird recht schnell durchgeführt, wozu am besten mehrere Beobachter herangezogen werden. Nur bei *Kurzschlußankern* wird gleichzeitig das am Hebelarm meßbare Drehmoment bestimmt (S. 342). Wegen der möglicherweise vorhandenen Abhängigkeit des Drehmomentes von der jeweiligen Läuferstellung muß der Anker während des Versuches zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stellungen höchsten Drehmomentes verdreht werden, wobei man das höchste und das tiefste Drehmoment mißt. Dieses kann sogar stellenweise negativ werden. Man nimmt den Mittelwert beider Ablesungen, setzt die Ruhelast, die der Hebel und sein Zubehör ausüben, ab und erhält das wahre mittlere Anzugs- oder Kurzschlußmoment des Motors.

Die an sich empfehlenswerte Vornahme des Kurzschlußversuches bei langsamem, ständigem Durchdrehen des Läufers gegen seine Drehrichtung wird in der Praxis wegen des wesentlich höheren Aufwandes nur selten durchgeführt. Soll der Versuch dennoch in dieser Form vorgenommen werden, so eignet sich die auf S. 26 beschriebene Anordnung mit der mit Gegenstrom gespeisten Pendelmaschine hierzu besonders gut.

Bei der Prüfung mehrerer gleicher Motoren begnügt man sich mit einer einzigen Messung. Bei Einzeluntersuchungen wiederholt man sie mit veränderter Spannung. Man geht von der höchsten Spannung aus, damit die zusätzliche Aufheizung der Wicklungen im weiteren Verlaufe des Versuches immer kleiner wird. An Maschinen unter 50 kW macht man etwa 3, bei größeren bis zu 10 Aufnahmen.

Ein Hinweis auf die Bestimmung des $\cos\varphi_k$ mag angebracht sein. Der Leistungsfaktor wird, wie es sich stets empfiehlt, sowohl aus dem Verhältnis kW/kVA als auch aus dem Verhältnis $\alpha_{\text{klein}}/\alpha_{\text{groß}}$ der beiden Leistungsmesserausschläge bestimmt (S. 326). Wenn Zweifel bestehen, ob der kleinere Ausschlag positiv oder negativ ist, so kann an Hand der berechneten $\cos\varphi$ -Werte nicht immer mit Sicherheit entschieden werden, ob er in Wirklichkeit über 0,5 oder unter 0,5 liegt. Dies ist nur möglich, wenn der $\cos\varphi_k$ über 0,55 oder unter 0,45 liegt. In einem solchen Falle ist eine dem Kurzschlußversuch unmittelbar folgende Feststellung des fraglichen Vorzeichens bei natürlich unveränderter Meßanordnung nötig, die darin besteht, daß der Motor nach Lösen des Bremsarmes erneut angefahren wird. Im Leerlauf ist, wenn man von ganz besonderen Fällen absieht, der fragliche Leistungsmesserausschlag immer negativ. Wenn der Zeiger richtig ausschlägt, war das Vorzeichen negativ, wenn er nach links gegen den Anschlag geht, war es dagegen positiv.

Motoren mit Schleifringläufern haben meistens einen $\cos\varphi_k$, der unter 0,5 liegt. Der eine Leistungsmesserausschlag ist daher fast immer negativ. Dasselbe gilt von den großen Kurzschlußmotoren. Der $\cos\varphi_k$ liegt höher als bei den Schleifringmaschinen. Kleine Maschinen, besonders solche mit Doppelnutankern, haben Kurzschlußleistungsfaktoren, die zwischen 0,4 und 0,6 liegen, also gerade in jenem Bereich, in welchem bei der Bestimmung leicht Fehler unterlaufen können. Einen

Anhalt über die Leistungsaufnahme beim Kurzschlußversuch kann man aus der Gleichung gewinnen:

$$N_k = Md_a \cdot \frac{n_{\text{syn}}}{973} + I_k^2 \cdot 1,5 \cdot R_{\text{kl}} \cdot \frac{1}{1000} \text{ in kW,}$$

wobei Md_a das Stillstandsmoment ist.

Umgekehrt kann man mit ihrer Hilfe das Drehmoment überprüfen.

Die Ergebnisse des Kurzschlußversuches werden nach Art der Abb. 47 in Kurvenform dargestellt, und zwar derart, daß in Abhängigkeit der Spannung der Strom I_k , der Leistungsfaktor $\cos \varphi_k$ und das Drehmoment Md_a sowie gegebenenfalls der Läuferstrom I_{2k} aufgetragen werden. Die Kurzschlußleistung wird normalerweise nicht weiter benötigt. Man kann sie nicht zur Bestimmung der Zusatzverluste heran-

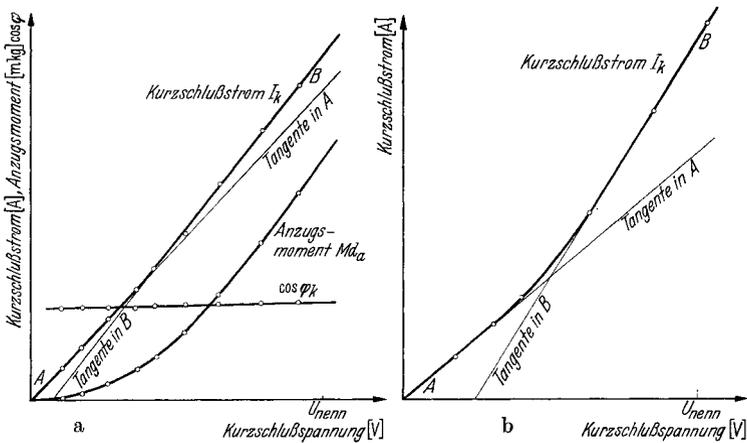


Abb. 47. Kurzschlußkennlinien des Asynchronmotors.

[Normal (a) und stark (b) sich bemerkbar machende Sättigung der Streuwege.]

ziehen und übernimmt sie daher auch nicht immer in das Kurvenblatt. Am meisten interessiert bei den Kurzschlußankermotoren der Verlauf des Kurzschlußstromes, da der Wert des Einschaltstromes, der häufig gewährleistet wurde, oft nur durch Verlängerung dieser Kurve über die Meßpunkte hinaus ermittelt werden kann. Sie zeigt anfangs, bei den kleineren Spannungen, einen linearen Verlauf, der sich bei schwach oder mäßig gesättigten Maschinen bis zur vollen Nennspannung fortsetzen läßt. Stärker gesättigte Motoren zeigen jedoch ein mehr oder weniger starkes Abbiegen der Kurve nach stärker als linear mit der Spannung ansteigenden Stromwerten zu, so daß mitunter der wahre Wert des vollen Kurzschlußstromes 10 bis 20%, äußersten Falles sogar bis zu 50% höher als der linear umgerechnete Betrag liegen kann. Die Ursache liegt in der hohen Sättigung der Ständerzähne im Phasensprung und der Köpfe der Läuferzähne bei verhältnismäßig engen Nutenschlitzten. Sobald sich diese Teile des Streuweges hoch sättigen, wirken sie wie Luftspalte, und der weitere Verlauf der Kurzschlußstromkurve ist wieder linear, aber bei einer wesentlich stärkeren Neigung der

Kurve. Man berücksichtigt diese Verhältnisse in der Praxis dadurch, daß man die Kurve geradlinig in ihrem letzten Teil verlängert und Ströme für höhere Spannungen auf dieser Verlängerung extrapoliert. Ein anderes Hilfsmittel besteht in der Verwendung von doppelt logarithmischem Papier, auf dem die Meßpunkte häufig nahezu auf einer Geraden liegen. Die Verlängerung derselben bis zur Nennspannung kann allerdings unter Umständen zu zu hohen Strömen führen.

Der gemessene Kurzschlußstrom darf nicht mit dem sog. *ideellen Kurzschlußstrom* verwechselt werden, der auftreten würde, wenn die Ohmschen Widerstände der Ständer- und der Läuferwicklung Null wären. Dieser Strom I_{k_i} ist immer größer als I_k und kann recht angenähert berechnet werden zu:

$$I_{k_i} = \frac{I_k}{\sin \varphi_k} \text{ bei Leerlaufströmen unter } 0,40 \cdot I_{\text{nenn}},$$

oder genauer

$$= \frac{I_k}{\sin \varphi_k} \left[\frac{1 - \frac{I_0 \sin \varphi_k}{I_k}}{1 - \frac{I_0}{I_k \cdot \sin \varphi_k}} \right] \text{ bei Leerlaufströmen über } 0,40 \cdot I_{\text{nenn}}.$$

Es ist üblich, den Kurzschlußstrom als Vielfaches des Nennstromes anzugeben, und auch in der kurvenmäßigen Darstellung wird gern ein entsprechender Maßstab gewählt. Da diese relativen Werte oft von ähnlichen Maschinen bekannt sind, geben sie einen guten Anhalt über das normale oder abweichende Verhalten des Probemotors oder aber weisen auf einen gemachten Meßfehler hin.

Die relativen Kurzschlußströme betragen bei Schleifringanker-motoren über 500/min das 5- bis 8fache und bei solchen unter 500/min das 3,5- bis 5fache des Nennstromes. Motoren mit Einfachkäfigläufer aus runden Stäben haben etwas kleinere Kurzschlußströme, und für sog. Industrieläufer mit Doppelnut- oder ausgesprochenen Stromverdrängungsankern gelten Werte des 3,5- bis 4,5fachen Nennstromes. Unter den Wert des 3,5fachen Nennstromes darf der Kurzschlußstrom im allgemeinen nicht sinken, da sonst das Kippmoment nicht mehr ausreicht. Dieses soll mindestens das 1,6fache des Nenndrehmoments betragen.

Die Umrechnung der Kurzschlußmeßergebnisse auf andere Spannungen erfolgt grundsätzlich für die Ströme linear und für die Drehmomente und die Leistungen quadratisch mit der Spannung. Der Leistungsfaktor wird nicht verändert. Bei der Umrechnung von Ergebnissen, die in Sternschaltung gewonnen wurden, auf solche in Dreieckschaltung ist noch mit 3 malzunehmen. Dabei ist als Strom der vom Netz entnommene, also nicht der Phasenstrom innerhalb der Dreieckschaltung zu verstehen. Es gelten also folgende Beziehungen bei Umrechnung auf die Spannung U :

$$I_k = I_{k_{\text{versuch}}} \cdot \frac{U}{U_{\text{versuch}}}, \quad M d_a = M d_{\text{versuch}} \cdot \frac{U^2}{U_{\text{versuch}}^2},$$

$$N_k = N_{k_{\text{versuch}}} \cdot \frac{U^2}{U_{\text{versuch}}^2},$$

wenn die Schaltung nicht geändert wird. Bei Umrechnung der Sternversuche auf Dreieckschaltung benutzt man allgemein die Gleichungen:

$$I_{\Delta} = I_{\Upsilon} \cdot 3 \cdot \frac{U_{\Delta}}{U_{\Upsilon}}, \quad Md_{\Delta} = Md_{\Upsilon} \cdot 3 \cdot \frac{U_{\Delta}^2}{U_{\Upsilon}^2}, \quad N_{\Delta} = N_{\Upsilon} \cdot 3 \cdot \frac{U_{\Delta}^2}{U_{\Upsilon}^2},$$

und im besonderen Fall der Umrechnung von Stern auf Dreieck bei gleicher Spannung die Beziehungen:

$$I_{\Delta} = 3 \cdot I_{\Upsilon}, \quad Md_{\Delta} = 3 \cdot Md_{\Upsilon}, \quad N_{\Delta} = 3 \cdot N_{\Upsilon}.$$

Die Höhe des Kurzschlußstromes hängt ab von dem magnetischen Leitwert der Streuwege. Je besser dieser Leitwert ist, desto geringere Kurzschlußströme treten bei gleicher aufgedrückter Spannung auf. Die magnetischen Kraftlinien im Kurzschluß verlaufen im wesentlichen quer zu den Ständernuten, rund um die Wickelköpfe des Ständers und des Läufers und quer zu den Läufernten. Einige Linien gehen vom Ständer durch den Luftspalt zum Läufer, bewirken aber keine nützliche Verkettung. Als Leitwert für die Ständer- und Läufernutstreuung kommt in Betracht das Verhältnis Höhe der Nut zur Breite der Nut. Schmale, hohe Nuten verkleinern also den Kurzschlußstrom. Besonders hohe Nutenschlitze, die man auch Streunuten nennt, verringern ihn zusätzlich. Lange Wickelköpfe erhöhen die Wickelkopfstreuung, die durch benachbartes magnetisches Eisen noch wesentlich vergrößert werden kann. Die Streuung im Luftspalt, welche mit doppelt verketteter Streuung bezeichnet wird, sinkt mit größer werdendem Luftspalt und vor allem mit steigender Nutenzahl. Man erkennt, daß eine nachträgliche Erhöhung des Kurzschlußstromes, die z. B. zur Erhöhung des Kippmomentes oder des Anzugsmomentes sich als erforderlich erweisen kann, nur in mäßigen Grenzen möglich ist. Praktisch kommt nur ein Aufweiten der Läufernutenschlitze und bei Maschinen mit sehr wenig Nuten je Pol und Phase eine Vergrößerung des Luftspaltes durch Abdrehen des Ankers in Betracht. Wenn sich dagegen Abweichungen des Kurzschlußstromes gegenüber gleichen Motoren bei der Prüfung zeigen, so untersucht man den Raum um die Wickelköpfe und Endringe auf zu dicht herangeführte Eisenteile, insbesondere auf eiserne Abdeck- und Luftführungsbleche, die stark auf den Kurzschlußstrom drücken können.

Das Drehmoment im Stillstand kann in weiteren Grenzen als der Strom ohne größere Änderungen erhöht werden. Grundsätzlich führt jede Vergrößerung des Läuferwiderstandes zum Ziel. Diese ist möglich bei Einfachkäfigläufern durch Abdrehen der Endringe. Man bedenke jedoch, daß man gleichzeitig die Kupferverluste bei Lauf erhöht und somit den Wirkungsgrad verschlechtert.

Besondere Überlegungen sind beim Doppelnutmotor erforderlich. Aus Abb. 50 ist das Stromdiagramm dieses Motors zu erkennen. Der große äußere Kreis würde gelten, wenn nur der obere Käfig vorhanden wäre, und der innere kleine, wenn nur der untere Käfig wirken würde. Dieser Käfig liegt tiefer, hat daher größere Streuung durch den

hohen Nutenhals und daher den kleineren Kurzschlußstrom. In Wirklichkeit wirken beide Käfige zusammen. Der Kurzschlußpunkt liegt zwischen den beiden Kreisen, und zwar auf einem kleinen — den größeren berührenden — Kreis. Er wandert auf diesem nach links, wenn der untere Käfig durch verringerten Widerstand stärker wirksam wird, und nach rechts, wenn der obere Käfig kleineren Widerstand bekommt. Umgekehrt läßt sich also sagen, daß ein Abdrehen des oberen Ringes den Anlaufpunkt nach links, ein Abdrehen des unteren Ringes ihn nach rechts verlagert. Je nachdem der Punkt auf der linken oder rechten Schmiegunskreishälfte liegt, wirkt also ein und dieselbe Maßnahme entweder erhöhend oder verringern auf das Drehmoment ein. Sehr hohe Kurzschlußströme bei zu kleinen Anlaufdrehmomenten weisen beim Doppelnutmotor auf zu geringen Widerstand des oberen Anlaufkäfigs hin. Dieser kann z. B. durch Verwendung von Werkstoff zu hohen Leitwertes, also etwa durch Einbau von Kupfer- statt Bronze- oder Messingstäben entstehen. Eine Untersuchung des spezifischen Widerstandes gibt hierüber Aufschluß.

Die Erhöhung des Kippschlupfes eines Motors kann erforderlich werden, wenn zwar die Höhe des Kippdrehmomentes ausreicht, dieses Moment aber erst bei einer zu hohen Drehzahl erreicht wird. Abb. 48 zeigt einen solchen Fall, wo das Gegendrehmoment eines Kreiseldrivers kurz vor dem Kippschlupf größer als das Motordrehmoment wird. Man sieht, daß der Motor im Hochlauf hängenbleiben muß.

In diesem Falle würde natürlich die Erhöhung des Kippmomentes ebenfalls zum Ziele führen, jedoch ist sie nur in mäßigen Grenzen durch die besprochene Erhöhung des Anlaufstromes möglich. Dagegen hilft die Vergrößerung des Kippschlupfes durch Erhöhung des Ankerwiderstandes. An Hand der aufgetragenen Kurven wird festgestellt, um wieviel der Kippschlupf vergrößert werden muß, damit die Motorkurve mit Sicherheit über die Gegenmomentkurve zu liegen kommt. Dann sind die Ringe oder aber auch die Stäbe so stark abzuarbeiten, bis eine entsprechende Widerstandserhöhung erreicht wird. Die neue Drehmomentkurve nimmt den gestrichelt eingezeichneten Verlauf. Da sich die normalen Läuferverluste im gleichen Verhältnis wie der Kippschlupf erhöhen, erfährt der Wirkungsgrad eine fühlbare Absenkung, die vorher genau in Erwägung gezogen werden muß.

Gelegentlich wird die Angabe des Stoßkurzschlußdrehmomentes des Asynchronmotors verlangt. Dieses Moment tritt als in beiden Richtungen pulsierendes Moment im allerersten Augenblick nach dem Einschalten auf und klingt infolge der dämpfenden Wirkung der Läufer-

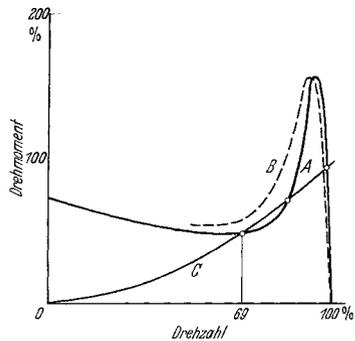


Abb. 48. Erhöhung des Kippschlupfes durch erhöhte Läuferverluste, um Hängenbleiben des belastet anlaufenden Motors bei 69% der Nenn Drehzahl zu verhüten. Kurve A: ursprüngliche Drehmomentenkennlinie des Motors, Kurve B: veränderte Drehmomentenkennlinie des Motors, Kurve C: Gegenmoment der Last (Lüfter).

wicklung sehr schnell ab. Von der Höhe des Läuferwiderstandes ist es unabhängig. Man berechnet es, da es keine geeigneten Meßverfahren zu seiner experimentellen Bestimmung gibt, zu:

$$Md_{\text{stoß}} = \pm Md_{\text{nenn}} \cdot \frac{I_k}{I_n \cdot \cos \varphi_n}.$$

Das Stoßmoment verhält sich also zum Nennmoment wie der Kurzschlußstrom zum Nennwirkstrom.

Der Hochlaufversuch. Der Kurzschlußversuch bei stillstehender oder nur sehr langsam laufender Maschine wird häufig ergänzt durch den Hochlaufversuch, bei dem die oszillographische Aufnahme der Drehzahl,

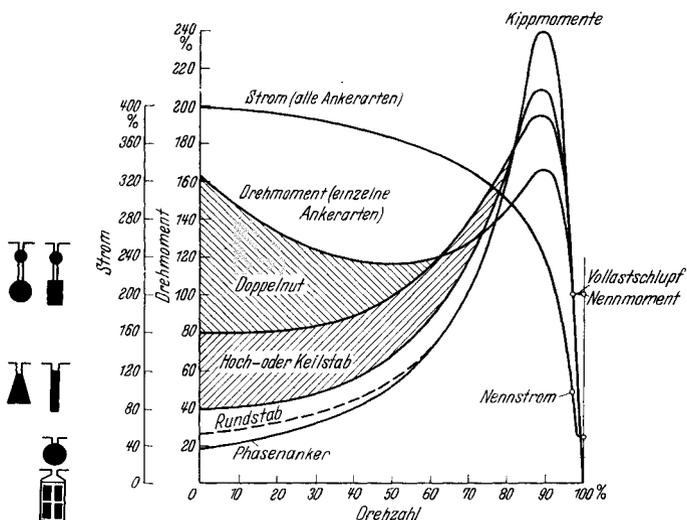


Abb. 49. Drehmoment und Strom über der Drehzahl bei verschiedenen Ankerarten, aber gleicher Motorgröße, gleichem Anlaufstrom und gleichen Läuferverlusten bei Nennlast. Die Kippmomente fallen mit steigenden Anzugsmomenten ab.

des Stromes und der Spannung der unbelastet anlaufenden Maschine erfolgt. Wie in Abschnitt I, G im einzelnen ausgeführt, liefert dieser Versuch nicht nur den genauen Wert des Kurzschlußstromes und des Kurzschlußdrehmomentes bei voller oder nur wenig verringerter Spannung, sondern auch alle übrigen Werte in Abhängigkeit der Drehzahl bis zur Leerlaufdrehzahl. Aus der graphisch leicht zu ermittelnden Drehmoment-Drehzahlkurve entnimmt man das Anzugsdrehmoment, welches auch Einschalt- oder Anfahrmoment heißt, ferner das Hochlaufmoment und angenähert das Kippmoment. Das Hochlaufmoment ist das geringste vor dem Kippmoment vom Motor entwickelte Drehmoment, welches also nicht kleiner als das betriebsmäßig zu überwindende Gegendrehmoment der Last werden darf. Das Kippmoment wird bei rund 90% der Leerlaufdrehzahl erreicht.

Ungünstige Feldkurven und Ankernutzahlen können Anlaß zu Sattelbildungen in der Drehmoment-Drehzahlkurve geben, die das

Hochlaufen des belasteten Motors erschweren oder gar unmöglich machen, wenn das Gegendrehmoment größer als der eingesattelte Wert ist. Die Ermittlung solcher Einsattelungen aus der Hochlaufkurve ist etwas unsicher und es empfiehlt sich daher, bei genaueren Untersuchungen die Drehmomentkurve Punkt für Punkt mit der Pendelmaschine zu untersuchen. Starke Sattelbildungen liegen vor, wenn der Motor nicht mit Sicherheit anläuft oder bei irgendeiner Geschwindigkeit hängenbleibt. In diesen Fällen muß der Motor geändert werden.

Da die Gesamthochlaufzeit bei bekanntem Schwungmoment der leer anlaufenden Maschine oder Maschinengruppe ein Maß für das mittlere Drehmoment ist, kann diese Zeit bei wiederholter Prüfung von

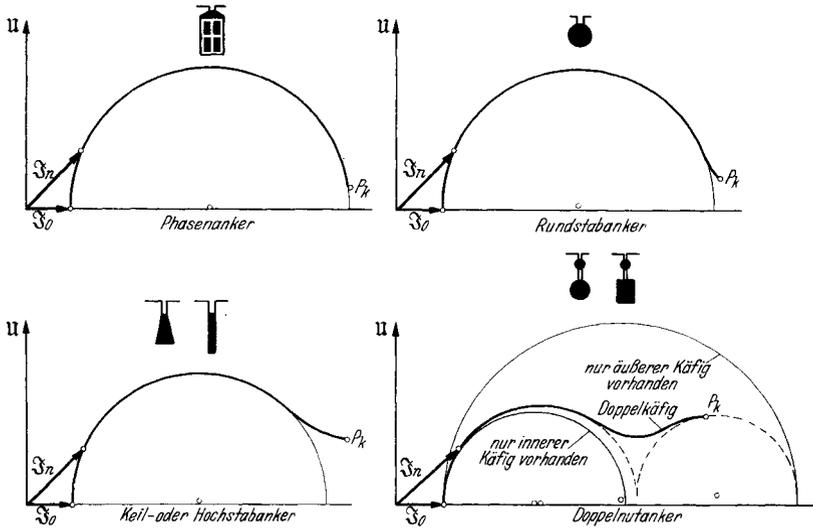


Abb. 50. Stromdiagramme des Asynchronmotors bei gleichem Kurzschlußstrom und den verschiedenen Ankerarten. (Die Erhöhung des Anzugsmomentes bewirkt geringeren $\cos\phi$ und kleineren Kippmoment).

unter sich gleichen Motoren als ein Vergleichswert betrachtet werden, der die erneute oszillographische Untersuchung erübrigt. Beträgt die Hochlaufzeit T_0 sec, die Leerlaufdrehzahl n_0 Uml/min und das Schwungmoment GD^2 mkg, so ist das mittlere Drehmoment in mkg:

$$M d_{\text{mittel}} = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot T_0}$$

Die Hochlaufzeit ändert sich verhältnismäßig mit dem Schwungmoment.

Der Kurvenverlauf des Kurzschlußstromes über der Drehzahl ist bei den verschiedenen Kurzschlußankertypen sehr ähnlich, während der Verlauf der Drehmomentkennlinie für jede der drei grundsätzlichen Ankerarten ganz charakteristisch ist. In Abb. 49 sind solche Kurven dargestellt, und zwar sind Motoren miteinander verglichen, welche gleichen Kurzschlußstrom besitzen. Die kleinsten Anfahrtdrehmomente haben demnach Phasenanker. Dicht darüber liegen die Einfachkäfig-

läufer, in deren Stäben nur eine verhältnismäßig schwache Widerstandserhöhung infolge Stromverdrängung auftritt. Wesentlich höhere Drehmomente zwischen Stillstand und Kippmoment haben die eigentlichen Stromverdrängungsläufer mit rechteckigen oder keilförmigen Stabquerschnitten. Die höchsten Anfahrmomente und auch Hochlaufmomente besitzen die Doppelnutanker. Es ist das ganze Gebiet dargestellt, innerhalb dessen die Drehmomentkennlinien je nach Aufteilung des Stabwiderstandes auf oberen und unteren Käfig liegen können. Zu beachten ist die Tatsache, daß jede Erhöhung des Anlaufmomentes notgedrungen eine Verschlechterung des Kippmomentes, des Nennleistungsfaktors und des Wirkungsgrades des Motors mit sich bringt, wie aus den Diagrammen in Abb. 49 zu ersehen ist.

Der Belastungsversuch. Das Verhalten der belasteten Asynchronmaschine kann nur bei Motoren mit Schleifringankern genügend genau dem Kreisbild entnommen werden, zu dessen Aufstellung die Ergebnisse des Leerlaufes und des Kurzschlusses ausreichen. Auch Motoren mit Kurzschlußkäfig aus Rundstäben, die also nur geringe Stromverdrängungserscheinungen im Stillstand besitzen, haben ein Kreisdiagramm, das angenähert richtig gezeichnet werden kann und dem die Punkte für Teillast, Vollast und Überlast entnommen werden können. Bei den übrigen Maschinen, die heute vielfach zur Prüfung gelangen, ist man dagegen fast ausschließlich auf unmittelbare Lastablesungen angewiesen. Diese nimmt man in der Praxis an allen Motoren vor, insbesondere da sich hierzu während des Temperaturlaufes stets die Möglichkeit bietet. Man liest mindestens den Nennlastpunkt ab, beobachtet aber meistens auch noch eine Reihe von Teillastpunkten und ein oder zwei Überlastpunkte. Es werden abgelesen: die Netzspannung, falls erforderlich die Netzfrequenz, der zufließende Netzstrom, die aufgenommene Leistung, die Drehzahl und bei großen Schleifringläufern der Läuferstrom, wozu am besten ein Hitzdrahtgerät benutzt wird.

Der Schlupf, der eine der wichtigsten Größen der belasteten Asynchronmaschine ist, da die Läuferwicklungsverluste in festem Verhältnis zu ihm stehen, wird durch unmittelbares Auszählen der Schlupffrequenz oder der Schlupfdrehzahl bestimmt. Nur bei Schlupfwerten über 6% bestimmt man ihn aus der mit Drehzahlmesser gemessenen Motordrehzahl.

Als Schlupffrequenzmesser wird ein empfindliches Drehspulgerät beliebiger Genauigkeit benutzt, das entweder an die kurzgeschlossenen Schleifringe oder an die Klemmen einer sog. Schlupfspule gelegt wird. Im ersteren Fall genügt der an sich sehr kleine Spannungsabfall der Kurzschlußverbindung, um das Gerät zum Ausschlag zu bringen. Der Spannungsabfall hat Schlupffrequenz, die gleich der Anzahl der nach einer Seite erfolgenden Ausschläge je Sekunde ist.

Die Schlupfspule besteht z. B. aus einer ringförmigen Spule von etwa 700 Windungen eines 1 mm starken Runddrahtes und hat einen mittleren Windungsdurchmesser von 60 cm. Man führt die Spule axial dicht an die Maschine heran. Man kann sie in allen vorkommenden Fällen, also bei der Prüfung offener und geschlossener Motoren und solcher mit

Schleifring- oder Kurzschlußanker verwenden. Das angeschlossene Drehspulgerät schlägt im Takt der Schlupfperiodenzahl nach links und rechts aus. Man zählt die Ausschläge nur nach einer Seite, indem man mit Null zu zählen beginnt. Ohne weitere Rechnung erhält man bei 50 Hz Netzfrequenz den Schlupf in Prozent, wenn man die Ausschläge während 20 sec abzählt und diese Zahl durch 10 teilt. Hat man z. B. in 20 sec 33 Ausschläge gezählt, so beträgt der Schlupf eines 50-Periodenmotors 3,3%.

Bei einer beliebigen Netzfrequenz f zählt man die Ausschläge nach einer Seite während $1000/f$ sec und erhält wiederum den Schlupf in Prozent, wenn man die Zahl der Ausschläge durch 10 teilt. Macht z. B. das Drehspulgerät bei einer Maschine für 40 Hz in $1000/40 = 25$ sec 43 Ausschläge, so ist der Schlupf gleich 4,3%.

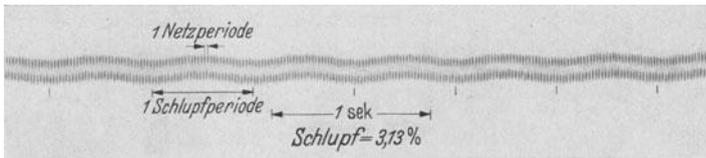


Abb. 51. Oszillogramm der in einer Schlupfspule induzierten Spannung.

Dies ist natürlich nur ein in der Praxis beliebtes Verfahren, und der Schlupf kann ganz allgemein, wenn in der abgestoppten Zeit von T sec n Ausschläge nach einer Seite abgezählt wurden und f die Netzfrequenz ist, berechnet werden zu:

$$s\% = \frac{n \cdot 100}{T \cdot f},$$

wobei man bedenke, daß n/T die Schlupffrequenz ist.

Die Wirkungsweise der Schlupfspule beruht darauf, daß sie von den nach außen tretenden Streufeldern der Maschine induziert wird. Eigentlich erwartet man nur eine induzierte Spannung von Netzfrequenz, wenn der am Netz liegende Motorteil der Ständer ist und als solcher relativ zur Schlupfspule ruht, da die Streufelder des Ständers bestimmt nur mit Netzfrequenz auftreten können und die Streufelder des Läufers sich zu einer Art Streudrehfeld zusammenschließen, das mit Schlupffrequenz plus Drehzahlfrequenz, also ebenfalls mit Netzfrequenz erscheint. In Wirklichkeit zeigt die in Abb. 51 wiedergegebene oszillographische Aufnahme der in der Spule induzierten Spannung sowohl Netzfrequenz wie auch überlagerte Schlupffrequenz. Diese wird von örtlichen Streuwechselfeldern der Läuferwicklung, die sich nicht zu einem Streudrehfeld zusammenschließen, induziert. Das angelegte Drehspulgerät reagiert auf die hohe Periodenzahl nur mit einem kaum merklichen Schwirren des Zeigers, folgt aber den langsamen Schwingungen mit sichtbarem Ausschlag.

Das Abzählen der Ausschläge kann bei etwas Übung bis zu 3 je sec oder 60 je 20 sec erfolgen. Darüber hinaus wird das Zählen sehr schwierig

und das Ergebnis infolgedessen unsicher. In solchen Fällen, wo also der Schlupf über 6% liegt, nimmt man den Drehzahlmesser zu Hilfe. Da diese Geräte meistens nur eine konstante Mißweisung haben, kann dieser Fehler dadurch im Ergebnis vermieden werden, daß man die Drehzahldifferenz zwischen Leerlauf und Last abliest und diese gleich der geschlüpften Drehzahl setzt. Zeigt z. B. das Gerät bei einer vierpoligen Maschine für 50 Hz im Leerlauf 1510 Uml/min und bei Last 1410 Uml/min, so ist die Schlüpfung gleich $1510 - 1410 = 100$ Uml/min. Daraus erhält man den Schlupf in Prozent zu:

$$\text{Schlupf in \%} = \frac{\text{Drehzahldifferenz zwischen Leerlauf und Last}}{\text{Synchrone Drehzahl}} \cdot 100,$$

$$s\% = \frac{n_{\text{syn}} - n}{n_{\text{syn}}} \cdot 100,$$

also im gewählten Beispiel zu $s\% = 100 \cdot 100/1500 = 6,67\%$. Voraussetzung ist bei dieser Messung natürlich, daß der leerlaufende Motor auch wirklich synchron läuft, wie dies bei allen nicht zu kleinen Motoren auch praktisch zutrifft.

Die *optische Bestimmung des Schlupfes* wird in der Praxis bei der Prüfung von Asynchronmotoren, außer bei solchen sehr kleiner Leistung, nur selten angewendet, da sie einen wesentlich größeren Aufwand erfordert. Sie beruht auf dem sog. stroboskopischen Prinzip, demzufolge sich Drehbewegungen — bei einer genau im Takte oder fast im Takte der Drehzahl oder eines Vielfachen von ihr erfolgenden blitzartigen Beleuchtung — als Stillstand oder ganz langsamer, bewegter Vorgang dem Auge des Beobachters darbieten. Zur Durchführung des Versuches zeichnet man auf dem Wellenende oder einer aufgesetzten Scheibe auf hellem Grunde einen schwarzen Strich zwischen Mittelpunkt und Umfang auf. Die Beleuchtung erfolgt im einfachsten Fall durch eine Neonlampe, welche an das speisende Netz des Motors angelegt wird. Diese Lampe leuchtet, wenn sie eine kleine und eine große Elektrode besitzt, im Takte der angelegten Frequenz auf, also 50mal je sec an einem 50-Periodennetz. Ein zweipoliger, synchronlaufender Motor wird von der Lampe immer nach genau einer vollen Umdrehung beleuchtet, der schwarze Strich erscheint daher immer an derselben Stelle und steht scheinbar still. Schlüpft nun der Motor z. B. mit $1/100$ seiner synchronen Drehzahl, so hat der Strich bei jeder neuen Beleuchtung gerade $1/100$ eines Umlaufes noch nicht beendet, d. h. das Auge sieht ihn um diesen Betrag gegen die Drehrichtung verspätet. Da sich dies bei jedem Aufleuchten der Neonröhre wiederholt, entsteht der Eindruck eines langsamen Rücklaufes des Striches gegen die wirkliche Drehrichtung. Zählt man die Rücklaufdrehzahl mittels Stoppuhr aus und rechnet sie auf 1 min um, so kennt man den Betrag der geschlüpften Drehzahl je Minute. Wenn der Motor mehr als zwei Pole hat, so sieht man bei Synchronismus statt eines einzelnen Striches deren so viele, wie Polpaare vorhanden sind, man erblickt also einen Stern mit p Strahlen. Dieser läuft bei einsetzendem Schlupf ebenfalls rückwärts um und seine Schlupfdrehzahl kann in der gleichen Weise in Uml/min gemessen

werden. Nur muß man bei Durchführung des Versuches auch wirklich die Drehzahl des Sternes und nicht etwa den Vorbeigang der einzelnen Strahlen an einer äußeren festen Marke beobachten. Der Schlupf in Prozent ergibt sich zu:

$$\text{Schlupf in \%} = \frac{\text{Umläufe des Sternes} \cdot 6000}{\text{Beobachtungszeit in sec} \cdot \text{Synchrone Drehzahl}}$$

Wenn man zur Beleuchtung eine Neonlampe mit zwei gleichmäßig ausgebildeten Elektroden benutzt oder eine dünnröhrtige Glühlampe verwendet, so erhält man je Sekunde soviel Lichtblitze, wie die Polwechselzahl des Netzes beträgt. Die Lampen leuchten mit doppelter Netzfrequenz, also 100mal je Sekunde, am 50-Periodennetz auf. Dies hat zur Folge, daß die Strahlenzahl verdoppelt erscheint, daß man also genau soviel Strahlen sieht, wie der Motor Pole hat. Wenn man auch in diesem Fall nur die Drehzahl des gesamten Sternes bestimmt, ändert sich nichts gegenüber vorher. Wohl erscheint der Vorbeigang der einzelnen Strahlen an einer festen Marke verdoppelt. Man tut daher gut, in allen Fällen stroboskopischer Beobachtung den Stern als Ganzes zu betrachten.

Der Vorbeigang der Einzelstrahlen je Sekunde gibt zwar bequemerweise bei Beleuchtung mit Netzfrequenz unmittelbar die Schlupffrequenz an, bei Beleuchtung mit doppelter Netzfrequenz aber den doppelten Wert. Da bei einer geschlossen angelieferten Beleuchtungsanlage nicht immer bekannt ist, in welchem Verhältnis die Lichtblitzzahl zur Netzfrequenz steht, vermeidet man lieber die Unsicherheit in der Bestimmung der Schlupffrequenz und bevorzugt die Bestimmung der Schlupfdrehzahl.

Als Lampen kommen auch besonders gespeiste Quecksilberlampen in Betracht, die bei kürzester Leuchtzeit eine außerordentliche Helligkeit besitzen, so daß bei hellstem Tageslicht messerscharfe Bilder der umlaufenden Teile gewonnen werden (Lichtblitzstroboskop).

In Sonderfällen ist die stroboskopische Methode von großem Vorteil, und zwar dann, wenn die Drehzahl stark schlüpfender oder regelbarer Kleinstmotoren bestimmt werden soll, die keine Belastung durch angelegte Drehzahlmesser vertragen. Man speist die Beleuchtungslampe mit regelbarer Frequenz, die man entweder einem Stromerzeuger meßbarer, veränderlicher Drehzahl oder einem Schwingkreis entnimmt. Man regelt die Frequenz so ein, daß der Strahlenstern zum Stillstand kommt. Die wirkliche Drehzahl steht dann in einem ganzzahligen Verhältnis zur Leuchtfrequenz. Welche Verhältniszahl in Frage kommt, geht aus der Überlegung hervor, daß die Motordrehzahl ja in der Nähe der möglichen Drehzahl, also z. B. bei einem Asynchronmotor unterhalb der Synchrondrehzahl, liegen muß.

Eine rein mechanische Drehzahlbestimmung hoher Genauigkeit besteht in der Verwendung eines Zungenfrequenzmessers, der auf die Grundplatte des Motors aufgesetzt wird. Die Frequenz der schwingenden Zunge mal 60 ist gleich der Motordrehzahl.

Die Beobachtungen während der Belastungsaufnahmen erstrecken sich außerdem auf das rein *mechanische Verhalten* der Maschine, ins-

besondere was Lagererwärmung, ruhigen mechanischen Lauf und Geräuschbildung betrifft. Letztere kann bei Asynchronmotoren in Brummen oder dem lästigen Heulen bei Last bestehen. Während das Brummen meistens schon im Leerlauf zu beobachten ist und oft auf geringe Unsymmetrien des Luftspaltes oder losen Sitz der Blechen oder mit-

vibrierende Schutzkappen zurückgeführt werden kann, tritt das Heulen als eine Folge der sich bei Last ausbildenden Oberfelder auf, die von ungünstig gewählten Ankernutzahlen herühren.

Belastungskennlinien. Die Meßergebnisse der Lastaufnahmen werden nach Art der Abb. 52 als sog. *Belastungskennlinien* aufgetragen. Man stellt die einzelnen Größen in Abhängigkeit der aufgenommenen Leistung dar, da diese unmittelbar gemessen wurde und auch bei späteren Untersuchungen an Ort und Stelle meistens an einem Leistungsmesser in der Motorzuleitung abgelesen werden kann. Die abgegebene Leistung zu wählen hat den Nachteil, daß die ganze Darstellung der Ergebnisse erst nach deren Ermittlung über den Wirkungsgrad erfolgen kann. Bei Verwendung der Pendelmaschine als Belastung wird die abgegebene Leistung schon während des Versuches zusammen mit den anderen Größen ermittelt, aber wegen der Einheitlichkeit der Darstellung sollte man auch in diesem Fall von der zugeführten Netzleistung ausgehen. Nur bei Mo-

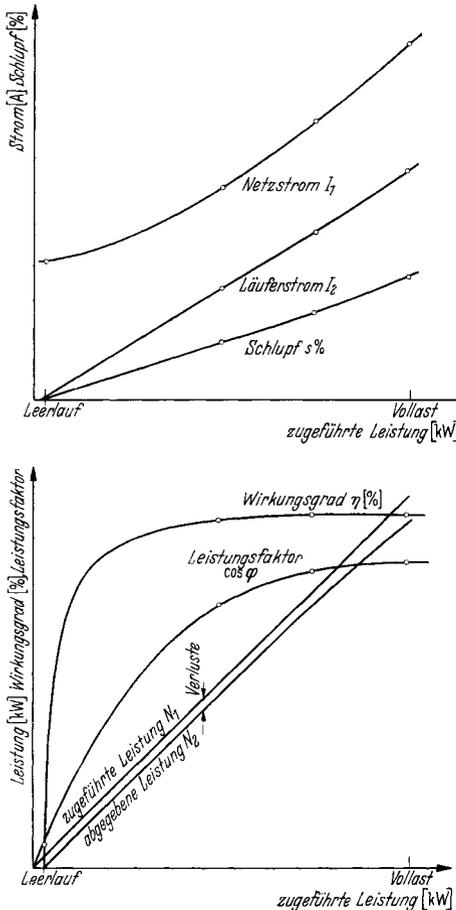


Abb. 52. Belastungskennlinien des Asynchronmotors.

toren, deren Drehzahl weit herunter geregelt wird, wählt man das abgegebene Drehmoment als unabhängige Veränderliche, um gut übersichtliche Kurven zu erhalten. Unter Angabe der Netzspannung und der Netzfrequenz werden dargestellt: Der Netzstrom, der Leistungsfaktor und der Schlupf. Diese Kurven werden meistens ergänzt durch jene für den Wirkungsgrad, die abgegebene Leistung und die Drehzahl. Seltener trägt man auch den Läuferstrom auf. Es empfiehlt sich, mehrere Kurvenblätter anzulegen, da die gleichzeitige Wiedergabe all

dieser Kurven stark die Übersichtlichkeit beeinträchtigt. Strom, Schlupf und Drehzahl in einem, Leistungsfaktor, Wirkungsgrad und Nutzleistung im anderen Blatt sind eine gute Aufteilung. Wenn man in letzterem Blatt die aufgenommene Leistung in Abhängigkeit von sich selbst darstellt, also als eine Gerade einträgt, die durch Null geht und bei dem üblicherweise gleichen Leistungsmaßstab auf Ordinate und Abszisse unter 45° verläuft, so gewinnt man einen guten Überblick über die Gesamtverluste. Diese entsprechen ja der Ordinatendifferenz zwischen der Leistungsaufnahme und der Leistungsabgabe. Anfangs verlaufen beide Linien fast parallel, und bei zunehmender Last biegt die Linie für die Nutzleistung immer stärker ab. Man sieht daraus, wie bei kleinen Lasten die konstanten Leerlaufverluste, bei hohen Lasten die quadratisch zunehmenden Lastverluste stärker ins Gewicht fallen. Außerdem kann man Zwischenwerte für den Wirkungsgrad schnell aus dem Verhältnis der Abstände beider Linien von der Nulllinie ermitteln.

Meistens werden nur die Kurvenäste aufgetragen, welche für die normalen Betriebszustände zwischen Leerlauf- und Vollastdrehzahl gelten. Dies ist der stabile Arbeitsbereich des Motors. Gelegentlich wird die Asynchronmaschine aber auch über den Kippunkt hinaus untersucht oder aber die Größen dem Diagramm entnommen. Alle Kurven zeigen dann rückläufige Äste, da die Netzleistung nach einem Höchstwert wieder abnimmt. Wirkungsgrad, Leistungsfaktor und Nutzleistung zeigen ausgesprochene Maxima. Nur der Netzstrom und der Schlupf nehmen bis Stillstand noch zu. Eine solche vollständige Darstellung wird aber bei der praktischen Untersuchung nur ausnahmsweise vorgenommen. Wenn man aus besonderen Gründen den Motor im ganzen Drehzahlbereich abgebremst hat, trägt man die Größen besser über der Drehzahl auf, wie dies z. B. bei der Auswertung des Hochlaufversuches immer üblich ist.

Der Dauerlauf zur Ermittlung der Erwärmung wird an Asynchronmotoren möglichst bei voller Spannung, Nennstrom sowie Nennfrequenz vorgenommen. Es gelten die in Abschnitt I, E gemachten Angaben über die Durchführung und Auswertung. Bei größeren Motoren macht man den Temperaturlauf, sofern zwei völlig oder annähernd gleiche Maschinen zur Probe kommen, gern im Rückarbeitsverfahren. Der zu untersuchende Motor liegt am Netz mit Nennfrequenz und treibt den zweiten Motor an, der an einem von einem Umformer regelbarer Drehzahl gebildeten Netz geringerer Periodenzahl liegt. Diese wird so weit herunter geregelt, bis sich die erste Maschine voll belastet. Die zweite läuft mit etwas geringerer Leistung als Asynchrongenerator.

Zur Ermittlung der thermischen Grenzleistung macht man häufig mehrere Läufe mit verschiedenen Stromstärken und verschiedenen Klemmenspannungen.

Wenn besonders hohe Erwärmungen im Läufer, besonders im Läuferisen, auftreten, so ist bei Kurzschlußankermotoren hierin oft ein Hinweis auf zu hohe zusätzliche Leerlaufverluste zu erblicken. Diese werden als Eisenverluste gemessen, machen sich also nicht etwa durch erhöhten Schlupf bemerkbar und treten z. B. auf, wenn die Stäbe des Ankerkäfigs

zu hoch liegen. Dies ist manchmal bei gegossenen oder gespritzten Aluminiumläufern zu beobachten, die daher im Nutenschlitz abgeätzt werden sollen. Auch Rund- oder Hochstabläufer aus Kupfer zeigen sehr hohe Eisenverluste, wenn die obere Stabzone bündig mit dem Ankerumfang abschließt oder doch nur unter 1 mm zurückliegt. Sehr stark wachsen diese Leerlaufverluste an, wenn außerdem der Ständer offene Nuten besitzt. Eine Abhilfe ist auch bei der fertigen Maschine noch durch Abfräsen der oberen Stabfaser um einige Millimeter möglich.

Auf den ungünstigen Einfluß fehlender oder zu weit entfernt vom Lüfter sitzender Luftführungsbleche wurde ebenfalls im Abschnitt I, E hingewiesen.

Der Wirkungsgrad der Asynchronmotoren wird bei der praktischen Maschinenprüfung ausschließlich nach dem Einzelverlustverfahren ermittelt. Zu Forschungszwecken, besonders bei Untersuchungen über die wirkliche Höhe der Zusatzverluste, werden auch direkte Verfahren mit Hilfe von Pendelmaschinen oder kalorimetrische Meßmethoden angewandt, die auf der direkten Messung der abgegebenen Leistung oder der Gesamtverluste beruhen. Sie erfordern einen weit über das übliche Maß ragenden Aufwand an Geräten und Zeit.

Der übliche Gang der Wirkungsgradberechnung geht von folgender Überlegung aus: Der am Netz liegende Motor entnimmt diesem bei Belastung die Netzleistung N_1 . Hiervon gehen verloren ein Teil der Eisenverluste V_{fe} und die Ständerwicklungsverluste V_{cu1} . Auch treten die Zusatzverluste V_{zus} zum großen Teil im Ständer auf, die gleichfalls abzusetzen sind. Die restliche Leistung geht als sog. Luftspaltleistung N_L vom Ständer auf den Läufer über. Hier erfolgt eine weitere Verringerung um die Läuferkupferverluste V_{cu2} , die Läuferzusatzerluste und die Läufer-Eisenverluste. Der übrigbleibende Anteil der Leistung wird in mechanische Leistung umgewandelt, von der noch die Reibungsverluste V_{rbg} des Motors abgehen. Auch ein gewisser Teil der Eisenverluste wird mechanisch vom Anker her gedeckt. Die übrigbleibende mechanische Leistung N_2 steht an der Kupplung als nutzbare Leistungsabgabe des Motors zur Verfügung. Das Verhältnis dieser Leistungsabgabe zur Netzleistung ist der Wirkungsgrad des Motors.

Die gesamten meßbaren Eisenverluste V_{fe} setzen sich zusammen aus den eigentlichen Hysteres- und Wirbelstromverlusten in den Ständer- und den Läuferblechen, von denen erstere mit Netzfrequenz, letztere jedoch nur mit der sehr kleinen Schlupffrequenz ummagnetisiert werden. Diese Läufer-Eisenverluste sind verhältnismäßig klein. Hinzu kommen die Verluste durch Wirbelströme in den bearbeiteten Stellen der Oberfläche der beiden Blechkörper, da hier durch Gratbildung eine quer zu den magnetischen Kraftlinien verlaufende, leitende Schicht vorliegt, in der die Wirkung der Lamellierung und Isolation der Bleche teilweise aufgehoben wird. Weitere Eisenverluste entstehen durch die Pulsation der Kraftliniendichte im Luftspalt, die auf die Folge von Nutöffnung und Zahn zurückzuführen ist. Die entsprechenden Verluste treten in den Zähnen von Läufer und Ständer auf. Zusätzliche Verluste, die den eigentlichen Eisenverlusten zugerechnet werden, entstehen in den Preß-

platten der Pakete und in den oberen, dem Luftspalt zugewandten Schichten der Ankerleiter. Bei Motoren mit Käfiganker treten noch Verluste durch die Wegdämpfung der Oberfelder auf, die dadurch entstehen, daß die Läuferwicklung ja nur für das Grundfeld synchron umläuft, von den Oberfeldern aber fast mit voller Geschwindigkeit geschnitten wird. Diese Verluste erhöhen sich bei Belastung, der entsprechende Anteil gehört dann aber zu den nichtmeßbaren Last-Zusatzverlusten. Die Deckung all dieser Verluste erfolgt zum Teil direkt durch das Netz und zum Teil durch Überwindung des von ihnen verursachten Bremsmomentes auf mechanische Weise von der Welle aus. Diese mechanische Leistung wird bei untersynchronem Lauf aber auch vom Netz her aufgebracht, so daß also die gesamten Eisenverluste bei leer laufendem Motor in der Leerlaufleistungsaufnahme enthalten sind. Sie werden aus dieser durch Abzug der Reibungsverluste und der Leerlaufkupferverluste gewonnen. Zwischen Leerlauf und Last ändert sich der Kraftfluß des Asynchronmotors bei gleichbleibender Klemmenspannung etwas nach Maßgabe des vom Ständerwirk- und Blindwiderstande verursachten Spannungsabfalles. Dies hat eine geringe Abnahme der Ständereisenverluste zur Folge, der eine geringe Zunahme der Eisenverluste im Läufer infolge der bei Last ansteigenden Schlupffrequenz gegenübersteht. Es ist üblich und auch richtig, bei normalen Maschinen die unveränderten Leerlaufeisenverluste auch bei Last einzusetzen, sie also als lastunabhängig zu betrachten.

Die Ständerwicklungsverluste V_{cu1} treten als normale Ohmsche Verluste, hervorgerufen durch den Wicklungswiderstand, auf. Sie werden errechnet zu:

$$V_{cu1} = m_1 \cdot I_{1ph}^2 \cdot R_{1ph},$$

oder einfacher bei Drehstrommotoren

$$= 1,5 \cdot R_{kl} \cdot I_1^2,$$

wobei

- m_1 = Phasenzahl des Ständers,
- I_{1ph} = Phasenstrom des Ständers,
- R_{1ph} = warmer Phasenwiderstand des Ständers ist.
- I_1 = Netzstrom, unabhängig von der Ständerschaltung,
- R_{kl} = warmer Widerstand zwischen den Netzanschlußklemmen, unabhängig von der Ständerschaltung.

Für den Ständerwicklungswiderstand ist entweder der gemessene warme Wert oder aber der auf 75° umgerechnete Wert einzusetzen.

Die Lastzusatzverluste V_{zus} in der Ständer- und Läuferwicklung, im aktiven Eisen und den der Wicklung benachbarten metallischen Konstruktionsteilen, die im wesentlichen durch Wirbelströme verursacht werden, werden weder gemessen noch vorausberechnet. Sie finden ihre Berücksichtigung durch die Annahme einer Leistungsverringerung des mit Nennlast laufenden Motors um 0,5% seiner aufgenommenen Leistung. Auf Teillasten werden sie quadratisch mit dem Netzstrom umgerechnet. Besonders bei kleineren Motoren dürften sie in Wirklichkeit diesen Betrag nach REM nicht unwesentlich überschreiten.

Die Läuferwicklungsverluste V_{cu_2} treten wie die Ständerwicklungsverluste als Ohmsche Stromwärme auf und können bei Schleifringankern in gleicher Weise berechnet werden zu:

$$V_{cu_2} = m_2 \cdot I_{2ph}^2 \cdot R_{2ph},$$

oder einfacher bei Dreiphasenanker

$$= 1,5 \cdot R_{schl} \cdot I_{schl}^2,$$

wobei

$$\begin{aligned} m_2 &= \text{Läuferphasenzahl,} \\ I_{2ph} &= \text{Läuferphasenstrom,} \\ R_{2ph} &= \text{warmer Läuferphasenwiderstand,} \\ I_{schl} &= \text{Schleifringstrom, unabhängig von der Schaltung,} \\ R_{schl} &= \text{warmer Widerstand zwischen den Schleifringen, un-} \\ &\quad \text{abhängig von der Schaltung des Ankers.} \end{aligned}$$

Diese Berechnungsweise ist jedoch nur bei der Vorausrechnung des Motors üblich. Sobald die Meßergebnisse der ausgeführten Maschine bekannt sind, werden die Läuferkupferverluste in sicherer und einfacher Weise mit Hilfe des Schlupfes bestimmt. Hierzu führt folgende Überlegung. Den Ständer des Motors denkt man sich durch eine mit synchroner Motorgeschwindigkeit umlaufende, antreibende Kupplungs-scheibe ersetzt, die das volle, der Luftspaltleistung N_L entsprechende Drehmoment auf den von ihr mitgenommenen Läufer überträgt. Dessen Geschwindigkeit weicht nun um die Schlupfdrehzahl von der synchronen Geschwindigkeit, prozentual also um den Schlupf in Prozent von der 100proz. Synchrondrehzahl ab. Demgemäß nimmt der Läufer, wie bei jeder schlüpfenden mechanischen Kupplung, nur eine entsprechend verringerte Leistung auf. Der Rest geht verloren. Bei mechanischen Kupplungen wird er in Wärme, beim Asynchronmotor in die elektrische Leistung des Läuferkreises, also letzten Endes auch in Stromwärme der Ankerwicklung, des Bürstenüberganges, der äußeren Zuleitungen und etwaiger Regelwiderstände umgesetzt. Die Berechnung erfolgt nach der Beziehung:

$$V_{cu_2} = N_L \cdot \frac{s\%}{100},$$

oder auch

$$= N_{mech} \cdot \frac{s\%}{100 - s\%},$$

wobei N_L = Luftspaltleistung, N_{mech} = Motorabgabe ist.

Die Luftspaltleistung N_L kann sehr angenähert gesetzt werden:

$$N_L = N_1 - V_{cu_1} - V_{fe} - V_{zus},$$

wobei: V_{fe} = Gesamteisenverluste, V_{zus} = Gesamtzusatzverluste sind.

Die Reibungsverluste V_{rbg} treten auf als Lager-, Luft- und Bürstenreibung. Sie ändern sich mit der Drehzahl des Motors und etwas mit der Temperatur der Lager und der Luft. Da diese Änderungen mit Rücksicht auf die fast konstante Motorgeschwindigkeit zwischen Leerlauf und Last nur sehr gering sind, werden die Reibungsverluste genau wie die Eisenverluste als lastunabhängig betrachtet. Eigentlich dürfen

sie erst von der mechanischen Läuferleistung abgesetzt werden, wozu man sie natürlich von den gemeinsam mitgemessenen Eisenverlusten trennen müßte, aber man macht bei der Bestimmung des Wirkungsgrades keinen Fehler, wenn man sie gleich von der Ständerleistung mit abzieht. Man erspart sich die Aufteilung der Leerverluste nach dem beim Leerlaufversuch angegebenen Verfahren, wozu ja stets eine Reihe von Leerlaufmessungen und die Anfertigung eines Kurvenblattes nötig ist. Bei größeren Motoren interessiert allerdings die genaue Kenntnis sowohl der Reibungs- wie auch der Eisenverluste. Dann kann man sie auch bei der η -Berechnung gesondert einsetzen.

Bei Maschinen, die mit fremder Welle und fremden Lagern ausgerüstet werden (Kolbenkompressormotoren), wird der auf die Lagerreibung entfallende Anteil nicht mit eingesetzt. Da die Aufteilung in Luft- und Lagerverluste sehr schwer ist, berechnet man in diesen Fällen den Wirkungsgrad ohne Reibung. Es ist dann ein entsprechender Vermerk zu machen.

In Abb. 44 wurde bereits der Fluß der Leistung unter genauer Berücksichtigung aller Einzelverluste dargestellt.

Das nachstehende Beispiel zeigt den Gang der Wirkungsgradberechnung. Man geht entweder von den wirklichen gemessenen Lastpunkten aus oder entnimmt Netzstrom und Leistungsfaktor sowie den Schlupf den Belastungskennlinien oder dem Kreisbild. Wenn man vom Kreisbild ausgeht, berechnet man allerdings die Läuferwicklungsverluste besser aus Widerstand und Strom, da kleine Schlupfwerte nicht allzu genau abgegriffen werden können. Man erhält zum Schluß der Rechnung die abgegebene Leistung bei verschiedenen Lastgraden. Trägt man η über der Abgabe auf, so kann man ohne weiteres alle Zwischenwerte für bestimmte Teillasten, also besonders für $1/4$, $1/2$, $3/4$, $1/1$ und $5/4$ Last bestimmen.

Netzspannung U in V	380	380	380	380
Leistungsaufnahme N_1 in kW	80,00	60,00	40,00	20,00
Leistungsfaktor $\cos\varphi$ —	0,86	0,85	0,81	0,63
Netzstrom I_1 in A	141,5	107,5	75,2	48,3
Schlupf $s\%$ in %	3,6	2,7	1,8	0,9
Leerverluste $V_{fe} + V_{rbg}$ in kW	2,80	2,80	2,80	2,80
Ständerkupferverluste V_{cu_1} in kW	3,40	1,97	0,96	0,40
Zusatzverluste V_{zus} in kW	0,40	0,23	0,11	0,05
Luftspaltleistung N_L in kW	73,40	55,00	36,13	16,75
Läuferkupferverluste V_{cu_2} in kW	2,64	1,48	0,65	0,15
Leistungsabgabe N_2 in kW	70,76	53,52	35,48	16,60
Gesamtverluste V_{ges} in kW	9,24	6,28	4,52	3,40
Gesamtverluste in Prozent der Aufnahme $V_{ges}\%$ in %	11,55	10,80	11,30	17,00
Wirkungsgrad $\eta\%$ in %	88,45	89,20	88,70	83,00

Bei großen Maschinen mit hohen Wirkungsgraden errechnet man η sehr genau, indem man setzt:

$$\eta\% = 100 - 100 \frac{N_1 - N_2}{N_1} = 100 - 100 \cdot \frac{V_{ges}}{N_1}.$$

Bei Motoren mit Drehzahlregelung durch Widerstände erhält man den stark verringerten Wirkungsgrad zu

$$\eta = \eta_{Md} \cdot \frac{n}{n_{Md}},$$

wobei η_{Md} und n_{Md} Wirkungsgrad und Drehzahl der normalen ungeregelten Maschine bei gleichem Drehmoment sind. n ist die herabgeregelte Drehzahl.

Gewährleistungen und Toleranzen. Bei den Asynchronmotoren werden oft Gewährleistungen für den Wirkungsgrad, den Leistungsfaktor und die Überlastbarkeit übernommen, zu denen bei Kurzschlußankermotoren noch jene für den Anlaufstrom, das Anlauf- und das Hochlaufdrehmoment treten. In besonderen Fällen, z. B. bei starr parallellaufenden Motoren oder solchen für Kompressorantriebe, wird auch der Wert des Volllastschlupfes verbindlich abgegeben. Alle diese Werte gelten als eingehalten, wenn sie die nachstehenden Abweichungen nach REM nicht überschreiten.

Gewährleistung für:	Zulässige Abweichung:
Wirkungsgrad $\eta\%$	$\pm \frac{100 - \eta\%}{10}$, aufgerundet auf 0,1%, mindestens aber 0,5%.
Leistungsfaktor $\cos \varphi$	$\pm \frac{1 - \cos \varphi}{6}$, aufgerundet auf 0,01, mindestens aber 0,02, höchstens aber 0,06.
Drehzahl	$\pm 20\%$ der Sollschlüpfung.
Kippmoment	$\pm 10\%$ dieses Wertes.
Anlaufmoment	$\pm 10\%$ des Sollwertes.
Anlaufstrom	$\pm 20\%$ des Sollwertes.

Als Normalwert ist nach den REM für das Hochlaufmoment, also das kleinste während des Hochlaufes vom Motor abgegebene Drehmoment, das 0,3fache und als Normalwert für das Kippmoment das 1,6fache Nennmoment des Motors einzusetzen.

Stempelung. Das Leistungsschild der fertig geprüften Maschine enthält die Angaben: Hersteller, Motortype, Fertigungsnummer, Verwendungsart, Nennleistung, Nennspannung, Nennstrom, Nennfrequenz, Leistungsfaktor und Schaltung des Ständers und außerdem Betriebsart, Nenndrehzahl, Spannung, Strom und Schaltung des Läufers.

Die Läuferspannung ist die bei Stillstand gemessene Spannung zwischen den Ringen. Bei Dreiphasenankern wird nur eine Spannung, bei Zweiphasenläufern die Spannung einer Phase und ihr $\sqrt{2}$ facher Wert vermerkt.

Der Läuferstrom wird meistens errechnet zu:

$$I_2 \approx \frac{N \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_{20} \cdot 0,95} \text{ bei Dreiphasenankern und}$$

$$I_{2\text{ph}} \approx \frac{N \cdot 1000}{2 \cdot U_{2\text{ph}} \cdot 0,95} \text{ bei Zweiphasenankern als Phasenstrom und}$$

$$I_{2\text{verk}} = I_{2\text{ph}} \cdot \sqrt{2} = \frac{N \cdot 1000}{U_{2\text{verk}} \cdot 0,95} \text{ als verketteter Strom.}$$

Der Wert 0,95 berücksichtigt die Verluste im Läufer selbst.

Das Kreisbild der Drehstromasynchronmaschine mit Phasenanker. Der dem Netz entnommene Strom I_1 des Asynchronmotors bzw. der an das Netz abgegebene Strom des Asynchrongenerators liegt auf einem Kreis, der von HEYLAND in grundsätzlicher vereinfachter und von OSSANNA in erweiterter Form angegeben wurde. Diesem Kreis können außerdem der Netzleistungsfaktor $\cos\varphi$, der Läuferstrom I_2 , die dem Netz entnommene oder zugeführte Leistung N_1 , das an der Welle auftretende, nutzbare Drehmoment Md und die an der Kupplung abgegebene oder zugeführte mechanische Leistung N_2 entnommen werden. Insbesondere lassen sich die Höchstwerte für das Drehmoment und die Nutzleistung, die nur selten durch einen unmittelbaren Versuch nachweisbar sind, im Kreisbild ablesen. Durch Einzeichnung von Schlupflinien wird das Diagramm noch weiter ergänzt. Die Entnahme des Wirkungsgrades ist ebenfalls möglich, tritt aber gegenüber der genaueren punktweisen Berechnung in der Prüffeldpraxis stark zurück.

Es empfiehlt sich, die Linienströme, welche in den Netzzuleitungen zum Ständer und in den äußeren Zuleitungen zu den Schleifringen fließen, darzustellen, da diese dann auch bei in Dreieck geschalteten Wicklungen ohne Umrechnung über $\sqrt{3}$ mit den bei der Prüfung der Maschine ermittelten Werten verglichen werden können. Nur bei der Vorausrechnung ist es üblich, die Phasenströme zugrunde zu legen. Statt der Phasenwiderstände R_{1ph} und R_{2ph} in Ständer und Läufer rechnet man besser mit den ebenfalls den unmittelbaren Meßergebnissen zu entnehmenden Werten R_{kl} und R_{schl} , die, wie ihre Fußzeichen andeuten, die Widerstandswerte zwischen den Klemmen des Ständers und den Schleifringen des Läufers in betriebsmäßiger Schaltung derselben darstellen. Es ist also allgemein $R_{kl} = 2 \cdot R_{1ph}$ in Υ und $= 2/3 \cdot R_{1ph}$ in Δ -Schaltung bzw. $R_{schl} = 2 \cdot R_{2ph}$ in Υ und $= 2/3 \cdot R_{2ph}$ in Δ -Schaltung. Dies bietet besonders Vorzüge bei der Berechnung von Verlusten, die sich ergeben zu: $V_{cu_1} = 1,5 \cdot R_{kl} \cdot I_1^2$ im Ständer und zu: $V_{cu_2} = 1,5 \cdot R_{schl} \cdot I_2^2$ im Läufer.

Man benötigt vier Maßstäbe bei der Zeichnung und Auswertung des Diagrammes, von denen aber nur ein einziger frei gewählt wird, und zwar der für den Netzstrom I_1 . Diesen wählt man so, daß der Kurzschlußpunkt noch mit auf den zur Verfügung stehenden Raum fällt. Bei dreiphasigem Ständer und dreiphasigem Läufer bestimmt man die Maßstäbe zu:

- Maßstab für den Netzstrom I_1 in A $1 \text{ mm} = a_1 \text{ A}$ (wird frei gewählt),
 „ „ „ Läuferstrom I_2 in A $1 \text{ mm} = a_2 \text{ A}$ ($a_2 = a_1 \cdot \frac{U_1}{U_{2_0}}$),
 „ „ die Leistung in W $\dots 1 \text{ mm} = w \text{ W}$ ($w = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot a_1$),
 „ „ das Drehmoment in mkg $1 \text{ mm} = m \text{ mkg}$ ($m = \frac{0,973}{n_{syn}} \cdot \sqrt{3} U_1 a_1$).

Die Zeichnung des Kreisbildes. Die Konstruktion des Kreisbildes ist in Abb. 53 wiedergegeben. Man legt von 0 aus unter Berücksichtigung

des gewählten Primärstrommaßstabes und der Leistungsfaktoren den Leerlaufstrom I_{1_0} und den Kurzschlußstrom I_{1_k} hin. Man erhält so die beiden Punkte P_0 und P_k . In P_0 errichtet man ein Lot, welches den

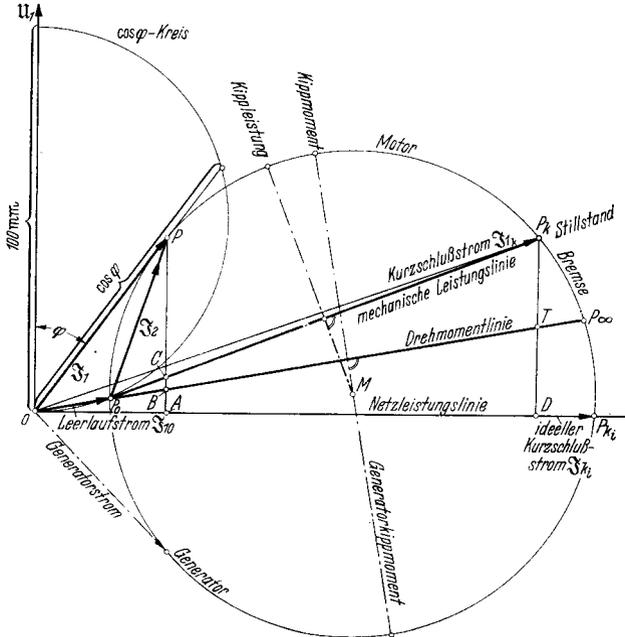


Abb. 53. Kreisdiagramm des Asynchronmotors.

Vektor des Kurzschlußstromes im Punkt a schneidet. Der gesuchte Kreis geht durch die drei Punkte P_0 , a und P_k (Abb. 54a). Der Mittelpunkt M muß also auf der Mittelsenkrechten zu P_0 und P_k und auf

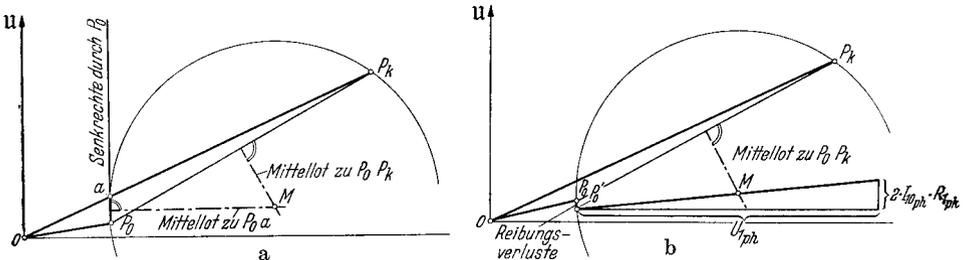


Abb. 54. Bestimmung des Mittelpunktes zum Kreisdiagramm unter der Annahme gleicher Ständer- und Läuferkupferverluste (a) und unter Berücksichtigung des wahren Ständerwiderstandes (b).

der Mittelsenkrechten zu P_0 und a liegen, welche letztere parallel zur Nulllinie verläuft. Diese Konstruktion gilt für gleiche Aufteilung der Kupferverluste auf Ständer und Läufer. Wenn diese dagegen nicht im Verhältnis 1:1 stehen, geht man folgendermaßen vor: Man bestimmt den Punkt P'_0 , der um den Betrag der Reibungsverluste senkrecht unter

P_0 liegt. Durch diesen legt man eine Gerade, deren Neigung gegen die Waagrechte $(2 \cdot I_{1\text{ph}} \cdot R_{1\text{ph}}) : (U_{1\text{ph}}) = \sqrt{3} \cdot I_{1\text{o}} \cdot R_{kl} : U_{\text{netz}}$ beträgt. Diese schneidet die Mittelsenkrechte zu P_0, P_k in M (Abb. 54 b).

Der Punkt P_∞ , der der Betriebspunkt für unendlich hohen Schlupf ist, wird gefunden, indem man auf der Senkrechten durch P_k von der Nulllinie aus die den Kurzschluß-Kupferverlusten des Ständers entsprechende Strecke $v_{cu_1} = \frac{I_{1k}^2 \cdot 1,5 \cdot R_{kl}}{w}$ mm abträgt. Man erhält den Punkt T , der mit P_0 verbunden wird. Die Verbindungslinie wird bis zum Kreis verlängert, den sie im gesuchten Punkt P_∞ trifft. Die restliche Strecke $P_k T$ muß den Kurzschlußwicklungsverlusten des Läufers entsprechen, also gleich $v_{cu_2} = \frac{I_{2k}^2 \cdot 1,5 \cdot R_{schl}}{w}$ mm sein. I_{1k} ist der

Ständerkurzschlußstrom und I_{2k} der Läuferkurzschlußstrom, der gleich (Strecke $P_0 P_k$) $\cdot a_2$ ist. Außerdem muß dieselbe Strecke $P_k T = v_{cu_2}$ in mm dem vom Motor bei Stillstand ohne Anlaufwiderstände entwickelten Drehmoment entsprechen. Es ist also $P_k T = Md_a/m$ mm. Wenn die Ständer- oder die Läuferwiderstände unbekannt sind, halbiert man die Senkrechte durch P_k und verbindet den Mittelpunkt mit P_0 . Diese sehr häufig verwendete Vereinfachung gilt genau, wenn die Verluste in Ständer und Läufer sich wie 1:1 verhalten. Bei Motoren mit verhältnismäßig hohen Läuferverlusten kommt dann natürlich P_∞ zu hoch auf den Kreisumfang hinauf. Die Abtragung der beiden errechneten Verluststrecken v_{cu_1} und v_{cu_2} ist eine gute Kontrolle für die Kurzschluß-Leistungs-Messung.

Die Drehmoment- und Leistungslinien werden durch Verbindung des Leerlaufpunktes P_0 mit P_∞ bzw. mit P_k gewonnen. Man erhält die zugeführte Netzleistung N_1 als $(PA) \cdot w$, das Drehmoment Md als $(PB) \cdot m$ und die mechanisch abgegebene Leistung N_2 als $(PC) \cdot w$. Die Reibungs- und Eisenverluste werden hierbei voll berücksichtigt. A, B und C sind die Schnittpunkte des Lotes durch den beliebigen Kreispunkt P mit der Nulllinie, der Drehmomentlinie und der mechanischen Leistungslinie. Ganz genau erhält man N_2 und Md , wenn man die Senkrechte zum Kreisradius $P_0 M$ benutzt, doch ist die getroffene Vereinfachung fast immer zulässig. Man erkennt, daß im Punkte P_k das Drehmoment noch einen gewissen Wert besitzt, die mechanische Nutzleistung dagegen verschwunden ist. Moment und mechanische Leistung verschwinden beide im Punkt P_0 . Auf dem Bogen zwischen P_0 und P_k liegt der eigentliche Arbeitsbereich des Motors. Stabil ist der Betrieb jedoch nur zwischen P_0 und dem Punkt des Kippmomentes, der unschwer gefunden wird, wenn man von dem Kreismittelpunkt M das Lot auf die Drehmomentlinie fällt und dieses bis zum Kreise selbst verlängert. Die höchste Leistungsabgabe des Motors an der Welle tritt bereits etwas früher auf. Man findet den zugehörigen Kreispunkt als Schnitt des Lotes von M auf die mechanische Leistungslinie.

Wenn man zu beliebigen Motorleistungen, z. B. zu $\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}$ und $\frac{1}{1}$ Last die entsprechenden Kreispunkte $P_{\frac{1}{4}}, P_{\frac{1}{2}}, P_{\frac{3}{4}}$ und P_1 finden will, errichtet man im Kreismittelpunkt (weil man dort die Übersicht

am wenigsten beeinträchtigt) ein Lot. Auf diesem trägt man, vom Schnittpunkt mit der mechanischen Leistungslinie ausgehend, nach oben die entsprechenden Millimeterstrecken $\frac{N_{\text{nenn}}}{4 \cdot w}$, $\frac{N_{\text{nenn}}}{2 \cdot w}$, $\frac{3 \cdot N_{\text{nenn}}}{4 \cdot w}$ und $\frac{N_{\text{nenn}}}{w}$ ab. Durch die zugehörigen Punkte werden nun Parallelen zur mechanischen Leistungslinie nach links gezogen, die den Kreis in den gesuchten Betriebspunkten treffen. Zu diesen können dann die Ständerstromstärke I_1 , der Leistungsfaktor $\cos \varphi$, Netzleistung N_1 und die Läuferstromstärke I_2 abgelesen werden. N_1 kontrolliert man am besten, wenn man eine Wirkungsgradrechnung durchführen will, indem man aus U_1, I_1 und $\cos \varphi$ den gleichen Wert rechnerisch bestimmt zu $N_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \text{ W}$. Den Läuferstrom I_2 erhält man aus $(P_0 P) \cdot a_2$ in A. Wenn man die Strecke $(P_0 P)$ dagegen mit dem Primärstrommaßstab a_1 multipliziert, erhält man den Läuferstrom I_2 , also den auf die wirksame Ständerwindungszahl bezogenen Strom.

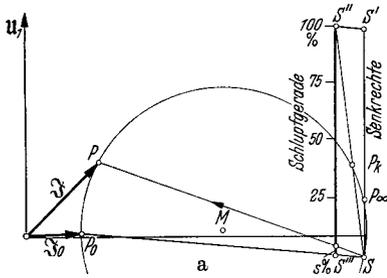
Die Strecke des Ständerstromes (OP) mal dem Leistungsmaßstab w ergibt die Scheinleistung des Ständers.

Die Bestimmung des Schlupfes. Der Schlupf wird dem Kreisbild entweder mittels einer Schlupfgeraden entnommen oder aber punktweise durch eine kleine Nebenrechnung gefunden. Theoretisch kann eine unendliche Anzahl von Schlupfgeraden konstruiert werden, jedoch wählt man zur Bestimmung mittlerer Schlüpfе am besten eine Parallele zur Drehmomentlinie und zur Auffindung kleiner Schlüpfе in der Nähe der Betriebsdrehzahl eine Senkrechte zur Nulllinie. Die punktweise Ermittlung ist von besonderem Vorteil beim Aufsuchen von Kreispunkten für Schlüpfе über 0,5 bis 2,0, die bei Periodenwandlern oder Maschinen in elektrischer Wellenschaltung benötigt werden.

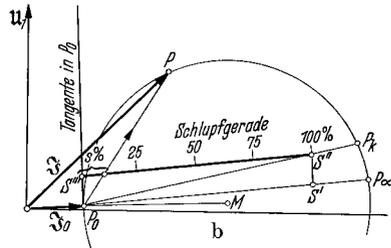
Die Schlupfgerade für kleine Schlüpfе. Nach Abb. 55a legt man durch den Punkt P_∞ eine Senkrechte, die den Kreis im unteren Schnittpunkt S trifft. Von S wird nach oben eine Strecke von 100 mm abgetragen. Dies ergibt Punkt S' . S wird mit P_0 und mit P_k verbunden. Die Parallele durch S' zur Linie SP_0 schneidet die Linie SP_k im Punkte S'' . Eine Senkrechte durch diesen Punkt ergibt die gesuchte Schlupflinie. S'' ist der Punkt für den Schlupf $s = 100\%$ und S''' , der sich als unterer Schnittpunkt mit der Hilfslinie SP_0 findet und genau 100 mm unter S'' liegt, gilt für den Schlupf $s = 0\%$. Die Teilung der Schlupfgeraden ist linear, 1 mm ist gleich 1% Schlupf. Der Schlupf zu einem beliebigen Kreispunkt P wird gefunden, indem man P mit S verbindet. Diese Linie schneidet die Schlupfgerade im Punkt des zugehörigen Schlupfes. Man sieht, daß diese Konstruktion sich besonders gut für normale Betriebspunkte eignet.

Die Schlupfgerade für mittlere Schlüpfе. Nach Abb. 55b wird im Punkt P_0 die Tangente an den Kreis gelegt und P_0 mit den Kreispunkten P_k und P_∞ (beide Linien sind als mechanische Leistungs- und Drehmomentlinie meistens schon vorhanden und werden u. U. nur etwas verlängert) verbunden. Auf letzterer Linie, also der Md -Linie, wird die Strecke von 100 mm von P_0 aus abgetragen. Dies ergibt Punkt S' . Die Parallele durch S' zur Tangente im Leerlaufpunkt P_0 schneidet

die Linie P_0P_k , also die mechanische Leistungslinie, in S'' . Die gesuchte Schlupflinie ergibt sich als Parallele durch diesen Punkt S'' zur Drehmomentlinie P_0P_∞ . S'' entspricht dem Schlupf $s = 100\%$ und S''' , der Schnittpunkt mit der Tangenten im Punkt P_0 , dem Schlupf $s = 0\%$. Die Teilung ist wiederum linear, 1 mm ist gleich 1% Schlupf. Zum beliebigen Kreispunkt P findet man den Schlupf als Schnittpunkt der Hilfslinie P_0P mit der Schlupfgeraden.



Senkrechte $S'S' = 100$ mm,
Strecke $S'S'' \parallel SP_0$,
Schlupf $s\%$ wird durch PS abgeschnitten.



Strecke $P_0S' = 100$ mm,
Strecke $S'S'' \parallel$ Tangente in P_0 ,
Schlupf $s\%$ wird durch P_0P abgeschnitten.

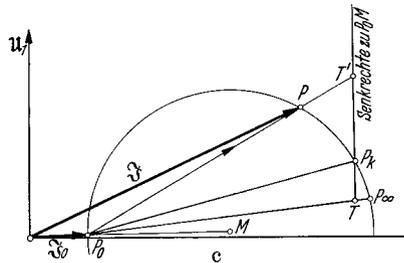
Man sieht, daß die Werte in unmittelbarer Nähe des Leerlaufpunktes besser mit der ersten Konstruktion, die Schlupfbeträge in der Nähe des Kippunktes und des Stillstandes besser mit der letzten Konstruktion gefunden werden können.

Wenn man statt 0% Schlupf 100% Drehzahl und statt 100% Schlupf 0% Drehzahl an die Schlupflinie anschreibt, erhält man eine Drehzahllinie.

Die punktweise Ermittlung des Schlupfes bzw. das Auffinden eines Kreispunktes zu gegebenem Schlupf. Man legt durch den Stillstandspunkt die Senkrechte (genauer müßte es eine Parallele zur Kreistangente im Leerlaufpunkt P_0 sein), deren Schnittpunkt mit der Drehmomentlinie P_0P_∞ wie vorher mit T bezeichnet wird. Der Schlupf $s\%$ für einen beliebigen Kreispunkt P , der beispielsweise in Abb. 55c zwischen P_k und P_0 für den Fall eines Periodenwandlers mit Frequenzverringern gewählt wurde, ergibt sich aus der Beziehung:

$$s\% = \frac{\text{Länge } TP_k}{\text{Länge } TT'} \cdot 100.$$

T' ist der Schnittpunkt der Geraden P_0P mit der Senkrechten durch P_k .



Gerade $TP_k \perp P_0M$ (praktisch \perp Nulllinie),
 $IP_k = 100$,
Schlupf $s\% = \frac{IP_k}{TT'} \cdot 100$,
 T' liegt über P_n für $s < 1$,
 T' liegt unter P_n für $s > 1$

Abb. 55. Bestimmung des Schlupfes.
(a) für kleine, (b) für mittlere, (c) für größere Schlupfe.

Umgekehrt ergibt sich der Betriebspunkt P , der zu einem gegebenen Schlupf $s\%$ gehört, wenn man die Strecke TT' macht:

$$\text{Länge } TT' = \frac{\text{Länge } TP_k}{s\%} \cdot 100.$$

Für Werte des Schlupfes unter 20% ist diese Konstruktion weniger gut geeignet, daß sich zu lange Strecken TT' ergeben. Für Werte darüber, besonders für alle Werte über 100%, ist sie jedoch die bequemste, da sie die sichersten Schnittpunkte liefert.

Bestimmung von Anlaßwiderständen bei Stillstand und von Regelwiderständen bei Lauf des Motors. Aus der allgemein gültigen Beziehung:

$$\frac{R_{\text{anker}} + R_{\text{vorschalt}}}{s \cdot R_{\text{anker}}} = \frac{\text{Länge } TT'}{\text{Länge } TP_k} \quad (\text{Abb. 55 c}) \quad s = \text{Schlupf} = \frac{s\%}{100}$$

können folgende Gleichungen abgeleitet werden. R_{anker} ist der Eigenwiderstand des Läufers und $R_{\text{vorschalt}}$ der außen an die Schleifringe angelegte Anlaßwiderstand, beide je Sternphase gerechnet.

a) Erzielung eines gewünschten Anlaufdrehmomentes Md_a . Man suche Kreispunkt P , der dieses Drehmoment besitzt, und der auf dem stabilen Bogen zwischen Leerlauf P_0 und Kippunkt liegen muß. Die Verbindungsgerade von P_0P schneidet die Senkrechte durch P_k in T' . Die Länge $T'P_k$ ist ein Maß für den vorzuschaltenden Anlaßwiderstand $R_{\text{vorschalt}}$ und die Länge TP_k ein Maß für den Läuferigenwiderstand R_{anker} . Es gilt:

$$R_{\text{vorschalt}} = R_{\text{anker}} \cdot \frac{\text{Länge } T'P_k}{\text{Länge } TP_k}.$$

b) Regelwiderstände bei Lauf. Wenn der Asynchronmotor durch Regelwiderstände in der Drehzahl herabgeregelt werden soll, so geht man folgendermaßen vor. Man bestimmt zum gewünschten Drehmoment Md den Kreispunkt P auf dem stabilen Bogen zwischen P_0 und dem Kippunkt. Die Verbindungslinie P_0P trifft die Senkrechte durch P_k in T' . Der zur Erzielung des Schlupfes $s = s\%/100$ nötige vorzuschaltende Widerstand ergibt sich zu:

$$R_{\text{vorschalt}} = R_{\text{anker}} \cdot \left(s \cdot \frac{\text{Länge } TT'}{\text{Länge } TP_k} - 1 \right).$$

Dieser Wert wird Null, wenn ein Schlupf erreicht werden soll, der bereits dem normalen Schlupf der Maschine entspricht. Negative Werte bedeuten, daß eine Regelung auf eine Drehzahl erzielt werden soll, die über der normalen Geschwindigkeit des Motors liegt. Dies ist nicht möglich.

c) Welche Lastdrehzahl stellt sich ein, wenn Regelwiderstände verwendet werden? Man berechnet den Schlupf, der zum Drehmoment entsprechend Kreispunkt P gehört, zu:

$$s = \frac{s\%}{100} = \left(1 + \frac{R_{\text{vorschalt}}}{R_{\text{anker}}} \right) \cdot \frac{\text{Länge } TP_k}{\text{Länge } TT'}.$$

Allgemeine Beziehungen. Streufaktoren: Man gebraucht in der Praxis zwei verschiedene Streufaktoren für die Gesamtstreuung des

Motors, von denen der nach HEYLAND und der nach OSSANNA die meistbenutzten sind. Sie können berechnet werden zu:

$$\tau_{\text{Heyland}} = \frac{I_0}{I_{k_i} - I_0}, \quad \tau_{\text{Ossanna}} = \frac{I_0}{I_{k_i}}, \quad I_{k_i} \approx \frac{I_k}{\sin \varphi_k},$$

$$(1 + \tau_{\text{Heyland}}) = \frac{1}{(1 - \tau_{\text{Ossanna}})},$$

Es ist $\tau_{\text{Heyland}} = \frac{X_1 X_2}{M^2} - 1$ und $\tau_{\text{Ossanna}} = 1 - \frac{M^2}{X_1 X_2}$.

X_1 = Gesamtblindwiderstand je Ständerphase,

X_2 = Gesamtblindwiderstand je Läuferphase,

M = Widerstand der Gegeninduktivität.

Kippmoment. Das von einem Asynchronmotor abgebbare Höchstdrehmoment läßt sich in guter Annäherung bestimmen, wenn man den Leerlauf- und den Kurzschlußversuch gemacht hat, zu:

$$Md_{\text{max}} \text{ in mkg} = \frac{0,973}{n_{\text{syn}}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot (I_{k_i} - I_0)}{2 + \cos \varphi_k} \quad \text{mit} \quad I_{k_i} \approx \frac{I_k}{\sin \varphi_k}.$$

Motorhöchstleistung. Die größte mechanische Leistungsabgabe an der Welle in Kilowatt kann ebenfalls auf Grund des Leerlauf- und des Kurzschlußversuches angegeben werden zu:

$$N_{2\text{max}} \text{ in kW} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot (I_{k_i} - I_0)}{1000 \cdot (2 + 2 \cos \varphi_k)}.$$

Beste Leistungsfaktor. Der Höchstwert des $\cos \varphi$ wird erreicht, wenn der Ständerstrom im Diagramm den Kreis berührt. Sein Wert ist

$$\cos \varphi_{\text{max}} = \frac{I_{k_i} - I_0}{I_{k_i} + I_0} = \frac{1}{1 + 2\tau_{\text{Heyland}}} = \frac{1 - \tau_{\text{Ossanna}}}{1 + \tau_{\text{Ossanna}}}.$$

Man erkennt an allen Gleichungen die innigen Beziehungen mit dem Verhältnis von Leerlaufstrom zu Kurzschlußstrom, also mit den Gesamtstreufaktoren der Maschine.

b) Polumschaltbare Asynchronmaschinen.

Ein wachsendes Anwendungsgebiet finden die Asynchronmaschinen mit mehreren Drehzahlen, die durch Polumschaltung der Wicklungen erzielt werden können. In der Mehrzahl der Fälle wird nur die Ständerwicklung, die entweder aus einer einzigen in Gruppen aufgeteilten oder aus mehreren getrennten Wicklungen besteht, umgeschaltet. Der Läufer muß dann natürlich einen Kurzschlußkäfig oder aber eine für alle vorkommenden Polzahlen wirksame, in sich kurzgeschlossene Phasenwicklung tragen. Ist Regelung des Anlaufvorganges oder der Drehzahl über Schleifringe erforderlich, so muß auch die Wicklung (oder die Wicklungen) des Läufers zu einer Anzahl von Ringen geführt sein, über welche dann durch ruhende oder durch mitumlaufende Umschaltvorrichtungen die Polumschaltung stattfindet. Zur Verringerung der

Anzahl der benötigten Schleifringe ist die Phasenzahl in diesem letzteren Fall häufig gleich Zwei, während die Ständerphasenzahl immer gleich der Netzphasenzahl ist. Die Wicklungen der Motoren bestehen, wenn sie für zwei oder mehrere Polzahlen umschaltbar sind, vorteilhafterweise aus Zweischichtformspulen geeigneter Spulenweite in besonderer Anordnung, wodurch gegenüber den Einschichtwicklungen beträchtlich bessere Feldkurven erreicht werden.

Die Prüfung dieser polumschaltbaren Maschinen, die durchweg als Motoren Anwendung finden, erstreckt sich zu allererst auf die Kontrolle der richtigen Schaltung, die in einfacher und zumeist auch hinreichend sicherer Weise durch Messung des Widerstandes der jeweils umgeschalteten Wicklungen erfolgt. An Hand des zur Probe notwendigen Schemas, das die Schaltung der Wicklungen bei den einzelnen Polzahlen in klarer Weise darstellt, können die Sollwerte der jeweiligen Phasenwiderstände geprüft werden. Stimmt die Messung mit dem Sollwert überein, so erfolgt die Kontrolle auf richtigen Drehsinn. Dabei ist zu beachten, daß die Klemmenbezeichnungen des Ständers dann richtig sind, wenn bei Anschluß der Netzphasen *RST* an die Motorklemmen *UVW* sich stets derselbe Drehsinn einstellt. Die verschiedenen Geschwindigkeiten werden am besten durch Fußbezeichnungen mittels Zahlen festgelegt, welche die Zahl der Pole angeben.

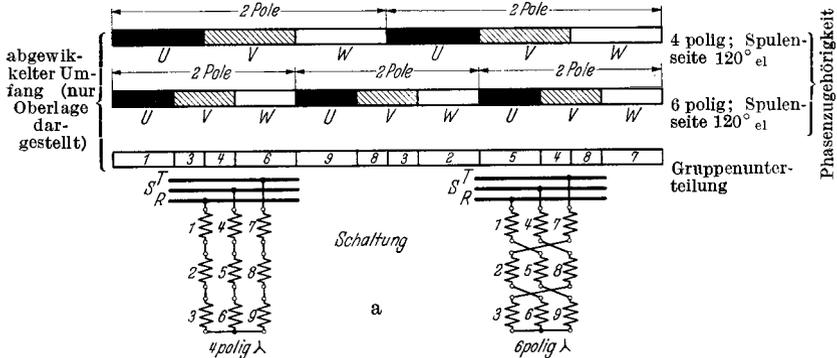
Sehr wichtig ist die Beobachtung etwaiger Ausgleichströme in den jeweils nicht an das Netz angeschlossenen weiteren Wicklungen. Solche Ströme können in gewissen Fällen durch parallel geschaltete Gruppen oder bei Dreieckschaltungen und Polzahlverhältnissen von 1:3 auftreten, während sich im allgemeinen bei in Reihe geschalteten Strängen die induzierende Wirkung eines Feldes fremder Polzahl aufhebt. Die Feststellung dieser nur unnötige Verluste und zusätzliche Erwärmung verursachenden Ausgleichströme erfolgt durch Einschalten von Strommessern in den Strompfad der zu untersuchenden Wicklung. Werden bei der Prüfung Ausgleichströme innerhalb einer Dreieckschaltung festgestellt, so muß am Polumschalter eine zusätzliche Einrichtung zum Öffnen des Dreiecks bei nichtbenutzter Wicklung vorgesehen werden. Liegt dagegen Induzierung von parallel geschalteten Zweigen vor, so hilft oft nur die Neuwicklung unter Vermeidung der zum Fehler führenden Parallelschaltung.

Die übrige Prüfung erfolgt für jede Polzahl getrennt genau wie bei jeder normalen Asynchronmaschine. Der Dauerlauf zur Ermittlung der Erwärmung kann für die zweite und die weiteren Geschwindigkeiten häufig zur Ersparnis an Zeit im Anschluß an den ersten Lauf vorgenommen werden.

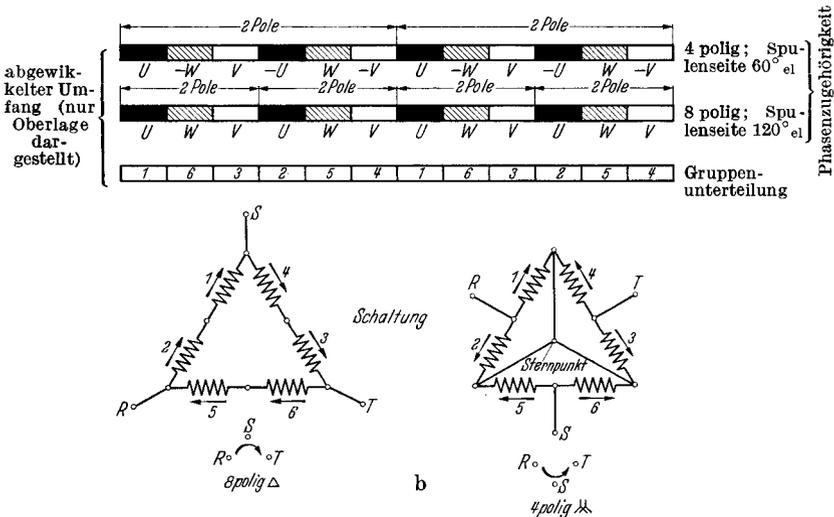
Eine zusätzliche Probe ist die des Überschaltversuches vom Lauf in einer Geschwindigkeit auf die folgende. Sie dient zur Messung der Überschaltströme und der Überschaltdrehmomente und kann erklärlicherweise nur mittels oszillographischer Aufnahme ausgewertet werden.

Da der zugehörige Polumschalter bei der Erprobung der Maschine nicht immer zur Verfügung steht und mit den üblichen Prüffeldeinrichtungen seine Wirkungsweise nicht leicht nachgeahmt werden kann,

verzichtet man — auch bei Gewährleistung der Überschaltwerte — meist auf die Vornahme des Versuches und bestimmt die Größen für Strom und Drehmoment in hinreichend genauer Weise aus dem für die einzelnen



a) Beispiel einer polumschaltbaren Wicklung für zwei beliebige Polzahlen. Unterteilung in 9 Spulengruppen, aus denen durch Umschaltung die 3 Stränge gebildet werden.



b) DAHLANDERSCHALTUNG für Polumschaltung im Verhältnis 1 : 2. Unterteilung der Wicklung in 6 Gruppen, aus denen meist ohne innere Umschaltung durch Verlegung der Netzanschlüsse und Bildung eines Sternpunktes die beiden Polzahlen entstehen. Man beachte den Tausch zweier Netzanschlüsse, da sich die Drehrichtung sonst umkehrt.

Abb. 56. Polumschaltung bei beliebigem Polverhältnis (a) und bei einem solchen von 1 : 2 (b).

Drehzahlen berechneten und an Hand der Meßwerte nachgeprüften „Kreisbildes“. Dabei findet man die Überschaltpunkte, wenn man überlegt, welchen Schlupf der Motor bei der neuen Polzahl hat. Wird z. B. ein mit 490/min laufender Motor aus der 12poligen Schaltung auf die 8polige Wicklung mit der synchronen Drehzahl 750/min umgeschaltet, so liegt der Betriebspunkt unmittelbar nach dem Umschalten bei einem

Schlupf von $(750 - 490):750 = 34,6\%$. Wenn die Läuferwiderstände nicht allzu hoch sind, entspricht der Umschaltzeitpunkt etwa dem Kurzschlußzeitpunkt bei der neuen Polzahl, so daß in erster Annäherung bei solchen Maschinen der Überschaltstrom gleich dem Kurzschlußstrom gesetzt werden darf. Das Drehmoment hängt allerdings stark vom Schlupf selbst ab und sollte daher immer dem „Kreisbild“ entnommen werden.

Da man häufig beim Stillsetzen der polumschaltbaren Motoren Gebrauch von der übersynchronen Bremsung durch Rückschaltung von der hohen Drehzahlstufe auf die nächstkleinere macht, ist manchmal auch die Frage nach den hierbei auftretenden Momenten und Strömen zu beantworten. Sie geschieht ebenfalls am besten durch Auswertung der Angaben der Kreisbilder unter Berücksichtigung des nunmehr negativen Wertes des Schlupfes. Die mit z. B. 990/min laufende 6polige Maschine hat nach der Rückschaltung auf 12 Pole mit einer synchronen Drehzahl von 500/min im ersten Augenblick einen Schlupf von $(500 - 990):500 = -98\%$.

Zwei der meistgebräuchlichen Polumschaltungen sind in Abb. 56 wiedergegeben, und zwar 1. die Umschaltung mittels Gruppeneinteilung der einzelnen Phasen in je drei Teile und 2. die Polumschaltung im Verhältnis 1:2 nach DAHLANDER. Die Schaltung kann gewöhnlich für jede Polzahl in Dreieck oder Stern erfolgen und richtet sich nach der verlangten Leistung; jedoch entscheidet oft der einfachere Aufbau des Umschalters und auch die innere Maschinenschaltung für bestimmte Schaltungen der Phasen, die nicht immer den vorliegenden Lastverhältnissen am besten entsprechen.

c) Der Asynchrongenerator.

Wirkungsweise. Die Asynchronmaschine geht wie jede elektrische Maschine mit Nebenschlußverhalten bei einer die Leerlaufdrehzahl übersteigenden Geschwindigkeit in den Generatorbetrieb über. Der Anker läuft dann schneller als das synchron rotierende Ständerdrehfeld, er läuft also übersynchron. Dem antreibenden Drehmoment an der Kupplung, das meistens von Wasserkraftmaschinen, seltener von Dampfmaschinen od. dgl. aufgebracht wird, setzt sich das generatorische Bremsdrehmoment der Maschine entgegen. Dieses hängt von der Höhe des übersynchronen Schlupfes ab und besitzt wie das Drehmoment bei Motorbetrieb einen Höchstwert, der etwas größer ist als jener. Die Ströme und Leistungen lassen sich ebenfalls dem Kreisbild entnehmen. Der Generatorbetrieb beginnt etwas unterhalb des Punktes P_0 und reicht über den unteren Kreisbogen hinweg bis zum Punkt P_∞ . Dieser gilt also gleichzeitig für unendlich hohe Drehzahlen im Sinne oder gegen den Sinn des Drehfeldes. Abb. 53 stellte bereits den Kreis dar, auf dem ein generatorischer Betriebspunkt besonders eingezeichnet ist. Die Auswertung der Messungen und die Errechnung des *Wirkungsgrades* erfolgt wie beim Asynchronmotor. Die Prüfung unterscheidet sich nicht, was den Leerlauf- und den Kurzschlußversuch betrifft. Nur die Belastungsaufnahmen werden im Generatorbetrieb gefahren, indem man die Maschine durch eine Prüffeldmaschine antreibt.

Der Schlupf des Generators ist entsprechend seiner Definition negativ und auch in den Formeln mit negativem Vorzeichen einzusetzen. Die Läuferkupferverluste, die aus Schlupf mal Luftspaltleistung berechnet werden, sind positiv, da auch die Luftspaltleistung jetzt negativ geworden ist. Diese ist größer als die Netzleistung, und zwar um den Betrag der im Ständer auftretenden Verluste. Die mechanisch zuzuführende Leistung an der Welle ist um die Läuferverluste größer als die Luftspaltleistung. Man erkennt dies am Leistungsflußbild in Abb. 57. Die Leistung ein und derselben Asynchronmaschine als Generator ist größer als die als Motor. Sie verhält sich zu ihr etwa wie 1:Motorwirkungsgrad. Eine gewisse Verringerung hiergegen tritt jedoch auf, wenn der Leistungsfaktor kleiner als der bei Motorbetrieb wird.

Zum Betrieb des Asynchrongenerators, der übrigens meistens mit einem Kurzschlußanker ausgerüstet wird, ist ein leitendes Netz nötig. Dieses liefert den zur Magnetisierung nötigen Blindstrom. Die Frequenz des Generators stimmt mit der Netzfrequenz überein. Die Wirkleistungsabgabe hängt nur von der Drehzahl ab und diese stellt sich, falls das Antriebsmoment nicht etwa das generatorische Kippmoment überschreitet, ganz automatisch entsprechend der zur Verfügung stehenden Antriebsleistung ein. Sie liegt 1 bis 3 % über der Synchrondrehzahl. Der Asynchrongenerator eignet sich gut für unbemannte kleine Wasserkraftwerke, besonders da er keinerlei Regelorgane für Frequenz und Spannung braucht.

Der Asynchrongenerator kann in Verbindung mit Kondensatoren zur Selbsterregung kommen und Spannung halten, jedoch macht man hiervon sehr wenig Gebrauch. Er erregt sich im Leerlauf auf jene Spannung, wo sein Blindlastbedarf genau gleich ist der Blindleistungsabgabe des parallel liegenden Kondensators.

d) Der Einphasenasynchronmotor.

Wirkungsweise. Der normale Drehstromasynchronmotor läuft als Einphasenmotor weiter, wenn bei Lauf einer der drei Netzanschlüsse unterbrochen wird. Die thermische Leistungsfähigkeit sinkt um etwa 30 bis 40 % und der Leistungsfaktor geht um einige Einheiten zurück. Da sich das Kippmoment beträchtlich, und zwar auf etwa die Hälfte verringert, muß die Leistung der Maschine unter Umständen sogar um 40 bis 50 % zurückgesetzt werden. Der Ständer des Einphasenmotors besitzt häufig eine normale Drehstromwicklung. Der eine Strang dient

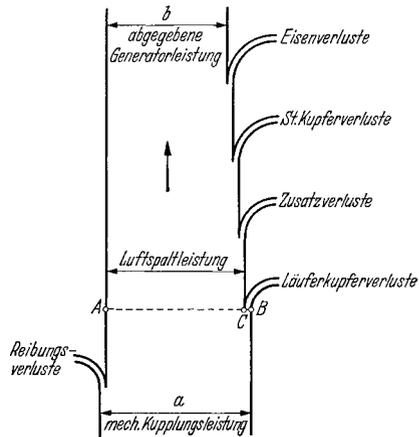


Abb. 57. Wirkleistungsfluß der Asynchronmaschine als Generator. Strecke AC entspricht der synchronen Drehzahl, Strecke AB der wirklichen Drehzahl und Strecke BC dem Schlupf.

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{b}{a}.$$

als Hilfswicklung zum Anlassen und die beiden anderen in Reihe geschalteten Stränge sind die eigentliche Haupt- oder Arbeitswicklung. Haupt- und Hilfswicklung können natürlich auch verschiedenartig ausgeführt werden. Ihre Achsen stehen aufeinander senkrecht.

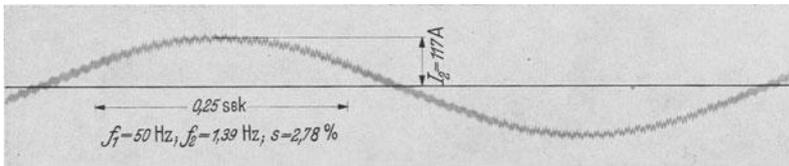
Der im Stillstand ohne Hilfsphase an das Netz gelegte Einphasenmotor entwickelt kein Drehmoment. Das auftretende Wechselfeld kann in zwei gegenläufige Drehfelder zerlegt werden; beide wirken mit gleichem, aber entgegengesetztem Drehmoment auf den Läufer ein. Sobald der Anker durch äußeren Antrieb oder bei Leerlauf durch eigene kleine Pendelungen in irgendeiner Drehrichtung angeworfen wird, wächst das mitläufige Drehfeld an, das gegenläufige wird kleiner und es ergibt sich ein überschießender Drehmomentbetrag in Drehrichtung, der beschleunigend auf den Anker einwirkt. Dieser läuft unter ständig anwachsendem Drehmoment hoch. Das Drehmoment erreicht einen Höchstwert und wird kurz vor Synchronismus zu Null. Praktisch erreicht der Motor die synchrone Drehzahl. Bei dieser und in ihrer Nähe ist das Gegendrehfeld fast verschwunden, das Mitdrehfeld hat seinen vollen Wert erreicht und ist genau so stark wie das einer Drehstrommaschine, die an einer verketteten Spannung gleich der einphasigen Spannung des Einphasenmotors liegt. Der einphasige Motor besitzt also im Stillstand ein reines Wechselfeld, im Anlauf ein elliptisches Drehfeld und bei Leerlauf und Betriebsdrehzahl ein nahezu kreisförmiges Drehfeld.

Im Anker fließen zwei ganz verschiedene Ströme, von denen der eine Schlupffrequenz hat, während die Frequenz des anderen nahezu doppelte Netzfrequenz ist. Genau beträgt sie: (Doppelte Netzfrequenz — Schlupffrequenz). Die beiden Ströme sind praktisch gleich groß, der höherfrequente Strom ist etwas größer als der andere. Bei Leerlauf verschwindet der schlupffrequente Strom, während der andere dem halben Ständerstrom das magnetische Gleichgewicht hält. Daher muß auch der Leerlaufstrom, der dem Netz entnommen wird, größer als bei Dreiphasenbetrieb sein, wo eine gegenmagnetisierende Ankerrückwirkung im Leerlauf nicht auftritt. Der Leerlaufstrom ist rund $\sqrt{3}$ mal so groß wie bei Dreiphasenmaschinen. Öffnet man dagegen den Ankerkreis der Einphasenmaschine, so daß die Gegen-AW des Ankers entfallen, so sinkt der Leerlaufstrom auf die Hälfte; die Maschine arbeitet wieder mit einem reinen Wechselfeld, und an den Schleifringen tritt eine hohe Spannung doppelter Netzfrequenz auf. Die Ankerkupferverluste errechnen sich aus Phasenzahl mal Widerstand mal Summe der Quadrate beider Ankerströme. Sie sind mehr als doppelt so hoch wie die eines mit gleichem Drehmoment belasteten Drehstrommotors. Der zeitliche Verlauf des Ankerstromes ist aus dem Oszillogramm der Abb. 58 zu erkennen. Errechnet werden die Verluste im Anker am besten zu: $V_{\text{cu}_2} \approx N_L \cdot (1 - v^2)$, wobei $v = (1 - s)$ und N_L die Luftspaltleistung ist. Bei kleinen Schlüpfen kann statt $(1 - v^2)$ auch in guter Annäherung $2s$, also der doppelte Schlupf gesetzt werden, so daß

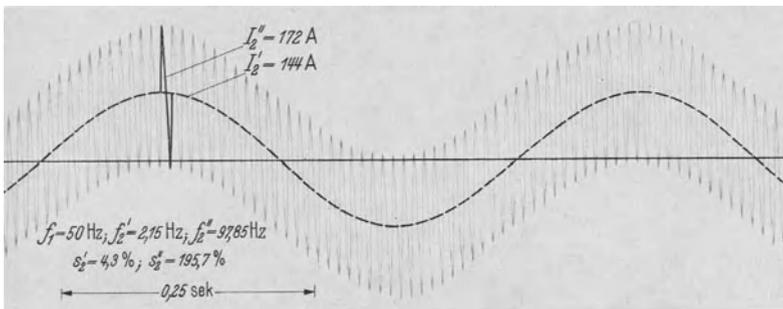
$$V_{\text{cu}_2} \approx N_L \cdot 2s$$

wird. Wie beim Diagramm gezeigt wird, kann $(1 - v^2)$ als „scheinbarer Schlupf“ in derselben Weise wie der wahre Schlupf des Drehstrommotors, und zwar einer Geschwindigkeitsquadratlinie entnommen werden. Die Näherungsformeln versagen im Synchronismus, wo sich rechnermäßig die Läuferverluste Null ergeben, obwohl der Strom doppelter Netzfrequenz geringe Verluste hervorruft.

Der Kurzschlußstrom des Einphasenmotors ist kleiner als der des entsprechenden Drehstrommotors; er beträgt $\frac{1}{2}\sqrt{3}$, also rund 87% desselben. Bei Motoren mit Hilfsphase unterscheidet man zwei Kurzschlußströme, die in getrennten Kurzschlußversuchen ermittelt werden.



a



b

Abb. 58. Oszillogramme des Sekundärstromes eines Asynchronmotors bei dreiphasiger (a) und bei einphasiger Speisung (b) bei gleichem Belastungsmoment.

Das Diagramm des Einphasenmotors ohne Hilfswicklung. Das Kreisdiagramm des Einphasenmotors, der nur mit einer Wicklung am Netz liegt, läßt sich in ähnlicher Weise wie jenes des Drehstrommotors aufzeichnen (Abb. 59). Man trägt den Leerlaufstrom und den Kurzschlußstrom unter Berücksichtigung des $\cos \varphi_0$ und des $\cos \varphi_k$ auf. Den Mittelpunkt M und den Punkt P_∞ findet man, wobei man nur einen kleinen Fehler begeht, auf die gleiche Weise wie bei Drehstrommotor. Besonders aufmerksam sei darauf gemacht, daß das Kreisbogenstück zwischen P_k und P_∞ nicht vorhanden ist, weil es keinen Lauf gegen das Drehfeld gibt, da dieses sich immer im Sinne der mechanischen Drehrichtung des Läufers dreht. Eine Drehmomentlinie ist nicht vorhanden und die mechanische Leistungslinie kann auch nur angenähert als Gerade durch den Leerlaufpunkt P_0 und den Stillstandspunkt P_k dargestellt werden. Die Schlupflinie wird beim Einphasenmotor durch die Geschwindigkeits-

quadratlinie ersetzt. Diese wird in der gleichen Weise wie die Schlupflinie beim Drehstrommotor eingetragen, nur entspricht der dortige Abschnitt s nunmehr dem Wert $(1 - v^2)$ und der dortige Restabschnitt $(1 - s) = v$ jetzt dem Wert v^2 . v stellt das Verhältnis (Motordrehzahl) : (Synchrondrehzahl) dar. $(1 - v^2)$ ist gleich dem Produkt des Schlupfes gegenüber dem Mitfeld s und des Schlupfes gegenüber dem Gegenfeld $(2 - s)$, wie aus der Beziehung $s = (1 - v)$ und $(2 - s) = (1 + v)$

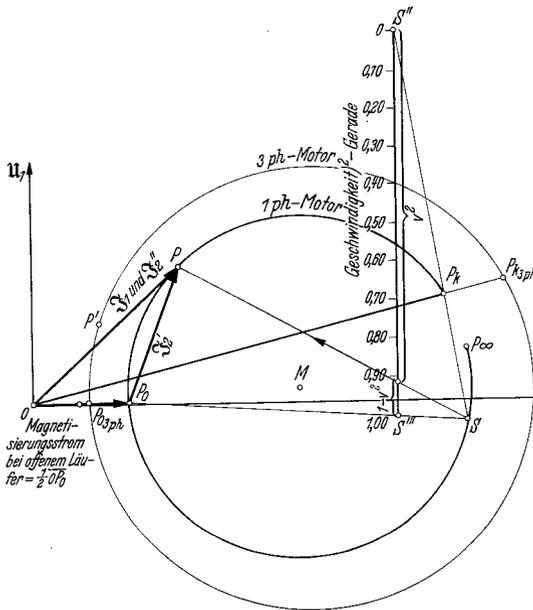


Abb. 59. Kreisdiagramm des Einphasenasynchronmotors mit zum Vergleich eingetragenen Kreis des Dreiphasenmotors. (Man beachte, daß der Leistungsmaßstab beim 1_{ph}-Motor kleiner als beim 3_{ph}-Motor ist. Punkt P' entspricht dem gleichen Moment wie Punkt P.)

ohne weiteres ersichtlich ist. Für Geschwindigkeiten in der Nähe der synchronen Drehzahl wird $(1 - v^2)$ angenähert zu $2s$; man kann daher für Punkte zwischen Leerlauf und Vollast den Schlupf wie beim Drehstrommotor entnehmen, muß aber den abgegriffenen Wert durch 2 teilen. Die Läuferkupferverluste werden praktisch genau erhalten, wenn man den „scheinbaren Schlupf“, also $(1 - v^2)$ abgreift und mit diesem Wert die Luftspaltleistung $N_L = N_1 - V_{\text{stator}}$ malnimmt. Man sieht, wie oben bereits angegeben, daß die Kupferverluste des Läufers praktisch mit dem doppelten Schlupf zu er rechnen sind.

Der Ständerstrom, der Leistungsfaktor und die Netzleistungsaufnahme können dem Kreis zu jedem Betriebspunkt P entnommen werden. Die mechanische Nutzleistung wird angenähert mittels der Leistungslinie durch $P_0 P_k$ abgegriffen. Das Drehmoment muß dagegen über den Wirkungsgrad bestimmt werden.

Der Läuferstrom von Schlupffrequenz J_2 und der Läuferstrom von fast doppelter Netzfrequenz J_2'' können in guter Annäherung als die Strecken PP_0 und PO dem Kreisbild entnommen werden.

Die Maßstäbe berechnet man zu:

Primärer Strommaßstab 1 mm = a_1 A (frei wählbar)

Sekundärer Strommaßstab 1 „ = a_2 A = $a_1 \cdot \frac{U_{\text{netz}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{schl,max}}}$

Leistungsmaßstab 1 „ = w W = $U_{\text{netz}} \cdot a_1$

Unter $U_{\text{schl,max}}$ ist die bei Messung der Übersetzung im Stillstand zwischen den Schleifringen auftretende Höchstspannung zu verstehen, die bei Speisung des Ständers mit der Netzspannung U_{netz} gemessen wird, wenn man den Anker so lange verdreht, bis der Ausschlag am Spannungsmesser am größten wird.

Das Kurzschlußdiagramm des Motors mit Hilfsphase. Das reine Wechselfeld des nur über eine Hauptwicklung gespeisten, stillstehenden Einphasenmotors kann in ein mehr oder weniger vollkommenes Drehfeld umgewandelt werden, wenn auch durch die senkrecht zur Hauptwicklung liegende Hilfswicklung Strom geleitet wird, der gegen den Strom der Hauptwicklung eine Phasenverschiebung von möglichst 90° besitzt. Abb. 60 zeigt die entsprechende Schaltung. Zur Erzielung einer Phasenverschiebung legt man vor die Hilfsphase entweder einen Ohmschen, induktiven oder kapazitiven Widerstand. Die Fläche des Dreiecks, welches durch den Kurzschlußstrom $\mathfrak{S}_{k_{\text{ha}}}$ der Hauptwicklung und den phasenverschobenen Anlaufstrom \mathfrak{S}_{hi} der Hilfswicklung begrenzt wird, ist ein Maß für das entwickelte Anlaufdrehmoment. Die Größe dieser Fläche ist direkt proportional dem senkrechten Abstand des Anlaufpunktes P_{hi} vom Stromvektor $\mathfrak{S}_{k_{\text{ha}}}$. Dieser Punkt wandert beim Vorschalten eines rein Ohmschen Widerstandes R_{vor} vor die Hilfswicklung auf einem Kreis, der durch den Kurzschlußpunkt $P_{k_{\text{hi}}}$ der Hilfswicklung und den Nullpunkt geht und dessen Mittelpunkt auf der Nulllinie liegt. Der Anlaufpunkt nähert sich dem Nullpunkt um so mehr, je größer der vorgeschaltete Widerstand ist (Abb. 60 c).

Bei Verwendung einer verlustlosen Drosselspule wandert der Anlaufpunkt P_{hi} auf einem Kreis, der wiederum durch $P_{k_{\text{hi}}}$ und 0 geht, dessen Mittelpunkt aber auf der Senkrechten durch 0 liegt. Er nähert sich mit wachsendem, induktivem Widerstand der Drossel dem Nullpunkt von rechts her. Wird statt der Drossel ein Vorschaltkondensator benutzt, so gilt als geometrischer Ort für den Anlaufpunkt derselbe Kreis, jedoch nähert sich der Anlaufpunkt bei wachsendem, kapazitivem Widerstand dem Nullpunkt über dem oberen Teil des Kreises (Abb. 60 b, a).

Man erhält die Punkte des höchsten Anlaufdrehmomentes in den drei verschiedenen Schaltungen, wenn man vom Mittelpunkt M des Kreises für den Strom der Hilfswicklung das Lot auf den Stromvektor $\mathfrak{S}_{k_{\text{ha}}}$ der Hauptphase fällt und dieses bis zum Schnitt mit dem Kreise verlängert. Der Schnittpunkt ist der gesuchte, beste Anlaufpunkt. Zur Erzielung des höchsten Anlaufdrehmomentes bemißt man die vorzuschaltenden Widerstände nach folgenden Formeln:

$$\text{a) } R_{\text{vor}} = \frac{U_{\text{netz}}}{I_{k_{\text{hi}}}} \cdot \left(\frac{\sin \varphi_{\text{ha}} \cdot \sin \varphi_{\text{hi}}}{1 - \cos \varphi_{\text{ha}}} - \cos \varphi_{\text{hi}} \right) \approx \frac{U_{\text{netz}}}{I_{k_{\text{hi}}}}.$$

Die Spannung am Widerstand R_{vor} beträgt rund 57 % der Netzspannung und der Strom im Widerstand rund 57 % des Kurzschlußstromes der Hilfswicklung, wenn $\cos \varphi_{\text{ha}} \approx \cos \varphi_{\text{hi}} \approx 0,5$.

$$b) X_{\text{Drossel}} = \frac{U_{\text{netz}}}{I_{k_{hi}}} \cdot \left(\frac{\cos \varphi_{ha} \cdot \cos \varphi_{hi}}{1 - \sin \varphi_{ha}} - \sin \varphi_{hi} \right) \approx \frac{U_{\text{netz}}}{I_{k_{hi}}}$$

Die Spannung der Drosselspule beträgt rund 57% der Netzspannung und der Strom rund 57% des Kurzschlußstromes der Hilfswicklung.

$$c) X_{\text{Kondensator}} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{U_{\text{netz}}}{I_{k_{hi}}} \cdot \left(\frac{\cos \varphi_{ha} \cdot \cos \varphi_{hi}}{1 + \sin \varphi_{ha}} + \sin \varphi_{hi} \right) \approx \frac{U_{\text{netz}}}{I_{k_{hi}}}$$

Die Spannung am Kondensator beträgt rund $U_{\text{netz}}/\cos \varphi_{hi}$ und der Strom rund $I_{k_{hi}}/\cos \varphi_{hi}$.

Es bedeuten: U_{netz} die Netzspannung des Einphasenmotors, $I_{k_{hi}}$ den Kurzschlußstrom der an voller Spannung liegenden Hilfswicklung, $\cos \varphi_{hi}$ den dazugehörigen Leistungsfaktor und $\cos \varphi_{ha}$ den Kurzschlußleistungsfaktor der Hauptwicklung. Die jeweils rechts angegebenen Näherungsformeln gelten

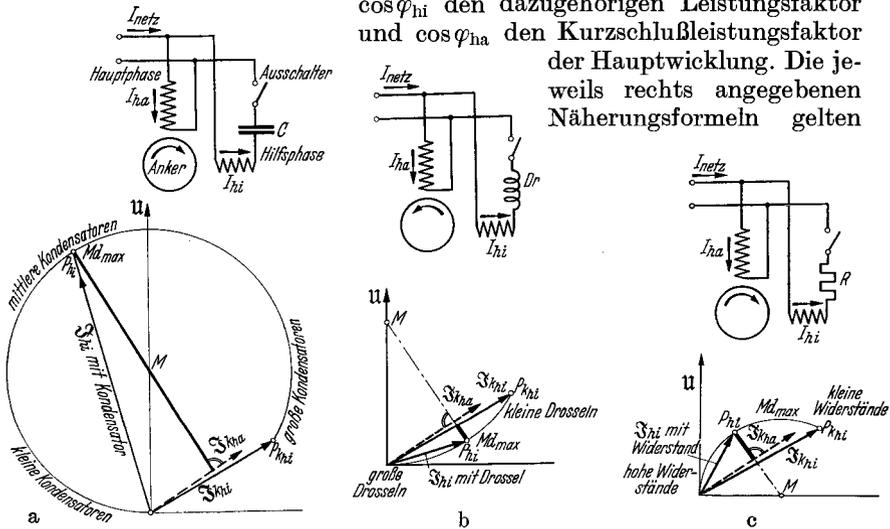


Abb. 60. Anlaufschaltungen und Stillstandsdiagramme des Einphasenmotors mit Hilfsphase. In den Diagrammen sind die Punkte des höchsten Anlaufmomentes eingetragen; die Momente werden durch die stark ausgezogenen Strecken wiedergegeben.

ganz genau, wenn die Kurzschluß-Leistungsfaktoren von Haupt- und Hilfswicklung miteinander übereinstimmen. Man kann folgende einfache Regel ableiten:

Der vorzuschaltende Widerstand Ohmscher, induktiver oder kapazitiver Art muß genau so groß sein wie der Kurzschlußscheinwiderstand der Hilfswicklung. Er muß also einen Ohmwert besitzen gleich $U_{\text{netz}}/I_{k_{hi}}$.

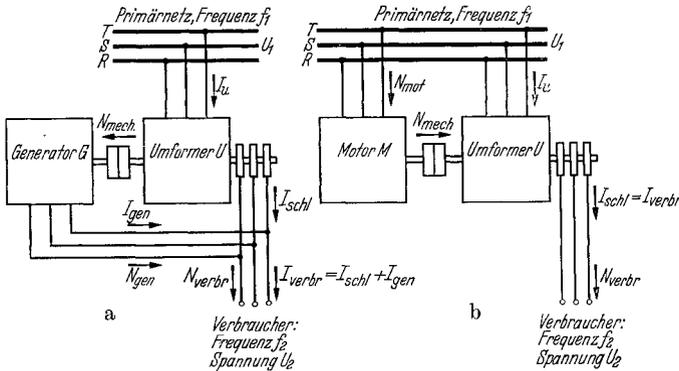
Erzielung des höchsten Anfahr Drehmomentes. Man erhält die höchsten Anfahr Drehmomente im allgemeinen mit Kondensatoren. Ein Ohmscher Widerstand ist der Drossel vorzuziehen, wenn der Kurzschlußleistungsfaktor der Hauptwicklung unter 0,7 liegt. Eine Drossel gibt höhere Momente als der Widerstand, wenn der Kurzschlußleistungsfaktor der Hauptwicklung über 0,7 liegt. Zu bemerken ist, daß eine Drossel Anlauf in der einen, Widerstand und Kondensator Anlauf in der anderen Richtung ergeben. Die Umkehr der Drehrichtung erfolgt durch Vertauschen der Anschlüsse einer der beiden Wicklungen.

Einphasenmotoren mit Kondensatoren laufen häufig bei voller Drehzahl mit einem Teil des Kondensators in der Hilfsphase weiter. Bei Verwendung von Drossel oder Widerstand muß dagegen die Hilfsphase unbedingt nach erfolgtem Hochlauf durch einen einpoligen Schalter abgetrennt werden.

Außer den behandelten Schaltungen gibt es noch eine Reihe anderer Anordnungen, von denen nur jene erwähnt werden mögen, bei denen man zwei Phasen eines normal gewickelten Drehstrommotors in Sternschaltung als Hauptwicklung benutzt, während man die dritte Motor клемme über Widerstand, Drossel oder Kondensator an eine der beiden Netzleitungen anschließt. Die dritte Ständerphase, die also die Hilfswicklung darstellt, liegt dann mit dem anderen Ende am Mittelpunkt der Hauptphase.

e) Der Periodenwandler.

Wirkungsweise. Die Schaltung der Asynchronmaschine als Perioden- oder Frequenzwandler ist in Abb. 61a und b dargestellt. Bei Frequenz-



Schaltung A: Frequenzverringern $f_2 < f_1$

Schaltung B: Frequenzerhöhung $f_2 > f_1$

Abb. 61. Schaltung des Periodenwandlers.

erhöhung (B) benötigt der Umformer einen motorischen Antrieb, bei der Frequenzverringern (A) muß er dagegen durch einen Generator gebremst werden. Die Drehzahl beider Maschinen ist:

$$n = (f_1 - f_2) \cdot \frac{120}{2p_u}$$

wobei

- f_1 = primäre Netzfrequenz,
- f_2 = Verbraucherfrequenz,
- $2p_u$ = Polzahl des Umformers ist.

Eine negative Drehzahl bedeutet Lauf gegen das Drehfeld, eine positive dagegen Lauf mit dem Feld.

Die Wirk- und Blindleistungen verteilen sich bei verlustlosen Maschinen entsprechend der Darstellung in Abb. 62a und b. Es gelten die Gleichungen:

1. Frequenzerniedrigung, also $f_2 < f_1$ (Schaltung A)

$$N_{\text{wirkUmformer}} = N_{\text{wirkVerbraucher}},$$

$$N_{\text{blindUmformer}} = N_{\text{blindVerbraucher}} \cdot \frac{f_1}{f_2} + N_{\text{blindGenerator}} \cdot \frac{f_1}{f_2},$$

$$N_{\text{wirkGenerator}} = \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) \cdot N_{\text{wirkVerbraucher}}.$$

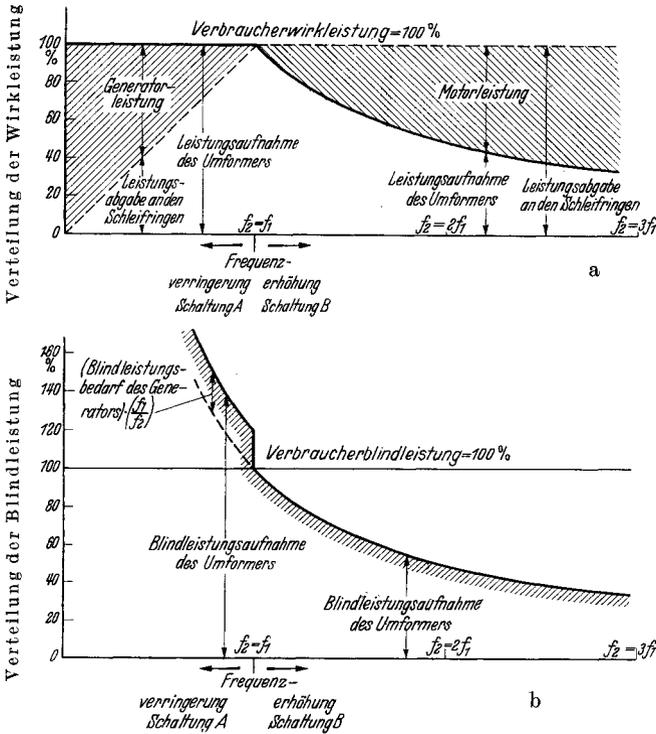


Abb. 62. Verteilung der Wirk- und Blindleistungen beim verlustlosen Periodenwandler.

2. Frequenzerhöhung, also $f_2 > f_1$ (Schaltung B)

$$N_{\text{wirkUmformer}} = \frac{f_1}{f_2} \cdot N_{\text{wirkVerbraucher}},$$

$$N_{\text{blindUmformer}} = \frac{f_1}{f_2} \cdot \text{blindVerbraucher},$$

$$N_{\text{wirkMotor}} = \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right) \cdot N_{\text{wirkVerbraucher}}.$$

Wegen der unvermeidlichen Verluste weichen die tatsächlich auftretenden Leistungen nicht unbedeutend von diesen Werten ab.

Die Prüfung des Periodenwandlers besteht in der Vornahme von Leerlauf und Kurzschluß bei der Betriebsdrehzahl. Diese Versuche sind zur Zeichnung des Diagrammes erforderlich. Ergänzt werden sie durch die Messung der Übersetzung bei Stillstand und den Kurzschlußversuch

bei Stillstand. Wenn möglich, wird der Wandler mit richtigem sekundärem Leistungsfaktor belastet. Der Dauerlauf wird immer gefahren, wobei besonders der Eisenerwärmung des Läufers Aufmerksamkeit zu schenken ist. Die unter Umständen recht hohe Sekundärfrequenz hat beträchtliche Eisenverluste zur Folge.

Der Leerlaufversuch. Zuerst wird die Übersetzung des stillstehenden Periodenwandlers wie bei einem normalen Asynchronmotor bestimmt, indem man die zugeführte Netzspannung U_1 und die induzierte Schleifringspannung U_{20} mißt. Man errechnet die Stillstandsübersetzung zu:

$$\dot{u}_{\text{still}} = \frac{\text{Netzspannung}}{\text{Schleifringspannung}},$$

wobei man die Schaltung von Läufer und Ständer unberücksichtigt läßt.

Anschließend wird derselbe Versuch bei Lauf mit Nenndrehzahl vorgenommen. Die Übersetzung hat sich nunmehr im Verhältnis der Frequenzwandlung verändert. Sie beträgt:

$$\dot{u}_{\text{lauf}} = \frac{\text{Netzspannung}}{\text{Schleifringspannung bei Lauf}} = \dot{u}_{\text{still}} \cdot \frac{f_1}{f_2}.$$

Die gemessene Leistungsaufnahme dient im wesentlichen zur Deckung der Eisenverluste. Die Reibungsverluste und der restliche Teil der Eisenverluste werden von der Antriebsmaschine her gedeckt.

Der Kurzschlußversuch. Außer der normalen Kurzschlußprobe bei stillstehender Maschine, die in der gleichen Weise wie bei jedem Asynchronmotor vorgenommen wird, erfolgt noch die Vornahme eines zweiten Kurzschlusses bei Nenndrehzahl. Das Primärnetz wird erst eingeschaltet, wenn der sekundär kurzgeschlossene Wandler auf Nenndrehzahl hochgefahren worden ist. Man vermeidet auf diese Weise, daß er unter Umständen auf seine eigene synchrone Drehzahl hochläuft. Bei beiden Kurzschlußversuchen wird die Leistung, der Strom und nach Möglichkeit auch der Strom der Sekundärseite gemessen.

Das Diagramm des Periodenwandlers in Schaltung B. Das Diagramm des Periodenwandlers gilt für konstante Werte auf der Primärseite U_1, f_1 und für gleichbleibende Drehzahl, also für gleiche Sekundärfrequenz f_2 . Es besteht aus einem Kreis, der durch den Leerlaufpunkt P_0 und den Kurzschlußpunkt P_{k, f_2} geht, die beide bei Lauf mit der Nenndrehzahl gemessen werden. Für jeden einzelnen Wert der sekundären Belastungs- $\cos\varphi$ gilt ein anderer Kreis, wobei der Bogen zwischen den beiden — allen Kreisen gemeinsamen — Punkten P_0 und P_{k, f_2} für fallende Werte von $\cos\varphi_2$ immer flacher wird, bis er bei einem bestimmten Leistungsfaktor zu einer Geraden entartet. Bei Leistungsfaktoren in der Nähe von Null liegt der bisher unten befindliche Mittelpunkt oben.

Die Konstruktion geschieht folgendermaßen: Man legt unter Berücksichtigung der betreffenden Leistungsfaktoren von 0 aus den Leerlaufstrom und den Kurzschlußstrom bei Lauf hin. Zu deren beiden Endpunkten P_0 und P_{k, f_2} und dem nur angedeuteten Kurzschlußpunkt P_k für Stillstand bestimmt man den Mittelpunkt M , der also der normale Kreismittelpunkt des Motorkreises ist. Dann zieht man die Mittelsenkrechte zu P_0 und P_{k, f_2} , die natürlich durch M hindurch-

geht. Auf dieser Geraden liegen alle gesuchten Kreismittelpunkte für die verschiedenen $\cos \varphi_2$ -Werte. Der Mittelpunkt zu einem bestimmten Wert des sekundären Leistungsfaktors wird ermittelt, indem man den Winkel φ_2 in P_0 an P_0M anträgt und den freien Schenkel mit der Mittelsenkrechten zu P_0P_{k, f_2} zum Schnitt bringt. Der Schnittpunkt ist der gesuchte Mittelpunkt. Nacheilende Phasenwinkel, die praktisch vor allem in Frage kommen, sind nach unten, voreilende nach oben anzutragen. In Abb. 63 ist die Zeichnung des Diagrammes wiedergegeben. Der Mittelpunkt trägt die Bezeichnung $M_{f_2, \cos \varphi_2}$, um daran zu erinnern, daß seine Lage sowohl

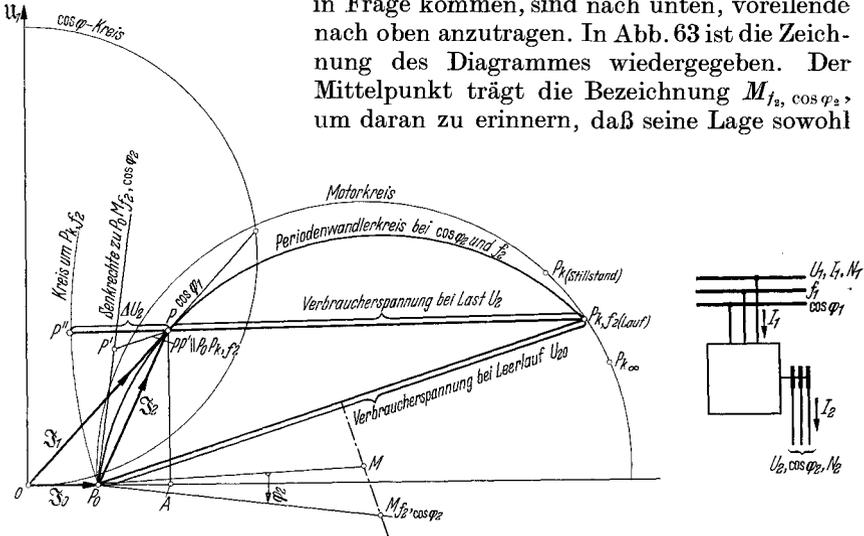


Abb. 63. Kreisbild des Periodenwandlers für $f_2 > f_1$ und φ_2 nacheilend. (S_2 = Schleifringstrom = Verbraucherstrom in Schaltung B; $\cos \varphi_2$ = Schleifringleistungsfaktor = Verbraucherleistungsfaktor in Schaltung B.)

von der Frequenz f_2 als auch von $\cos \varphi_2$ abhängt. Man sieht, daß der zuerst bestimmte Punkt M für alle Sekundärfrequenzen f_2 und für $\cos \varphi_2 = 1,0$ gilt. Das bedeutet, wie leicht einzusehen ist, daß der Motorbetrieb eines Asynchronmotors gleichbedeutend ist mit dem Betrieb eines Periodenwandlers, der auf Ohmsche Widerstände arbeitet.

Dem Kreisbild des Periodenwandlers können mit Hilfe der nachstehend berechneten Maßstäbe entnommen werden: $I_1, \cos \varphi_1, N_{1\text{schein}}$ und $N_{1\text{wirk}}$ auf der Primärseite sowie $U_{20}, U_2, \Delta U_2, I_2, N_{2\text{schein}}$ und $N_{2\text{wirk}}$ auf der Sekundärseite. Es gilt:

- | | |
|-------------------------------|---|
| Primärstrom | = $OP \cdot a_1$ |
| Primärleistungsfaktor | = Sehne im $\cos \varphi$ -Kreis |
| Primärscheinleistung | = $OP \cdot w_1$ |
| Primärwirkleistung | = $PA \cdot w_1$ |
| Sekundäre Leerlaufspannung | = $P_0 P_{k, f_2} \cdot u_2$ |
| Sekundäre Verbraucherspannung | = $PP_{k, f_2} \cdot u_2$ |
| Sekundärer Spannungsabfall | = $PP' \cdot u_2$ |
| Sekundärstrom | = $P_0 P \cdot a_2$ |
| Sekundärscheinleistung | = $P_0 P' \cdot w_2$ |
| Sekundärwirkleistung | = $P_0 P' \cdot w_2 \cdot \cos \varphi_2$ |

Die Maßstäbe werden errechnet zu:

Primärstrommaßstab	1 mm = a_1 A (frei wählbar)
Sekundärstrommaßstab	= a_2 A (= $a_1 \cdot U_1 / U_{20, \text{still}}$)
Primärleistungsmaßstab	= w_1 W (= $\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot a_1$)
Sekundärleistungsmaßstab	= w_2 W (= $w_1 \cdot \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{3} \cdot U_{2, \text{lauf}} \cdot a_2$)
Sekundärspannungsmaßstab	= u_2 V (= $\frac{U_{2, \text{lauf}}}{P_0 P_{k, f_2}}$)

Abb. 64 zeigt, wie der Schleifringstrom \mathfrak{I}_2 des Umformers in Schaltung *A* sich aus Verbraucher- und Generatorstrom zusammensetzt.

Die Belastung. Obwohl die Ermittlung des sekundären Spannungsabfalles mit Hilfe des Diagrammes sehr zuverlässige Werte gibt, wird man nach Möglichkeit doch eine unmittelbare Messung durchführen. Zur Übernahme der Wirklast wählt man am besten einen regelbaren Widerstand und zur Aufnahme der Blindlast eine leer laufende Asynchronmaschine, deren Spannung bei Frequenz f_2 nicht kleiner als die Sekundärspannung des Wandlers sein darf. Wenn ihr Magnetisierungsstrom zu klein ist, kann man sie auch im Stillstand als Drossel belasten, indem man zum Zwecke der Regelung der Stromaufnahme Ständer und Läufer in Reihe schaltet. Durch Verstellung des Läufers lassen sich die verschiedensten Werte des induktiven Widerstandes einstellen. Wenn

man die Phasen falsch verbunden hat, so tritt eine starke Verschiedenheit der Ströme auf. Man vertauscht zur Behebung des Fehlers zwei Zuleitungen zu den Schleifringen. Ein Bremshebel sichert den Stillstand der ein beachtliches Drehmoment entwickelnden Maschine. Durch Fremdluft (Preßluft) wird für geeignete Kühlung gesorgt.

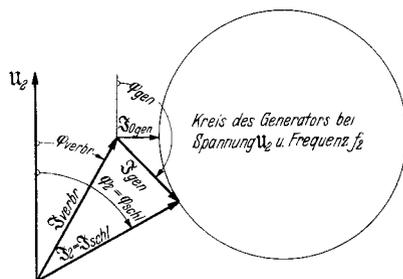


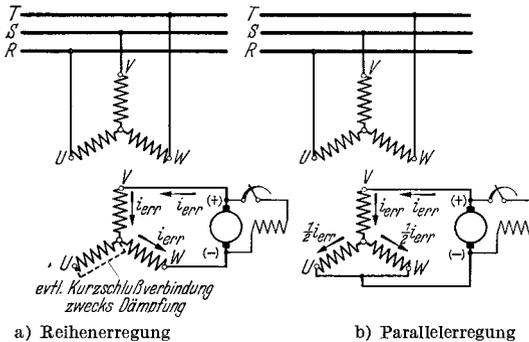
Abb. 64. Bestimmung des Schleifringstromes \mathfrak{I}_2 und des Schleifringleistungsfaktors $\cos \varphi_2$ aus Strom und Leistungsfaktor des Verbrauchers und des Generators in Schaltung *A*: Mittels \mathfrak{I}_2 und $\cos \varphi_2$ wird im Kreisbild nach Abb. 63 ΔU_2 , \mathfrak{I}_1 usw. gefunden.

f) Die synchronisierte Asynchronmaschine.

Wirkungsweise. Jede Asynchronmaschine kann durch Erregung des Sekundärkreises mit Gleichstrom synchronisiert werden und als Synchronmotor oder Synchrongenerator Verwendung finden. Eine solche Maschine vereinigt die Vorzüge beider Gattungen. Der Anlauf erfolgt mittels Anlasser bei kleinen Strömen mit beliebig starken Drehmomenten bis zur Höhe des asynchronen Kippmomentes, und bei Lauf kann der Leistungsfaktor bei entsprechender Auslegung auf jeden gewünschten Wert, insbesondere auf 1,0 oder voreilende Werte eingestellt werden. Nachteilig ist das geringe synchrone Kippmoment dieser Maschinen, dessen Ursache im kleinen Luftspalt begründet liegt. Durch Vergrößerung desselben oder durch Übererregung kann der Wert des Kipp-

momentes allerdings auf das 1,3- bis 1,4fache Nennmoment und darüber heraufgesetzt werden. Durch Parallelschalten zweier Läuferphasen oder Kurzschluß einer einzigen zwischen Pol und Sternpunkt erreicht man die bei Synchronmaschinen stets erwünschte Dämpferwirkung.

Die Schaltung der synchronisierten Asynchronmaschine ist in Abb. 65 dargestellt, und zwar für die meist gebräuchliche Sternschaltung des Sekundärkreises. Bei größeren Maschinen liegt der Sekundärkreis beim Anlauf zur Vermeidung zu hoher Läuferspannungen meistens in Dreieck; bei Betrieb erfolgt dann die Umschaltung mittels einer Schaltwalze in Stern. Seltener verwendet man die Dreieckschaltung des Ankers.



a) Reihen-erregung

b) Parallel-erregung

Abb. 65. Schaltung der synchronisierten Asynchronmaschine. Erregung über 2 Ringe (a) oder über 3 Ringe (b). Erregerstrom im Falle (a) $\sqrt{1,5} = 1,23$ mal, im Falle (b) $\sqrt{2} = 1,41$ mal so groß als dreiphasiger Sekundärstrom.

die Netzspannung klein ist und voreilender $\cos\varphi$ verlangt wird, vertauschen Ständer und Läufer die Rollen. Der Läufer wird ans Netz gelegt und der Ständer erregt. Dies hat den Vorzug der besseren Ausnützung des zur Verfügung stehenden Wickelraumes.

Die synchronisierte Maschine wird sowohl als Asynchronmaschine wie auch als Synchronmaschine geprüft. Am besten erfolgt die Niederschrift der Versuchsergebnisse in zwei entsprechenden Prüfungsnachweisen. Die einzelnen Proben sind also folgende: Messung der Übersetzung und Vornahme des Leerlauf-, Kurzschluß- und Belastungsversuches als Asynchronmotor und anschließend Leerlauf-, Kurzschluß- und Lastversuch mit Gleichstromerregung als Synchronmaschine. Die Belastungsaufnahmen als Synchronmaschine erfolgen mit konstanter Erregerstromstärke, wenn es sich um einen Motor handelt, da dieser meistens mit fest eingestelltem Vollasterregerstrom läuft. Die Prüfung eines Generators erfolgt mit konstanten Leistungsfaktoren. Nötig sind die Belastungsaufnahmen im Synchronbetrieb nicht, da die graphische Bestimmung des Erregerstromes bei gegebenem Leistungsfaktor, und umgekehrt, des Leistungsfaktors bei gegebenem Erregerstrom leicht und sicher erfolgen kann.

Das Diagramm der synchronisierten Maschine wird zweckmäßigerweise aus dem Diagramm der Asynchronmaschine entwickelt, woraus das verschiedenartige Verhalten beider Betriebsarten unmittelbar zu

Grundsätzliche Unterschiede bestehen, unabhängig von der Läufer-schaltung, nur darin, ob der Erregerstrom über einen Ring zu- und über einen zweiten Ring abgeführt wird, wobei der dritte Ring also stromlos bleibt, oder aber, ob der Strom über zwei durch einen Kurzschluß verbundene Ringe abfließt. Der erste Fall soll Reihen- und der zweite Parallel-erregung genannt werden. In manchen Fällen, wenn

ersehen ist. Abb. 66 zeigt die beiden miteinander vereinigten Diagramme, die aus den Meßergebnissen des asynchronen Leerlaufes und des asynchronen Kurzschlusses gezeichnet werden können. Das Asynchronkreisbild ist nach den Angaben der S. 101 gezeichnet und in der Darstellung zur Unterscheidung vom Synchronkreisbild nur schwach ausgezogen. Letzteres ist ein Kreis, der den Leerlaufpunkt P_0 zum Mittelpunkt und den Erregerstrom zum Radius hat.

Der Synchronkreis geht durch den gewünschten Betriebspunkt P . Den Maßstab für den Erregerstrom gewinnt man auf Grund folgender Überlegung: Der Zustand bei Reihenerregung ist identisch mit jenem

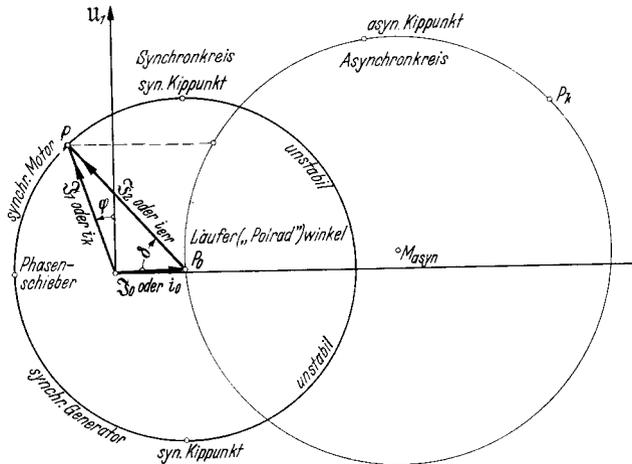


Abb. 66. Diagramm der synchronisierten Asynchronmaschine. (Dünn ausgezogen das Diagramm als normale Asynchronmaschine.)

Augenblickszustand bei Asynchronbetrieb, wo der Läuferstrom in einer Zuleitung gleich Null, in der zweiten gleich $+0,866 \cdot I_{\max}$ und in der dritten gleich $-0,866 \cdot I_{\max}$ ist. Bei der Parallelerregung ist der gleichwertige Augenblickszustand derjenige, wo in einer Zuleitung $+I_{\max}$ und in beiden anderen je $-0,5 \cdot I_{\max}$ fließt. Daraus ergibt sich, daß der gleichwertige Gleichstrom bei Speisung über zwei Schleifringe $0,866 \cdot \sqrt{2} = 1,23$ mal und bei Speisung über drei Schleifringe $\sqrt{2} = 1,41$ mal größer als der effektive Läuferwechselstrom sein muß. Der Erregerstrommaßstab ergibt sich also zu:

bei Reihenerregung über zwei Ringe

$$\text{Erregerstrommaßstab} = \text{Sekundärwechselstrommaßstab} \cdot 1,23$$

und

bei Parallelerregung über drei Ringe

$$\text{Erregerstrommaßstab} = \text{Sekundärwechselstrommaßstab} \cdot 1,41.$$

Der Sekundärwechselstrommaßstab ist in allen beiden Fällen, wie hier nochmals angegeben sei, zu bestimmen aus:

$$\text{Sekundärwechselstrommaßstab} = \text{Netzstrommaßstab} \cdot \frac{\text{Netzspannung}}{\text{Schleifringspannung}}.$$

Schleifringspannung ist die bei Stillstand an den Ringen zu messende Spannung bei Betriebsschaltung des Läufers. Als Erregerstrom gilt der der Erregerquelle zu entnehmende Strom, als Sekundärwechselstrom der in den Zuleitungen zu den Schleifringen fließende Strom und als Netzstrom der in den Netzzuleitungen auftretende Strom. Die Phasenströme, die bei Dreieckschaltung im Verhältnis $1:\sqrt{3}$ kleiner als die Linienströme sind, werden also nicht betrachtet.

Statt vom Primärstrommaßstab kann man aber auch wie bei den Synchronmaschinen vom Erregerstrommaßstab ausgehen, aus dem sich dann der Netzstrommaßstab durch Multiplikation mit I_0/i_0 oder mit I_{nenn}/i_k ergibt. i_0 ist der Leerlauf- und i_k der Kurzschlußerregerstrom, I_0 der asynchrone Netzleerlaufstrom und I_{nenn} der Netznennstrom.

Die erforderliche Erregerleistung ist, vom Einfluß der Verluste durch die Bürsten und die beiden Zuleitungen abgesehen, unabhängig von der Art der Erregerschaltung. Die Erregerspannung berechnet man aus Strom mal wirksamem Widerstand plus doppelter Wert des Abfalles in einer Bürste und einer Zuleitung. Hierfür kann man insgesamt 1,0 V einsetzen, wenn man für jede Bürste 0,3 und jede Zuleitung 0,2 V einsetzt. Wenn R_{schl} der Widerstand zwischen zwei Schleifringen in der normalen Läuferschaltung ist, dann beträgt die Erregerspannung:

Erregerspannung = Erregerstrom $\cdot R_{\text{schl}} + 1,0$ in Reihenerregung,

Erregerspannung = Erregerstrom $\cdot \frac{3}{4} \cdot R_{\text{schl}} + 1,0$ in Parallelerregung.

Zum schnellen Überschlagen des Erregerstromes, der benötigt wird, wenn man einen Asynchronmotor synchronisiert mit $\cos\varphi = 1,0$ fahren will, kann man folgende Formeln benutzen:

bei Reihenerregung über zwei Ringe

$$i_{\text{err,gl}} = 1,23 \cdot \frac{1000 \cdot N}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{schl}} \cdot \eta \cdot \cos\varphi_{\text{as}}} \approx \frac{780 \cdot N}{U_{\text{schl}} \cdot \cos\varphi_{\text{as}}},$$

bei Parallelerregung über drei Ringe

$$i_{\text{err,gl}} = 1,41 \cdot \frac{1000 \cdot N}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{schl}} \cdot \eta \cdot \cos\varphi_{\text{as}}} \approx \frac{900 \cdot N}{U_{\text{schl}} \cdot \cos\varphi_{\text{as}}}.$$

Hierbei bedeuten: N die Leistungsabgabe in kW, U_{schl} die Spannung zwischen zwei Schleifringen bei Stillstand in der betriebsmäßigen Läuferschaltung und η und $\cos\varphi_{\text{as}}$ Wirkungsgrad und Leistungsfaktor als Asynchronmotor. Beispielsweise muß ein Asynchronmotor für 375 kW, dessen Läuferstillstandsspannung 780 V, dessen Wirkungsgrad 92,5% und dessen Leistungsfaktor 0,85 beträgt, über zwei Ringe mit 435 A oder über drei Ringe mit 500 A erregt werden. Die rechts stehenden Näherungsformeln setzen einen Wirkungsgrad von 91% voraus.

Überbelastbarkeit. Die Betrachtung der beiden Kreise für den synchronen und den asynchronen Betrieb zeigt, daß die *Überbelastbarkeit* der synchronisierten Maschine erheblich kleiner ist, aber durch Verschieben des Nennlastpunktes P gegenüber dem Leerlaufpunkt P_0 nach links gesteigert werden kann. Höhere Erregung ist nötig, ob man nun diese Verschiebung durch Lauf mit voreilendem $\cos\varphi$ oder durch Ver-

größerung des Leerlaufstromes infolge entsprechender Vergrößerung des Luftspaltes erzielt.

Die Überlastbarkeit als Synchronmaschine läßt sich bei Betrieb mit $\cos\varphi = 1,0$ leicht überschlagen zu $\ddot{u} = Md_{\text{kipp}}/Md_{\text{nenn}} = 1/\cos\varphi_{\text{as}}$. Obiger Motor würde also eine Überlastbarkeit von $1/0,85 = 1,17$ besitzen. Bei Betrieb mit einem beliebigen, voreilenden $\cos\varphi_{\text{syn}}$ kann man die Überlastbarkeit bestimmen zu:

$$\ddot{u} = \frac{Md_{\text{kipp}}}{Md_{\text{nenn}}} \approx \frac{i_{\text{err}}}{i_k \cdot \cos\varphi_{\text{syn}}},$$

wobei i_{err} der tatsächliche Erregerstrom und i_k der bei Kurzschluß mit Nennstrom benötigte Erregerstrom ist.

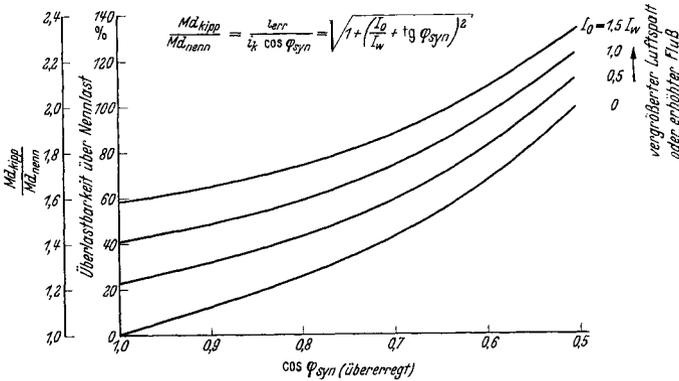


Abb. 67. Überlastbarkeit der synchronisierten Asynchronmaschine in Abhängigkeit vom Verhältnis (Leerlaufstrom : Wirkstrom) und vom synchronen Leistungsfaktor.

Wenn man den asynchronen Leerlaufstrom I_0 und den Wirkstrom I_w kennt, kann man \ddot{u} in Abhängigkeit vom synchronen $\cos\varphi_{\text{syn}}$ berechnen zu:

$$\ddot{u} = \frac{Md_{\text{kipp}}}{Md_{\text{nenn}}} = \sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_{\text{syn}}} + \left(\frac{I_0}{I_w}\right)^2 + 2 \cdot \frac{I_0}{I_w} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{syn}}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_0}{I_w} + \text{tg}\varphi_{\text{syn}}\right)^2}.$$

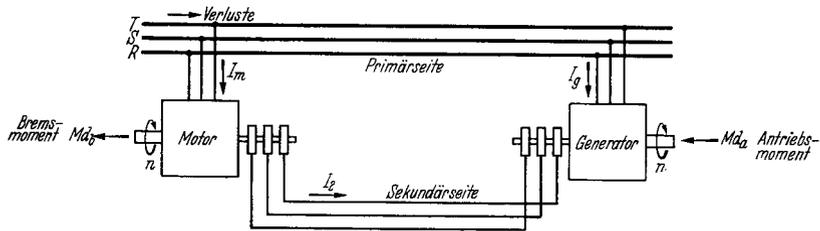
Man sieht, daß hohe Leerlaufströme, also große Luftspalte, und stark voreilender Leistungsfaktor das Kippmoment im günstigsten Sinne beeinflussen. In Abb. 67 sind die angegebenen Beziehungen kurvenmäßig dargestellt.

Allzu ängstlich braucht man wegen der geringen synchronen Überlastbarkeit nicht zu sein, wenn man in Parallelschaltung oder mit einer in sich kurzgeschlossenen Läuferphase arbeitet, da die aus dem Tritt gefallene Maschine eine hohe asynchrone Überlastbarkeit besitzt und nach Rückgang der Überlast meistens von selbst wieder in Tritt läuft.

g) Die elektrische Welle.

Aufbau. Zwei gleich große Asynchronmaschinen in der Schaltung nach Abb. 68 bilden eine sog. elektrische Welle, die sich im wesentlichen wie die darunter dargestellte mechanische Welle verhält. Die beiden

Wellenstümpfe haben genau die gleiche Drehzahl und der abtreibende Stumpf wird gegenüber dem angetriebenen Stumpf um einen von der Belastung abhängigen Winkel verdreht. Ein wesentlicher Unterschied besteht nur darin, daß bei der mechanischen Welle das abgegebene Bremsmoment Md_b wegen der unvermeidlichen Reibungsverluste immer kleiner als das zugeführte Antriebsdrehmoment Md_a ist, bei der elektrischen Welle dagegen auch der Fall eintreten kann, wo das abgegebene Drehmoment größer ist. Die elektrische Welle kann somit mit einem mechanischen Wirkungsgrad von über 1,0 arbeiten, und zwar geschieht dies bei Lauf im Sinne des Drehfeldes. Bei Lauf gegen das Drehfeld liefert die elektrische Welle auch weniger Drehmoment ab, als ihr zugeführt wird, arbeitet also mit einem Wirkungsgrad der Übertragung von unter 1,0.



Elektrische Welle, Motorläufer ist gegen Generatorläufer räumlich um Winkel α_{ei}/p zurückverdreht.



Mechanische Welle, Kupplung K_2 ist wegen Torsion um Winkel α gegen Kupplung K_1 zurückverdreht.

Abb. 68. Die elektrische Welle. Die Leistungsübertragung geschieht über die Primärseite bei Lauf mit dem Feld, über die Sekundärseite bei Lauf gegen das Feld. Bremsmoment Md_b ist bei mechanischer Welle wegen Lagerreibung kleiner als Antriebsmoment Md_a . Bei der elektrischen Welle ist es bei Lauf mit dem Feld größer, bei Lauf gegen das Feld kleiner als jenes.

Zu einer elektrischen Welle können auch mehr als zwei Maschinen vereinigt werden, die auch verschiedener Größe sein können. Nur müssen die Spannungen der Primär- und der Sekundärseite miteinander übereinstimmen. Nachstehend soll nur der praktisch wichtigste Fall von zwei gleichen Maschinen behandelt werden.

Die Wirkungsweise der Welle ist kurz folgende. Die Maschine, der das Antriebsdrehmoment Md_a zugeführt wird, also ein Drehmoment im Sinne der mechanischen Drehrichtung, versucht sich zu beschleunigen und gegen die andere Maschine vorzueilen. Dies hat eine Phasenverschiebung der sekundär induzierten Spannungen und somit das Auftreten eines ausgleichenden Stromes zur Folge. Die angetriebene Maschine wird zum Generator, die andere zum Motor. Der Austausch der Leistungen findet statt über die Primärseite, wenn die elektrische Welle mit dem Drehfeld läuft, und über die Sekundärseite, wenn sie gegen das Drehfeld arbeitet. Die überschüssige Schlupfleistung nimmt den umgekehrten Weg.

Das Antriebsdrehmoment und das Bremsdrehmoment können innerhalb des stabilen Arbeitsbereiches nur bis zu einem bestimmten Höchst-

wert gesteigert werden, bei dessen Überschreitung die Welle zerreißt. Bei Lauf mit dem Drehfeld bestimmt das höchstzulässige Antriebsdrehmoment, bei Lauf gegen das Drehfeld das höchstzulässige Bremsdrehmoment die Grenze.

Das Diagramm. Diese Verhältnisse lassen sich am besten im Diagramm der Welle nach Abb. 69 a, b übersehen. Das Diagramm gilt für konstante Drehzahl, also für konstanten Schlupf gegenüber dem Drehfeld. Man findet es als Kreis durch den Leerlaufpunkt P_0 und den zum Schlupf s gehörigen Kurzschlußpunkt P_s mit $P_0 P_s$ als Durchmesser. Beide Punkte liegen auf dem normalen Kreisdiagramm, auf dem P_s durch die übliche graphische Konstruktion oder durch einen wirklichen Kurzschlußversuch an einem mit der betriebsmäßigen Drehzahl laufenden Wellen-

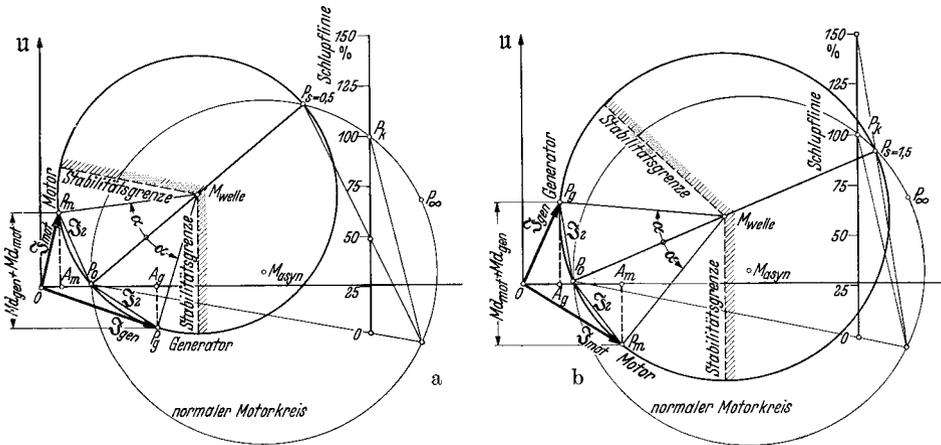


Abb. 69. Kreisbild der elektrischen Welle, bei halber synchroner Drehzahl. Lauf mit dem Drehfeld (a) bzw. gegen das Drehfeld (b).

motor gefunden wird. Bei der Konstruktion oder beim Versuch ist der halbe Widerstand, den die sekundäre Verbindungsleitung an Ort und Stelle besitzt, dem eigenen Widerstand der Maschine zuzuschlagen. Man erhält zusammengehörige Punkte für die beiden Maschinen, indem man den elektrischen Verdrehungswinkel α nach oben und nach unten im Mittelpunkt M_{welle} an den Radius $M_{\text{welle}} P_0$ anträgt. Die Betriebspunkte liegen entsprechend nachstehender Tabelle auf dem oberen oder dem unteren Teil des Kreises:

	Lauf mit dem Feld	Lauf gegen das Feld
Wellengenerator	untere Kreishälfte	obere Kreishälfte
Wellenmotor	obere Kreishälfte	untere Kreishälfte

P_m ist der Betriebspunkt der belasteten Maschine, also des Wellenmotors, und P_g der Betriebspunkt der angetriebenen Maschine, also des Wellengenerators.

Der scheinbare Widerspruch, daß bei Lauf gegen das Feld im Diagramm der Abb. 69 b der Generatorstrom nach oben gerichtet ist, wäh-

rend der Motorstrom nach unten zu liegt, erklärt sich daraus, daß bei diesem Betriebszustande das nur für die Primärseite gültige Diagramm nicht die über die Sekundärseite ausgetauschte Nutzleistung, sondern die auf der Primärseite rückfließende überschüssige Schlupfleistung wiedergibt. Die Auswertung des Diagrammes erfolgt mit Hilfe der üblichen Maßstäbe für Ströme und Leistung a_1 , a_2 und w , die wie beim Asynchronmotor zu berechnen sind. Man findet:

$$\text{Primärstrom des Generators } I_{\text{gen}} = OP_g \cdot a_1,$$

$$\text{Primärstrom des Motors } I_{\text{mot}} = OP_m \cdot a_1,$$

$$\text{Sekundärstrom } I_2 = P_0 P_g \cdot a_2 = P_0 P_m \cdot a_2,$$

Antriebsdrehmoment = Generatordrehmoment

$$Md_a = (P_g A_g \cdot w \pm I_g^2 \cdot R_1 \cdot m_1) \frac{0,973}{n_{\text{syn}}}, \quad \begin{array}{l} + \text{ bei } s < 1 \\ - \text{ bei } s > 1 \end{array}$$

Bremsdrehmoment = Motordrehmoment

$$Md_b = (P_m A_m \cdot w \mp I_m^2 \cdot R_1 \cdot m_1) \frac{0,973}{n_{\text{syn}}}. \quad \begin{array}{l} - \text{ bei } s < 1 \\ + \text{ bei } s > 1 \end{array}$$

Die Grenze der Stabilität wird im allgemeinen erreicht, wenn das dem unteren Teil des Diagrammes zu entnehmende Drehmoment seinen

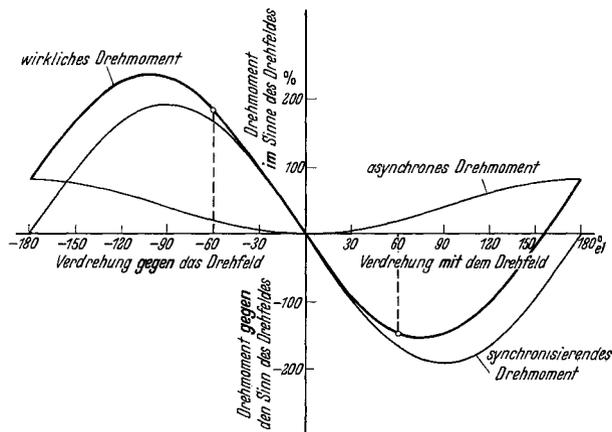


Abb. 70. Drehmoment der elektrischen Welle im Stillstand. Gleiche positive und negative Winkel ergeben die zusammengehörigen Werte für beide Maschinen. Das „wirkliche Drehmoment“ besteht aus dem „synchronisierenden“ und dem „asynchronen“ Anteil. Ersterer sucht Verdrehung um Winkel α rückgängig zu machen, letzterer verursacht bei fehlender Last gemeinsamen Hochlauf als Asynchronmotoren im Sinne des Drehfeldes.

Höchstwert überschreitet. Der zugehörige Punkt liegt etwas weiter rechts, als der genau unter dem Kreismittelpunkt liegende Punkt, der jedoch, um eine gewisse Sicherheit zu behalten, wie in Abb. 69 dargestellt, als der kritische Punkt betrachtet werden kann.

Der Verlauf des Drehmomentes im Stillstand über dem Verdrehungswinkel α ist in Abb. 70 wiedergegeben. Das wirkliche Drehmoment läßt sich in einen „synchronisierenden“ und in einen „asynchronen“ Anteil zerlegen, von denen der erstere den synchronen Lauf der Welle bewirkt,

während der letztere versucht, beide Maschinen als Asynchronmotoren auf ihre synchrone Drehzahl hochzufahren. Hieran werden die Maschinen jedoch stets durch ihre Antriebsmaschinen oder die anhängende Last verhindert.

Die höchst zulässigen Momente innerhalb des stabilen Bereiches nehmen den in Abb. 71a gezeigten Verlauf über dem Schlupf.

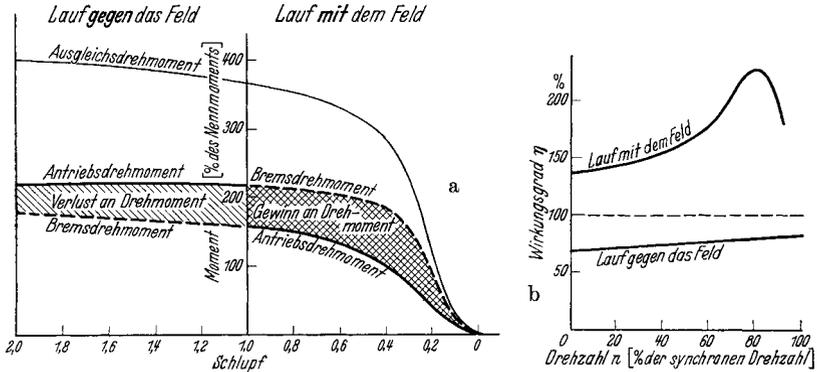


Abb. 71. Höchstwerte des Antriebs-, des Brems- und des Ausgleichsdrehmomentes der elektrischen Welle innerhalb des stabilen Betriebes (a), sowie „mechanischer Wirkungsgrad“ gleich Bremsmoment: Antriebsmoment in Abhängigkeit des Schlupfes, bzw. der Drehzahl (b).

Man sieht, daß die Welle bei Lauf gegen das Drehfeld mehr Moment aufnimmt, als sie wieder abgibt, während sie bei Lauf mit dem Feld sich umgekehrt verhält. Der mechanische Wirkungsgrad aus Abgabe zu Aufnahme ist daher im ersten Fall kleiner, im zweiten größer als 1,0. Der Gesamtwirkungsgrad unter Berücksichtigung der netzseitig gedeckten Verluste ist natürlich immer kleiner als 1,0. Die mechanischen Wirkungsgrade bei Höchstlast sind in Abb. 71 b wiedergegeben.

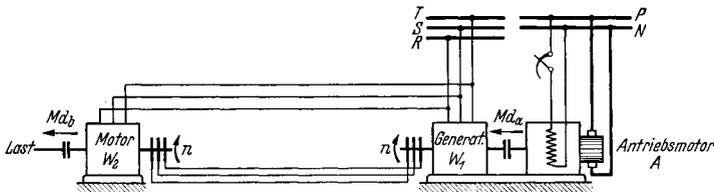


Abb. 72. Elektrische Arbeitswelle. Der Wellenmotor W_2 muß die gesamte Last übernehmen.

Die Arbeitswelle. In der Anordnung nach Abb. 72 treibt der Antriebsmotor A den Wellengenerator W_1 mit dem Moment Md_a an. Dieser gibt seine Generatorleistung an den Wellenmotor W_2 ab, der seinerseits die eigentliche Nutzlast mit dem von ihm abgegebenen Drehmoment Md_b antreibt.

Bei *Lauf mit dem Feld* ist Md_a kleiner als Md_b , und der Antriebsmotor A braucht noch nicht einmal das volle Nutzlastdrehmoment aufzubringen.

Die stabile Belastbarkeit des freien Wellenmotors W_2 muß genau so groß oder etwas größer als das höchstvorkommende Lastmoment sein. Die eigentliche Arbeitsmaschine A braucht dagegen nicht das volle Lastmoment zu überwinden, da die Welle selbst den Beitrag $(Md_b - Md_a)$ leistet.

Bei *Lauf gegen das Drehfeld* liegen die Verhältnisse ungünstiger. Das stabile Höchstmoment des freien Motors W_2 ist jetzt dem unteren Teil des Diagramms zu entnehmen. Obwohl der Diagrammkreis beim Schlupf über 1 größer wird, ist der Drehmomentgewinn doch nicht besonders groß. Außerdem muß die Arbeitsmaschine A nicht nur das Lastdrehmoment aufbringen, sondern auch noch den Drehmomentverlust $(Md_a - Md_b)$ der Welle decken.

Die Ausgleichswelle. Die Ausgleichswelle dient in Anordnung nach Abb. 73 nur zur Aufrechterhaltung vollkommen gleicher Geschwindig-

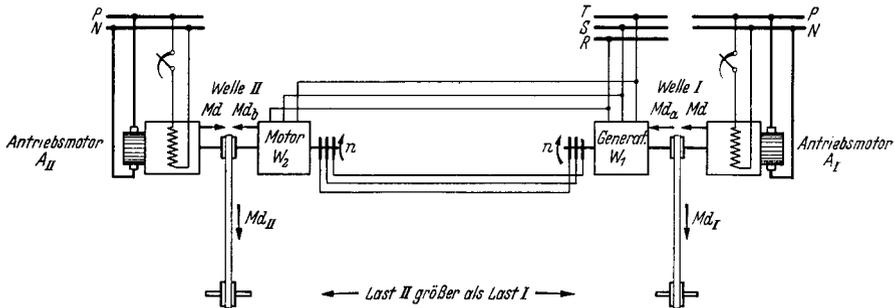


Abb. 73. Elektrische Ausgleichswelle. Die Welle hält durch Ausgleich der Lastdrehmomentdifferenz $(Md_{II} - Md_I)$ gleiche Drehzahl aufrecht. Die beiden Antriebsmotoren sind gleich stark belastet.

keit der beiden belasteten Wellen I und II . Dort greift die Nutzlast mit den Drehmomenten Md_I und Md_{II} an, die im wesentlichen von den beiden unter sich gleichen beliebigen Antriebsmaschinen A_I und A_{II} aufgebracht werden. Wenn beide Lastdrehmomente gleich groß sind und, wie vorausgesetzt werden muß, die beiden Maschinen A_I und A_{II} die gleiche Drehzahlcharakteristik haben, so sind ihre Belastungen gleich groß. Dies gilt aber auch, wenn irgendwelche Drehmomentunterschiede zwischen Md_I und Md_{II} auftreten, da die elektrische Welle W_1, W_2 für gleiche Drehzahl sorgt und beide Antriebsmotoren daher auf dem gleichen Punkt ihrer Drehzahl-Drehmomentkennlinie arbeiten müssen. Es ergeben sich folgende Gleichungen unter Zugrundelegung einer höheren Belastung der Welle II :

$$Md = Md_I + Md_a,$$

$$Md = Md_{II} - Md_b,$$

woraus folgt $(Md_{II} - Md_I) = (Md_a + Md_b)$.

Die Summe aus dem aufgenommenen und dem abgegebenen Drehmoment der elektrischen Welle ist also gleich der Differenz des Lastdrehmomentes auf beiden Seiten. Dies bedeutet die wichtige Tatsache,

daß die größte noch ausgleichbare Drehmomentdifferenz, die die Welle beherrscht, gleich der Summe des an der Grenze des stabilen Bereiches aufgenommenen und abgegebenen Drehmomentes ist. Welches dabei von beiden das größere ist, ist für die Ausgleichsfähigkeit ohne Belang. Aus der Abb. 71 a ist ersichtlich, daß der Lauf gegen das Feld hier die höheren Werte liefert.

Von wesentlichem Einfluß ist der Lauf mit oder gegen das Feld auf die Belastung der Antriebsmaschinen A_I und A_{II} . Bei idealer elektrischer Welle würde jede von ihnen, auch bei einem Unterschied der Belastungen, genau die halbe Summe von Md_I und Md_{II} abzugeben haben und auftretende Unterschiede gar nicht bemerken. Bei der wirklichen Welle mit ihren Verlusten liegt der Fall dagegen so, daß bei einsetzender Lastdifferenz eine zusätzliche Belastung zustande kommt, wenn die Welle gegen das Feld läuft, dagegen eine Entlastung erfolgt, wenn sie mit dem Feld arbeitet. Dies geht aus nachstehenden Formeln unter Berücksichtigung des Kurvenverlaufes der Abb. 71 a ohne weiteres hervor:

$$\text{Lauf mit dem Feld } Md = \frac{1}{2}(Md_I + Md_{II}) - \frac{1}{2}(Md_b - Md_a),$$

$$\text{Lauf gegen das Feld } Md = \frac{1}{2}(Md_I + Md_{II}) + \frac{1}{2}(Md_a - Md_b).$$

Da die Ausdrücke der zweiten Klammer positiv sind, sieht man, daß sich die Welle im ersten Fall an der Deckung der Lastdrehmomente beteiligt, im zweiten Fall dagegen die Antriebsmotoren zusätzlich belastet.

Häufig wird die Forderung gestellt, daß die elektrische Ausgleichswelle auch als Arbeitswelle laufen muß, wenn nämlich einer der eigentlichen Antriebsmotoren wegen Schaden ausfällt, der Betrieb aber weitergehen soll. In diesem Fall muß der freie Wellenmotor das ganze, höchstmögliche Lastdrehmoment seiner Seite abgeben können. Es gelten dieselben Gleichungen wie oben für die Arbeitswelle. Insbesondere ist darauf zu achten, daß der ganz gebliebene Antriebsmotor nunmehr das Doppelte seiner Nennlast herzugeben hat, vermehrt um den Verlust der Welle bei Lauf gegen das Feld, verringert um den „Gewinn“ der Welle, bei Lauf mit dem Feld. Praktisch kann der Fall so liegen, daß er z. B. mit 180 oder 220% seiner Nennlast fahren muß, je nach der Drehfeldfolge in der Welle. Bei Asynchronmotoren als Antriebsmotoren besteht also hier unter Umständen bereits die Gefahr des Abkippens.

Die Synchronisierung. Die Welle muß vor dem Anfahren der Antriebsmotoren im Stillstand synchronisiert werden. Dies geschieht entweder durch Tippen einer der beiden Antriebsmaschinen, wodurch die Läufer so lange um kleine Winkel verstellt werden, bis der Spannungsunterschied auf der Sekundärseite der beiden schon erregten Wellenmaschinen W_1 und W_2 verschwindet. Dann stehen beide richtig und die Verbindung kann hergestellt werden. Meistens bevorzugt man das selbsttätige Synchronisieren bei fest verbundenen Ringen nach Abb. 74. Die Primärseiten werden zuerst zweipolig an das Netz gelegt, dann ihre freien Klemmen untereinander verbunden und anschließend auch diese an das Netz gelegt. Dies bewirkt ein schrittweises Synchronisieren ohne

Hochlaufefahr der Welle, die sonst bei unmittelbarem dreipoligen Zuschalten besteht.

Beim *Abschalten* der Antriebsmotoren müssen die Primärwicklungen der Welle bis zum Stillstand am Netz liegenbleiben, damit der synchrone Auslauf gesichert und erneutes Synchronisieren erspart wird.

Bei Drehrichtungswechsel muß die Drehfeldfolge in beiden Maschinen getauscht werden. Dies darf, wie ohne weiteres verständlich ist, nur durch Vertauschen zweier gleicher Netzzuführungen erfolgen, also z. B. von *S* und *T* am ersten und ebenfalls *S* und *T* am zweiten Ständer, da anderenfalls die synchrone Stellung der Läufer verlassen wird. Am besten werden daher die gemeinsamen Netzzuführungen getauscht.

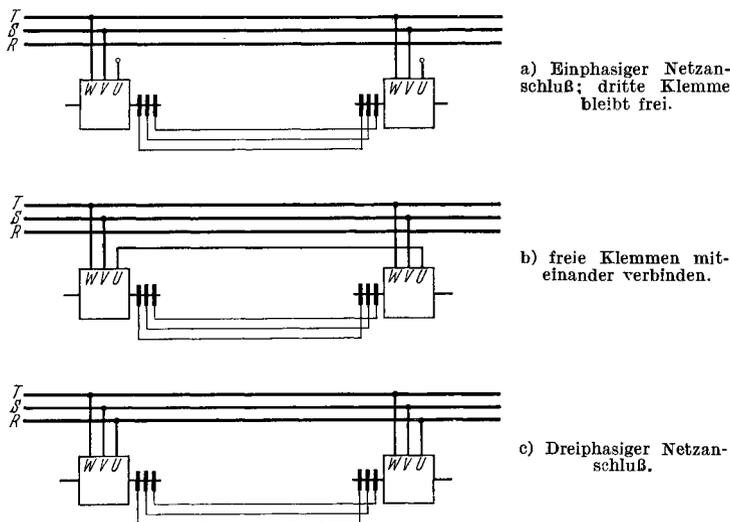


Abb. 74. Selbsttätiges Synchronisieren der elektrischen Welle im Stillstand in drei Stufen.

Die Pendelneigung. Zwei unbelastete, synchronisierte Asynchronmaschinen sind im allgemeinen nur durch künstliche Erhöhung ihrer Verluste zum pendelfreien Synchronlauf zu bringen. Diese Verluste sind wegen der Wirkungsgradverschlechterung unerwünscht. Im praktischen Betrieb tritt bei beginnenden Pendelungen ein so starker, zusätzlicher Energieverbrauch durch die mechanischen Widerstände und Dämpfungen auf, daß sie sich gar nicht weiter ausbilden können. Im Prüffeld sorgt man durch hinreichend große, angekuppelte Belastungsmaschinen für die notwendige Grundlast. Gegen starke, schroffe Lastschwankungen bleibt die Welle aber doch empfindlich, weshalb solche auch bei der Probe vermieden werden müssen.

Die Prüfung. Die Prüfung der Welle besteht im Leerlauf- und Kurzschlußversuch bei Nennzahl und der vorgeschriebenen Drehfeldfolge. Wegen der Genauigkeit, mit welcher das Diagramm gezeichnet und ausgewertet werden kann, sind unmittelbare Drehmomentmessungen und Winkelbeobachtungen an und für sich nicht nötig. Sollen solche

jedoch durchgeführt werden, so macht man den Versuch im Stillstand, da er den kleinsten Aufwand erfordert. Man erhält nicht die Ergebnisse des Laufes, kann aber die genügende Übereinstimmung der Resultate mit denen des Diagrammes feststellen. Beide Wellenmotoren werden mit einem Hebelarm und einer Kraftmeßvorrichtung (Federwaage) ausgerüstet. Dann wird sorgfältig synchronisiert und die Läufer parallel geschaltet. Nunmehr beginnt man den einen Hebelarm zu verstellen, wobei man das an ihm ausgeübte Drehmoment und jenes am anderen Arm mißt. Außerdem sind die elektrischen Größen abzulesen. Die gegenseitige elektrische Winkelverstellung α wird gemessen, indem man

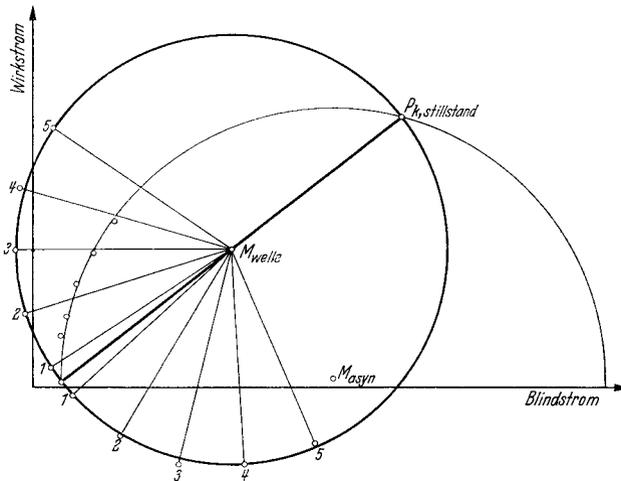


Abb. 75. Durch Messung im Stillstand ermitteltes Kreisbild einer elektrischen Welle. Dünn eingezeichnet ist das Kreisbild eines einzelnen der beiden Motoren.

die räumliche Verdrehung beider Wellen mißt, diese addiert und mit $2p/2$ malnimmt. Man wiederholt den Versuch für verschiedene Stellungen. Sobald das aufgenommene oder das abgegebene Drehmoment bei weiterer Verdrehung nicht mehr wächst, bricht man den Versuch ab, da man sich dem unstabilen Bereich nähert. Man wiederholt den ganzen Versuch bei unverändertem Aufbau, aber mit getauschtem Drehfeld. Auf diese Weise gewinnt man die Kurven für Verdrehungen im Sinne und im Gegensinne des Drehfeldes. Das von Hand ausgeübte, der Welle also zugeführte Drehmoment ist größer als das abgegebene, wenn man den Läufer gegen sein Drehfeld verstellt, es ist kleiner als das andere, wenn man mit dem Feld dreht.

Wenn man Versuche im Lauf zu machen wünscht, wählt man als Hilfsmaschinen am besten Pendelmaschinen, da man auf diese Weise beide Drehmomente sehr genau und einfach bestimmen kann. Durch stroboskopische Beleuchtung der Wellen kann man auch recht genau die Winkelverdrehungen bestimmen.

Bei der Prüfung der Gesamtanlage, also der elektrischen Welle einschließlich der eigentlichen Antriebsmotoren, kuppelt man je einen

Wellen- und Antriebsmotor mit einer Prüffeldbelastungsmaschine. Mit deren Hilfe lassen sich dann alle Betriebszustände beliebiger gleicher oder abweichender Last an den beiden Gruppen einregeln und messen. Außerdem läßt sich der gemeinsame Hochlauf und Auslauf sowie der Synchronlauf überprüfen. Letzteren kontrolliert man am einfachsten durch zwei Umlaufzähler, die bei Stillstand angesetzt und bei erneutem Stillstand abgelesen werden. Beim Zerreißen der Welle muß schleunigst abgeschaltet werden, da die Kurzschlußleistung der Wellenmotoren wegen der meist geringen Polzahl und verhältnismäßig hohen Sättigung (Kippmoment!) sehr groß ist.

Die normale Prüfung der Wellenmotoren als Asynchronmotor geht meistens der besonderen Prüfung voraus.

In Abb. 75 ist ein durch Messung im Stillstand gewonnenes Diagramm der elektrischen Welle wiedergegeben, in welchem auch schwach das normale Motordiagramm eingezeichnet ist. Man erkennt die gute Übereinstimmung von Messung und Diagramm.

h) Die Drehregler.

Der Drehregler ist eine Asynchronmaschine mit ruhendem, aber verstellbarem Läufer. Die Primärwicklung, die häufig im Läufer liegt, hängt am Netz mit der Spannung U_N . In der Sekundärwicklung tritt bei Leerlauf die Spannung U_{2_0} , bei Last die um den Spannungsabfall ΔU_2 kleinere Spannung U_2 auf. Die Primärseite liegt in Stern, seltener in Dreieck, während die Sekundärseite meistens offene Phasenschaltung besitzt. Die Sekundärspannung wird bei mehrphasigen Reglern bei Drehung des Läufers in der Phase geschwenkt; ihre Größe bleibt unverändert. Bei dem einphasigen Regler wird dagegen ihre Größe bis auf Null verändert, während die Phasenlage unverändert die der Primärspannung bleibt. Beide Reglerarten unterscheiden sich also grundsätzlich voneinander.

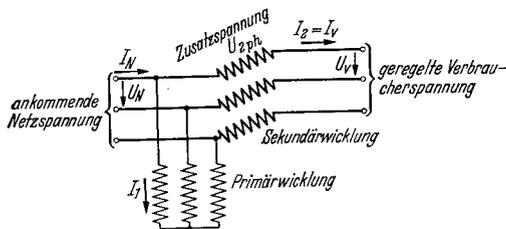


Abb. 76. Schaltung des dreiphasigen Drehreglers zur Spannungsregelung.

$$(U_v = U_N + U_{2_{ph}} \cdot \sqrt{3} \quad \mathfrak{I}_N = \mathfrak{I}_1 + \mathfrak{I}_v).$$

Der dreiphasige Drehregler. Der dreiphasige Drehregler wird in der Sparschaltung nach Abb. 76 hauptsächlich zur Regelung der ankommenden Netzspannung U_N um kleine Beträge auf die konstant zu haltende oder in kleinen Grenzen veränderliche Verbraucherspannung U_v benutzt. Wenn $U_{2_{ph}}$ die Phasenspannung der Sekundärwicklung bei Leerlauf ist, so kann U_v geregelt werden in den Grenzen: $U_N \pm \sqrt{3} \cdot U_{2_{ph}} = U_N (1 \pm \ddot{u})$, wenn \ddot{u} gleich ist der Übersetzung $\sqrt{3} \cdot U_{2_{ph}}/U_N$. Die Eigenleistung des Drehreglers ist — wie die des normalen Spartransformators — nur ein Bruchteil seiner Durchgangsleistung. Sie verhält sich im Mittel zu dieser wie $\sqrt{3} \cdot U_{2_{ph}} : U_N$. Das vereinfachte Spannungsdiagramm der Abb. 77, in

welchem die Spannungsabfälle vernachlässigt werden, läßt erkennen, wie sich die beiden Phasenspannungen $U_{N,ph}$ an der Primärwicklung und die phasenschwenkbare Spannung U_{2ph} an der Sekundärwicklung zur Gesamtverbraucherspannung $U_{v,ph}$ zusammensetzen. Die induzierte Sekundärspannung U_{2ph} kann zum Zwecke der Spannungsverringering entweder im Sinne oder gegen den Sinn des Drehfeldes im Regler geschwenkt werden. Die Spannung U_v ändert sich beide Male im gleichen Maße und besitzt nur eine nicht weiter interessierende andere Phasenlage zu U_N . Bei der meistens vorhandenen überwiegenden Wirkbelastung auf der Verbraucherseite des Reglers empfiehlt sich nur die Verstellung in dem Sinne, daß die induzierte Spannung der Sekundärwicklung bei Verringerung der Verbraucherspannung in Richtung des Drehfeldes verdreht wird. Daraus ergeben sich die Regeln:

Der *ständergespeiste* Drehregler wird zur Verringerung der abgegebenen Spannung mechanisch *im* Sinne des Drehfeldes verstellt. Zur Erhöhung der abgegebenen Spannung wird er gegen sein Drehfeld verdreht.

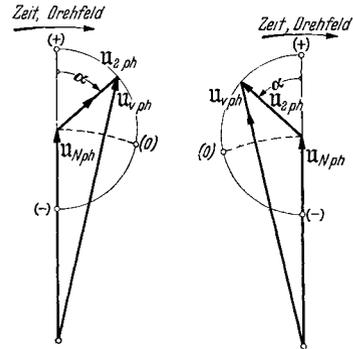
Der *läufergespeiste* Drehregler wird zur Verringerung der abgegebenen Spannung mechanisch *gegen* sein Drehfeld verstellt. Zur Erhöhung der abgegebenen Spannung wird er im Sinne des Drehfeldes verdreht.

Beide Regeln lassen sich zu der gemeinsamen Regel zusammenfassen:

Ständer- oder läufergespeiste Drehregler sind zur Verringerung der abgegebenen Spannung mechanisch in dem Sinne zu verstellen, in welchem sich der Läufer bei versuchsweise abgeschalteter und in sich kurzgeschlossener Sekundärwicklung zu verdrehen sucht.

Nachstehend wird beim Leerlaufversuch beschrieben, wie die richtige Verstellrichtung in einfacher Weise gefunden wird. Wenn man diese Regeln befolgt, erhält man in der Primärwicklung einen wesentlich kleineren Strom I_1 als im anderen Fall. Dies gilt für den meistens vorliegenden Fall des Energieaustausches in der Richtung von U_N nach U_v und bei einem Verbraucher- $\cos\varphi$ über 0,0. Die Gründe lassen sich im nachstehend beschriebenen Diagramm erkennen.

Diagramm. Abb. 78 zeigt das Diagramm des belasteten Reglers unter Vernachlässigung seiner Spannungsabfälle. $U_{v,ph} = U_{N,ph} + U_{2ph}$ ist die Phasenspannung des Verbrauchers. \mathfrak{F}_v ist gleichzeitig Verbraucherstrom und Strom in der Sekundärwicklung. $U_{N,ph}$ ist die auf Sternphase bezogene Spannung des Primärnetzes, dessen Strom \mathfrak{F}_N ist. Der Strom in der Primärwicklung des Reglers ist \mathfrak{F}_1 . Er setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, einmal aus dem bei Leerlauf aufgenommenen Magnetisie-



a) Schwenkung der Zusatzspannung U_{2ph} im Sinne des Drehfeldes. b) Schwenkung der Zusatzspannung U_{2ph} gegen das Drehfeld.

Abb. 77. Spannungsdiagramm des dreiphasigen Drehreglers. Die Punkte (+), (0) und (-) entsprechen der höchsten, mittleren und tiefsten Verbraucherspannung $U_{v,ph}$.

rungsstrom \mathfrak{I}_1 , und dann aus dem dem Verbraucherstrom \mathfrak{I}_v das Gleichgewicht haltenden Strom $\mathfrak{I}_v' = \mathfrak{I}_v e^{-\alpha j} \cdot U_{2, ph} / U_{N, ph}$. Die Phasenlage von \mathfrak{I}_v'

hängt ab vom Phasenwinkel φ_v des Verbrauchers und vom Verstellungswinkel α des Reglers. Die Konstruktion des Diagrammes bei Verdrehung um Winkel α in Richtung oder in Gegenrichtung des Drehfeldes geht aus der Abbildung hervor. Man erkennt, wie sich die beiden Anteile des Primärstromes \mathfrak{I}_1 , also \mathfrak{I}_1' und \mathfrak{I}_1'' , in beiden Fällen zu zwei ganz verschiedenen Gesamtströmen \mathfrak{I}_1 zusammensetzen. Man erhält entweder einen großen oder einen kleinen Strom in der Erregerwicklung des Drehreglers. Ihre Erwärmung ist den Verlusten, also dem Quadrat des Stromes I_1 verhältnismäßig. Bei rund 30% Magnetisierungsstrom kann im äußersten Fall eine Verschiedenheit von I_1 im Verhältnis 1,3 : 0,7, also der Verluste von 1,69 : 0,49 oder 3,45 : 1 auftreten. Die physikalische Ursache liegt darin, daß durch die „richtige“ Verdrehung der Sekundärspannung um Winkel α in Richtung des Drehfeldes aus der Nulllage heraus der Strom \mathfrak{I}_v gegenüber $U_{2, ph}$ eine um 90° voreilende Komponente erhält, welche durch ihre magnetisierende Wirkung die erregende Primärwicklung vom Blindstrom entlastet.

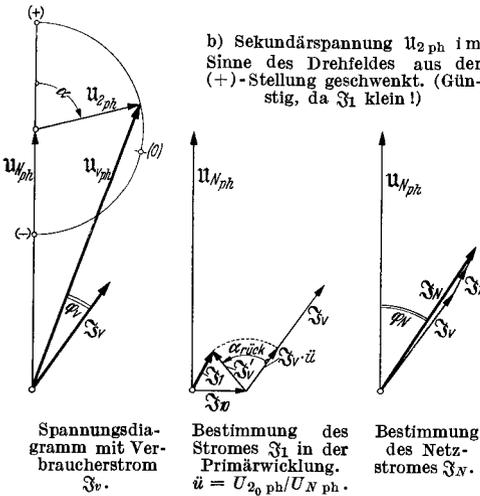
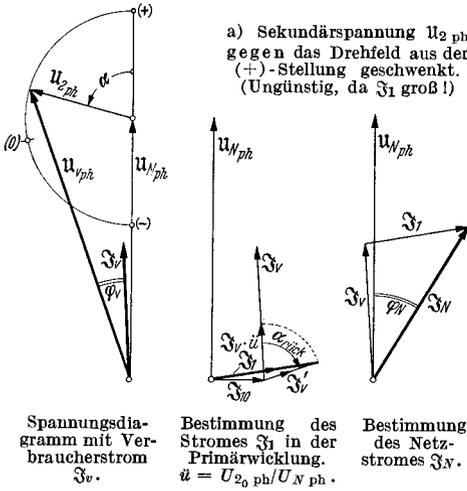


Abb. 78. Spannungs- und Stromdiagramm des dreiphasigen Drehreglers in Schaltung nach Abb. 76. Man beachte, daß \mathfrak{I}_v' durch rückwärtige Schwenkung um α aus $\mathfrak{I}_v \cdot \hat{u}$ erhalten wird.

denen zu ersehen ist, wie innerhalb des Verstellbereiches der Strom I_1 eine merkliche Absenkung bei richtiger Regelung erfährt.

Der Leerlaufversuch. Vor Beginn der Magnetisierungsaufnahmen wird der Regler eingestellt. Man mißt zuerst die Phasenspannung der noch nicht angeschlossenen Sekundärwicklung bei Erregung der Primärwicklung mit Nennspannung U_N . Aus dem Ergebnis bestimmt man die

In Abb. 79 sind gemessene Kurven wiedergegeben, aus

Übersetzung $\ddot{u} = \sqrt{3} \cdot U_{2, \text{ph}} / U_N$. Wenn keine Zweifel an der Richtigkeit der Klemmenbezeichnungen bestehen, verbindet man nunmehr die Sekundärwicklung mit der Primärwicklung nach den Angaben des Schaltbildes. Dann sucht man die Stellung kleinster geregelter Spannung $U_{v, \text{min}}$, die gleich $U_N - \sqrt{3} \cdot U_{2, \text{ph}}$ sein muß, und bezeichnet sie mit (-). Die Stellung, wo die Spannung U_v genau gleich der Primärspannung U_N ist, bezeichnet man mit (0). Zuletzt sucht man die Stellung höchster Spannung $U_{v, \text{max}}$, die mit (+) markiert wird. Die zugehörige Spannung $U_{v, \text{max}}$ ist gleich $U_N + \sqrt{3} \cdot U_{2, \text{ph}}$. Wenn nicht der volle Regelbereich zwischen $U_{v, \text{max}}$ und $U_{v, \text{min}}$ verlangt wird, so kommen die Marken (-) und (+) entsprechend näher an (0) heran. Der Winkel zwischen (0) und (+) ist etwas größer als der zwischen (-) und (0), wie dies aus dem Spannungsdiagramm zu ersehen ist. Wegen der Kleinheit der zugesetzten Spannung $\sqrt{3} \cdot U_{2, \text{ph}}$ sind die Höchst- und Tiefstwerte von U_v nicht sehr leicht zu erkennen, insbesondere da der Verlauf des Maximums und des Minimums recht flach ist. Legt man auf größere Genauigkeit Wert, so empfiehlt sich die einphasige Ausmessung. Man erregt nur die einzige Phase UX auf der Primärseite und verstellt den Regler so lange, bis die Sekundärspannungen VY und WZ genau dieselben Werte haben, während die Sekundärspannung UX doppelt so groß ist. Dann verstellt man um 180°_{el} , bis beide Spannungen wieder gleich groß sind. Man erhält die beiden gesuchten Stellungen mit größter Genauigkeit. Man kann auch primär nur die Klemme U vom Netz trennen und erhält die gewünschten Stellungen, wenn die Sekundärspannung UX verschwindet.

Wenn die sekundären Klemmen falsche Bezeichnungen tragen, so findet man die richtigen folgendermaßen. Man legt die Primärwicklung an das Netz und trennt zuerst die Klemme U. Dann verstellt man den Regler, bis die mit UX bezeichnete Sekundärphase keine Spannung mehr anzeigt. Darauf verbindet man primär wieder U, löst aber V. Bei unverstelltem Regler muß jetzt jene Sekundärphase mit VY bezeichnet werden, welche keine Spannung besitzt. Zur Kontrolle folgt noch der dritte Versuch, wo primär UV am Netz liegen, dagegen W gelöst wurde. Die spannungslose Sekundärphase ist WZ. Ob Anfang und Ende jeder Phase richtig bezeichnet sind, lehrt ein weiterer Versuch, bei dem man sekundärseitig XYZ zu einem Sternpunkt verbindet und primär den Regler dreiphasig ans Netz legt. Die verketteten Spannungen auf der Sekundärseite müssen gleich groß sein.

Es lassen sich verschiedene Stellungen (0) finden, und zwar genau so viele, wie der Regler Pole hat. Man wählt jene aus, die bei Ver-

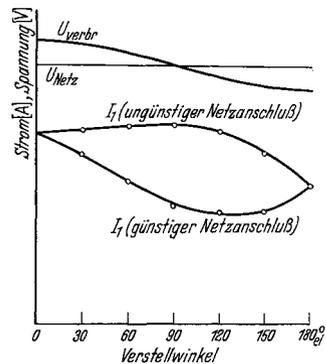


Abb. 79. Gemessener Strom I_1 in der Primärwicklung eines auf konstanten Ohmschen Verbraucherwiderstand geschalteten Dreiphasenreglers bei günstigem und bei ungünstigem Netzanschluß.

drehung des Verstellorganes nach rechts Spannungsverringern auf der Ausgangsseite gibt. Man erhält also dann beim „Zudrehen“ des Reglers kleinere Verbraucherspannung (Wasserhahn!). Außerdem soll aber die eingangs geforderte Schwenkung der Sekundärspannung im Sinne des Drehfeldes erfolgen. Man erreicht dies durch entsprechenden Anschluß der Netzphasen. Man dreht, um diesen festzustellen, den Regler auf (0) und belastet ihn auf einen Widerstand. Dann schließt man das Primärnetz einmal in der Folge *RST*, dann in der Folge *TSR* an. Jener Anschluß ist der richtige, bei dem der Strom I_1 in der Primärwicklung den kleineren Wert zeigt. Beim falschen Anschluß kann er etwa den doppelten Wert annehmen. Bei Reglern für sehr hohe Durchgangsleistungen, also für sehr kleine Zusatzspannungen $U_{2,ph}$, macht man diesen Versuch bei etwa $\frac{1}{10}$ der Nennspannung und auch etwa $\frac{1}{10}$ des Nennstromes I_2 . Dies ergibt eine Leistung von nur $\frac{1}{100}$ der Nenn-durchgangsleistung, wobei aber die Genauigkeit in keiner Weise leidet.

Wenn das Verstellorgan links herum gedreht werden soll, um Spannungsverringern zu erhalten, so wird der Drehfeldversuch in genau dergleichen Weise durchgeführt. Es leuchtet ein, daß die Phasenfolge mit dem kleineren Primärstrom die bessere ist.

Häufig wird der Drehregler mit Endausschaltern ausgerüstet, welche in der Stellung höchster und tiefster Stellung ansprechen. Man prüft ihre Wirksamkeit, nachdem man sie räumlich richtig angeordnet hat, am besten durch Prüflampen.

Der eigentliche Leerlaufversuch besteht wie bei allen Asynchronmaschinen in der Aufnahme der Magnetisierungskennlinien, die gewonnen werden, indem man die Strom- und Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der zugeführten Netzspannung bestimmt.

Da Drehregler meistens einen recht kleinen Luftspalt besitzen, sind sie gegenüber Abweichungen nach einer Seite sehr empfindlich. Einseitige Luftspalte äußern sich in mehr oder weniger starkem Brummen und bei Reglern mit in Reihe geschalteten Wicklungen in ungleicher Sekundärspannung in den drei Phasen. Durch saubere Ausrichtung und Prisionierung, besonders aber durch Vergrößerung des Luftspaltes, lassen sich diese Fehler praktisch restlos beheben. Die Vergrößerung seines Eigenbedarfes an Blindleistung spielt meistens gar keine Rolle, wenn man sie auf die Durchgangsleistung bezieht. Die Erhöhung des Primärstromes muß dagegen vorher in Betracht gezogen werden.

Die endgültige Klemmenbezeichnung wird so durchgeführt, daß die Folge *UVW* mit der Netzphasenfolge *RST* übereinstimmt, und zwar auf der Eingangs- wie auch auf der Ausgangsseite des Reglers.

Der Kurzschlußversuch. Die Sekundärwicklung des Drehreglers wird in sich kurzgeschlossen und an die Primärwicklung eine kleine Spannung gelegt. Der Läufer wird nun so lange verdreht, bis bei kleinster Kurzschlußspannung an den Klemmen der größte Kurzschlußstrom zum Fließen kommt. Der Kurzschlußstrom schwankt nicht unbedeutend in Abhängigkeit der gegenseitigen Lage von Ständer und Läufer, da die doppeltverkettete Streuung stark hiervon abhängt. Man bestimmt jedoch nur den Mindestwert des Kurzschlußscheinwiderstandes.

Nach den RET ist der Versuch bei betriebswarmer Wicklung vorzunehmen oder aber auf diesen Zustand umzurechnen. Die Kurzschlußspannung wird in Prozent der Primärnennspannung ausgedrückt und heißt die Nennkurzschlußspannung. Sie gilt für einen Kurzschlußstrom gleich dem Nennprimärstrom. Der Anteil $u_k \cdot \cos \varphi_k$ ist gleich der relativen Ohmschen Spannung und der Anteil $u_k \cdot \sin \varphi_k$ gleich der Streuspannung. Die drei Spannungen werden mit u_k , u_r und u_s bezeichnet.

Der primäre Kurzschlußstrom, der bei voller Spannung auftreten würde, heißt der Kurzschlußstrom. Er wird als Vielfaches des Nennstromes ausgedrückt und ist gleich dem Kehrwert aus der Nennkurzschlußspannung u_k . Es gilt also:

$$\frac{\text{Kurzschlußstrom}}{\text{Primärnennstrom}} = \frac{1}{\text{Nennkurzschlußspannung}}.$$

Tritt bei einem in betriebsmäßiger Sparschaltung arbeitenden Drehregler jedoch sekundärseitig ein Klemmenkurzschluß auf, so führen die Wicklungen einen ganz erheblich höheren Kurzschlußstrom. Als kurzgeschlossene Spannung ist jetzt nicht mehr die Nennspannung, sondern ein im Verhältnis $U_{v\text{ph}}/U_{2\text{ph}}$ erhöhter Wert zu betrachten. Es gelten die gleichen Überlegungen und Formeln, wie sie auf S. 75 für den normalen Spartransformator abgeleitet wurden. Der Augenblickswert des Primärkurzschlußstromes innerhalb der Wicklung kann bei ungünstigster Reglerstellung den Wert erreichen:

$$\text{Stoßkurzschlußstrom} = \text{Kurzschlußstrom} \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\ddot{u}}\right).$$

$$\text{mit} \quad \ddot{u} = \frac{U_{2_0\text{ph}} \cdot \sqrt{3}}{U_N}.$$

Dieser Strom darf mit Rücksicht auf die endlich begrenzte Kurzschlußfestigkeit der Wicklung den Wert des 50fachen Nennstromes nicht überschreiten. Wenn der Eigenkurzschluß-Scheinwiderstand und der zusätzliche Widerstand in der Spannungsquelle und in den Zuleitungen nicht ausreichen, ist durch vorgeschaltete Drosseln für die nötige Begrenzung des Stoßkurzschlußstromes zu sorgen.

Die Messung der Kurzschlußverluste erfolgt genau wie beim Transformator, wenn in der kurzgeschlossenen Sekundärwicklung der Nennstrom fließt. Aus ihnen lassen sich durch Abzug der rein Ohmschen Wicklungsverluste die Zusatzverluste bestimmen.

Die Spannungsänderung. Die Spannungsänderung des Drehreglers kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$u_\varphi = \frac{u'_\varphi}{a} + 0,5 \cdot \frac{u''_\varphi}{a^2}$$

mit

$$a = \frac{1}{\ddot{u}} \pm 1, \quad \ddot{u} = \frac{U_{2_0\text{ph}} \cdot \sqrt{3}}{U_N},$$

$$u'_\varphi = u_r \cdot \cos \varphi + u_s \cdot \sin \varphi,$$

$$u''_\varphi = u_r \cdot \sin \varphi - u_s \cdot \cos \varphi,$$

$$u_r = u_k \cdot \cos \varphi_k, \quad u_s = u_k \cdot \sin \varphi_k.$$

Das Pluszeichen gilt für die Reglerstellung höchster Spannung und das Minuszeichen für die Stellung tiefster Spannung an den Ausgangsklemmen. Die Spannungsänderung von Drehreglern mit getrennt arbeitender Sekundärwicklung kann sehr genau in der gleichen Weise bestimmt werden, wie sie auf S. 120 für den Periodenwandler beschrieben worden ist. Für s ist 1,0 und für $\cos\varphi_2$ der Verbraucherleistungsfaktor einzusetzen.

Der Belastungs- und der Dauerversuch. Belastungsaufnahmen an Drehreglern werden nur selten gemacht. Der auf die Gesamtspannung bezogene Spannungsabfall bei Last ist sehr klein und interessiert weniger, da er durch Betätigen des Regelorganes sofort nachgeregelt werden kann. Als Belastung, besonders für den Dauerversuch, kommen entweder normale Asynchronmotoren oder aber ein zweiter, gleichartiger

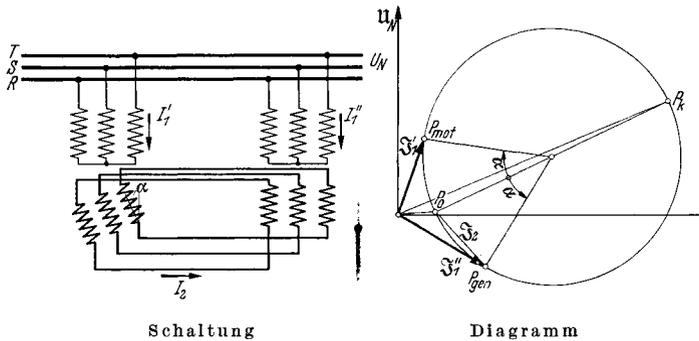


Abb. 80. Belastung zweier Einfach- oder eines Doppeldrehreglers in Rückarbeit. (P_0 und P_k sind Leerlauf- und Kurzschlußpunkt eines Reglers. Der elektrische Verdrehungswinkel α zählt von der Stellung aus, wo $\mathfrak{S}_2 = 0$ ist.)

Drehregler in Rückarbeitsschaltung in Betracht. Im letzteren Fall schaltet man die Sekundärwicklung beider am besten von der primären Erregerwicklung ab und verbindet die Regler sowohl primärseitig wie auch sekundärseitig parallel miteinander. Die Sekundärseiten werden zuerst einpolig verbunden und dann so lange gedreht, bis ein Spannungsmesser zwischen den noch offenen Klemmen keine Spannungsdifferenz mehr anzeigt. Dann schaltet man auch die restlichen Klemmen parallel. Hierauf wird einer der beiden Regler vorsichtig so lange verdreht, bis der auftretende Sekundärausgleichstrom den Nennwert erreicht. Der eine Primärstrom ist etwas verschieden vom anderen, doch können die Ergebnisse des Dauerlaufes leicht aufeinander umgerechnet werden. Die Lage der Ströme findet man, wenn man einen Kreis durch den Leerlaufpunkt P_0 und den Kurzschlußpunkt P_k eines Reglers legt, dessen Durchmesser gleich der Entfernung P_0P_k ist. Gleiche Verdrehungswinkel α im Mittelpunkt M dieses Kreises an P_0M angetragen, ergeben die Lage der beiden Primärströme \mathfrak{S}_1' und \mathfrak{S}_1'' , wie aus Abb. 80 zu erkennen ist. Dieses Diagramm ist identisch mit dem der elektrischen Welle für Stillstand.

Beim Dauerlauf ist die bei offenen Drehreglern meistens vorgesehene Fremdbelüftung anzustellen. Bei Ölreglern dauert die Vornahme des Temperaturlaufes mit Nennstrom meistens sehr lange, und es empfiehlt sich daher eine wesentliche Abkürzung durch einen Beginn des Laufes mit erhöhtem Strom.

Während des Belastungsversuches können die Drehregler, welche im Leerlauf einwandfrei waren, mehr oder weniger starke magnetische Geräusche entwickeln, welche auf Unsymmetrien des Luftspaltes oder aber der Wicklungsanordnung hinweisen. Diese ist dann gegebenenfalls zu kontrollieren.

Das Drehmoment. Der Drehregler entwickelt bei Belastung ein Drehmoment, dessen Größe und Richtung von der Phasenlage zwischen Strom und Spannung in den Wicklungen abhängt. Aus dem Diagramm der Abb. 78 kann der Phasenwinkel β zwischen Spannung U_{2ph} und Strom \mathfrak{I}_v in der Sekundärwicklung entnommen werden. Das Drehmoment wirkt bei spitzem Winkel β im gleichen Sinne, bei stumpfem Winkel β im umgekehrten Sinn, wie das bei Kurzschluß der Sekundärwicklung wirksame motorische Kurzschlußdrehmoment. Die Größe des Drehmomentes berechnet man zu:

$$\text{Drehmoment in mkg} = \frac{\text{Phasenzahl} \cdot U_{2ph} \cdot I_v \cdot \cos \beta}{1,03 \cdot n_{syn}},$$

wobei unter n_{syn} die Synchrondrehzahl bei gedachtem Motorbetrieb, also $6000/2p$ bei einem $2p$ -poligen Regler am 50 Hz-Netz zu verstehen ist.

Der Winkel β hängt unmittelbar vom $\cos \varphi$ des Verbrauchers ab. Da man ihn nicht von Fall zu Fall kennt, errechnet man das höchstmögliche Drehmoment bei 50 Hz zu:

$$\begin{aligned} & \text{Höchst-drehmoment in mkg} \\ & = \frac{\text{Eigenleistung des Drehreglers in kVA}}{6,18} \cdot \text{Polzahl.} \end{aligned}$$

Bei Doppeldrehreglern heben sich die Drehmomente bei Wirklast in allen Stellungen auf. Bei Blindlast addieren sie sich in der Nullstellung. Das mögliche Höchst-drehmoment errechnet sich nach der gleichen Formel, wenn statt der Eigenleistung eines Reglers die Gesamteigenleistung des Doppeldrehreglers eingesetzt wird.

Wenn man die Größe des Verstellmomentes ermitteln will, muß man für die Reibungsmomente in den Lagern und vor allem in dem meistens vorgesehenen Schneckenantrieb einen Zuschlag von 100 bis 200% machen. Man errechnet also das Verstellmoment zu:

$$\text{Verstellmoment des Reglers in mkg} = (2 \dots 3) \cdot \frac{\text{Eigenmoment des Reglers}}{\text{Mechanische Übersetzung}}.$$

Die Messung des Momentes an der Verstellwelle kann durch einen doppelarmigen, verstellbaren Hebelarm mit Gewichtsschalen erfolgen. Man bestimmt sowohl das Gewicht, welches gerade imstande ist, den Regler im Sinne höherer Spannung zu verstellen, als auch jene, welches gerade ausreicht, die umgekehrte Verstellung zu vollführen. Beide

Kräfte bzw. die ihnen entsprechenden Drehmomente unterscheiden sich um den doppelten Betrag der unvermeidlichen Reibungskräfte.

Der mit Wirklast belastete Einfachdrehregler zieht sich unter der Einwirkung seines Eigenmomentes immer von selbst in die oben als richtig erkannte (0)-Stellung hinein. Aus der falschen (0)-Stellung, die den größeren Primärstrom I_1 zur Folge hat, stößt er sich von selbst ab. Wenn der Regler also in Stellung (+) entsprechend höchster Verbraucherspannung steht, sucht er seine Spannung zu verringern und umgekehrt sucht er dieselbe in der Stellung (—) von selbst zu vergrößern.

Der Doppeldrehregler. Der Doppeldrehregler besteht aus zwei gleich großen Einfachreglern, die starr miteinander gekuppelt sind und primär am gleichen Netz liegen. Die Drehfelder laufen in beiden verschiedenen

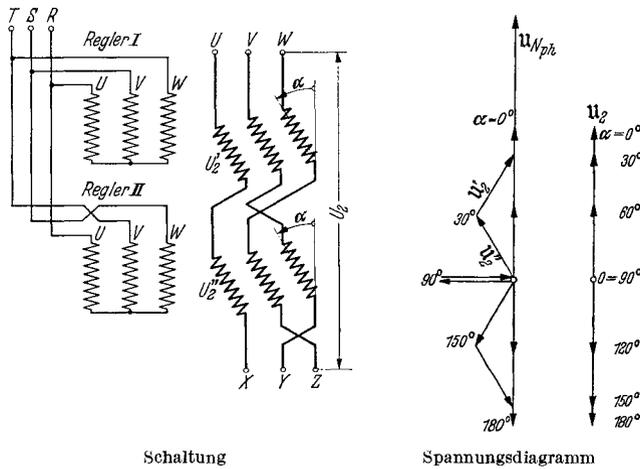


Abb. 81. Doppeldrehregler. Drehfeld läuft in beiden Reglern verschieden um; daher Phasentausch auf Primär- und Sekundärseite des einen Reglers erforderlich.

um. Die in der Phase nach zwei verschiedenen Richtungen schwenkbaren Sekundärspannungen sind in Reihe geschaltet und ergeben entsprechend Spannungsdiagramm in Abb. 81 eine der Größe nach veränderliche, der Phase nach konstante Gesamtsekundärspannung. Diese kann allein oder als Zusatzspannung zur Primärspannung einem Verbraucher zugeführt werden. Die Prüfung schließt sich eng an die der Einfachdrehregler an. Die *Einstellung* geschieht folgendermaßen. Zuerst bestimmt man den richtigen Feldumlauf, indem man an jedem Regler einen motorischen Kurzschlußversuch macht. Die Läufer müssen sich in zwei verschiedenen Richtungen zu verstellen suchen. Andernfalls ist bei einem Regler der Netzanschluß in zwei Zuleitungen zu vertauschen. Dann stellt man, am besten durch einphasige Erregung auf der Primärseite, die Läuferphasen achsengleich zu den Ständerphasen, verbindet die Anfänge der einen Sekundärwicklung mit den Enden der zweiten Sekundärwicklung und verkettet die Enden miteinander. Die drei freien Enden müssen die doppelte, verkettete Spannung an-

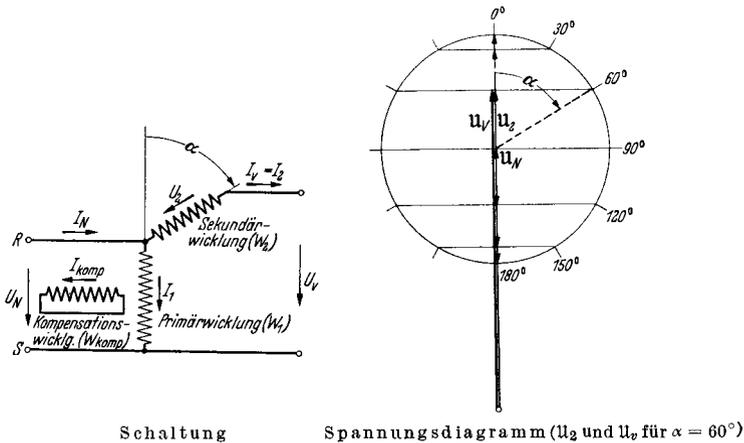
zeigen. Durch Verstellen der nunmehr starr miteinander gekuppelten Läufer ändert sich diese Spannung bis auf Null und steigt bei weiterer Verstellung wieder auf den Höchstwert an.

Wenn der Doppeldrehregler in Sparschaltung verwendet wird, muß jetzt der Sternpunkt wieder gelöst und die Verbindung der drei frei gewordenen Sekundärklemmen mit den Primärnetzklammern hergestellt werden.

Der Primärstrom ist in beiden Reglern immer verschieden groß, da der dem Sekundärstrom entsprechende Anteil sich in verschiedener Phasenlage zum Magnetisierungsstrom addiert.

Von den kleinen Spannungsabfällen abgesehen, bleibt die Verbraucherspannung beim Doppeldrehregler in Phase mit der Netzspannung.

Der Einphasendrehregler. Beim einphasigen Drehregler, der mit einem Wechselfeld arbeitet, ist die Größe der in der Sekundärwicklung



Schaltung

Spannungsdiagramm (u_2 und u_0 für $\alpha = 60^\circ$)

Abb. 82. Einphasendrehregler.

induzierten Spannung U_2 vom räumlichen Verstellwinkel gegenüber der Primärwicklung abhängig. Sie ändert sich mit dem \cos dieses Winkels. Die Phasenlage der Sekundärspannung stimmt für Winkel zwischen 0 und 90° mit der der Primärspannung überein; für größere Winkel zwischen 90 und 180° liegt sie in Gegenphase zu ihr (Abb. 82). In der 0° - und in der 180° -Stellung stimmen die magnetischen Achsen der Primär- und der Sekundärwicklung miteinander überein. Dies bewirkt, daß sich auch bei Stromdurchgang nur der Hauptfluß ausbilden kann. In allen anderen Stellungen hat die stromdurchflossene Sekundärwicklung eine magnetisierende Komponente in Richtung der Primärwicklung und eine zweite senkrecht hierzu. Letztere versucht einen Querfluß zu erzeugen, der einen sehr hohen induktiven Spannungsabfall zur Folge haben würde. Zu seiner Aufhebung dient eine weitere, in sich ständig kurzgeschlossene Ständerwicklung. Diese heißt Kompensationswicklung. Sie führt einen Strom, der vom Windungszahlverhältnis und vom \sin des Verstellwinkels abhängt. Die Primärwicklung

führt einen Strom, der aus dem Magnetisierungsstrom \mathfrak{I}_1 und einem vom Sekundärstrom abhängigen Anteil \mathfrak{I}'_v besteht. Letzterer ist dem \cos des Verstellwinkels proportional und natürlich auch vom Windungsverhältnis abhängig. Es gelten folgende Beziehungen:

$$\mathfrak{I}'_v = \mathfrak{I}_v \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot \cos \alpha,$$

$$\mathfrak{I}_{\text{komp}} = \mathfrak{I}_v \cdot \frac{w_2}{w_{\text{komp}}} \cdot \sin \alpha,$$

wobei \mathfrak{I}'_v = Anteil des Primärstromes, der von \mathfrak{I}_2 herrührt, $\mathfrak{I}_{\text{komp}}$ = Strom in der Kompensationswicklung, α = Verstellwinkel, w_1 , w_2 , w_{komp} = Windungszahl der drei Wicklungen unter Berücksichtigung der zugehörigen Wickelfaktoren sind.

Ströme und Spannungen sind im *Diagramm* der Abb. 83 zu sehen. Die Spannungsabfälle sind dabei vernachlässigt worden. Man erkennt, daß die Primär-

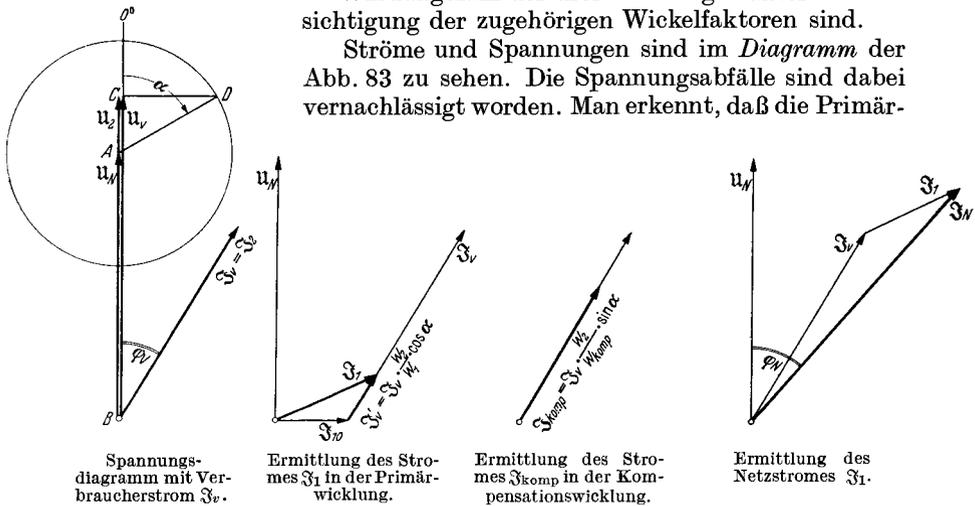


Abb. 83. Diagramm des Einphasendrehreglers.

wicklung des voll belasteten Drehreglers in der 90° -Stellung nur den Magnetisierungsstrom führt, und daß in der 0° - bzw. der 180° -Stellung die Kompensationswicklung stromlos wird.

Bei der praktischen Ausführung besitzt der Ständer häufig eine normale Drehstromwicklung, von der zwei in Reihe geschaltete Phasen die Primär- und die dritte in sich kurzgeschlossene Phase die Kompensationswicklung bildet. Der Läufer hat nur eine Wicklung, die die Hälfte des Umfanges einnimmt.

Das Drehmoment des einphasigen Drehreglers pulsiert mit doppelter Netzfrequenz. Der Regler neigt stark zu Vibrationen, welche durch geeignete konstruktive Maßnahmen, z. B. durch dämpfend wirkende Bremsen, möglichst gemildert werden.

Die Prüfung findet im Leerlauf und im Kurzschluß statt. Im ersteren wird auch die Übersetzung gemessen, indem man den Regler so lange verstellt, bis die Sekundärspannung U_{2_0} ihren Höchstwert erreicht. Im Kurzschluß verstellt man den Regler, bis der aufgenommene Strom

lage der Schlupfspannung bei Belastungsschwankungen wirkt die Kompensationsspannung nur bei einer bestimmten Last rein phasen-schiebend. Bei anderen Lasten hat sie auch einen Einfluß auf die Drehzahl der Asynchronmaschine.

Die Phasenlage der Schlupfspannung erhält man bei größeren Maschinen, wo die Ständerkupferverluste vernachlässigt werden dürfen und die für Regelsätze praktisch in Betracht kommen, nach Abb. 84. Man verbindet den beliebigen Lastpunkt P , der also nicht etwa auf dem Heylandkreis zu liegen braucht, mit dem Punkt P_{ki} . Diese Verbindungslinie schneidet den Heylandkreis, der durch den normalen Leerlaufpunkt P_0 und den Punkt des ideellen Kurzschlußstroms P_{ki} geht und dessen Mittelpunkt auf der Nulllinie liegt, im Punkte P' . Die

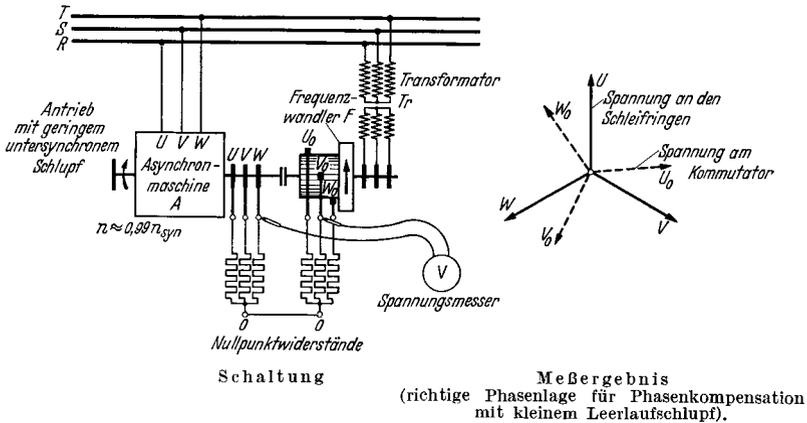


Abb. 85. Spannungsausmessung nach Größe und Phasenlage mittels zweier Nullpunktswiderstände. (Verbindung zwischen beiden Maschinen bleibt hierbei offen.)

Gerade P_0P' gibt die Richtung der Schlupfspannung an. Diese ist nach oben gerichtet für untersynchrone Drehzahl und nach unten für übersynchrone Geschwindigkeit. Die Höhe der Schlupfspannung hängt ab von der Höhe des Schlupfes $s\%$ und von der Phasenlage des Belastungspunktes P' . Sie ist gleich:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Schlupf-} \\ \text{spannung} \end{array} \right\} \text{ in V} = \frac{\text{Schlupf in } \%}{100} \cdot (\text{Läuferstillstandsspannung}) \cdot \frac{P P_{ki}}{P_0 P_{ki}}$$

Die getroffene Vernachlässigung des primären Widerstandes bringt keinen merklichen Fehler mit sich.

Die Prüfung der Regelsätze erfolgt erst nach eingehender Prüfung der Einzelmaschinen, also der Hauptasynchronmaschine selbst und der auf S. 303—312 beschriebenen Kommutatormaschinen. Vor der Inbetriebnahme des Satzes folgt als wichtigste Maßnahme die genaue Ermittlung der Phasenlage der Spannungen im Sekundärkreis, die nachstehend behandelt werden soll.

Die Ausmessung sei am Beispiel der sekundärseitig durch einen Frequenzwandler gespeisten Asynchronmaschine dargelegt nach den

Gesichtspunkten, die ohne weiteres auf andere Anordnungen übertragen werden können. Die Schaltung ist in Abb. 85 wiedergegeben. Die Asynchronmaschine A wird unmittelbar und der starr mit ihr gekuppelte Frequenzwandler F über einen spannungsverringernenden Transformator Tr vom gleichen Netz gespeist. Die Schleifringe von A sind mit den Kommutatorbürsten von F verbunden. Die Probe beginnt mit der Prüfung der an den Kommutatorbürsten bei laufendem Frequenzwandler auftretenden Frequenz. Die Sekundärkreise sind natürlich vorerst noch offen. Man legt einen Drehspulspannungsmesser an die Bürsten und beobachtet den Zeiger. Wenn dieser langsam hin- und herschwingt, so liegt die gewünschte Schlupffrequenz vor. Bleibt er dagegen auf 0 stehen und schwingt dabei sehr schnell in sich selbst, so ist dies ein Zeichen für sehr hohe Frequenz, also für verkehrte Phasenfolge auf der Schleifringseite des Wandlers. Diese wird durch Vertauschen zweier Zuleitungen auf der Primärseite des Transformators Tr oder auf der Schleifringseite des Wandlers berichtigt. Die nächste Probe gilt der Phasenfolge von Schlupf- und Frequenzwandlerspannung. Man ermittelt die zeitliche Folge der an den Schleifringen der leicht schlupfenden Asynchronmaschine auftretenden Schlupfspannung mit Hilfe dreier Gleichstromspannungsmesser (Drehspulgeräte) nach Abb. 86. Die Drehzahl der Asynchronmaschine muß dabei etwas unter der Synchrongeschwindigkeit liegen, da bei übersynchronem Lauf die Phasenfolge der Schlupfspannung umkehrt. Man erreicht dies durch hohe Regelwiderstände im Ankerkreis der unbelastet laufenden Maschinen

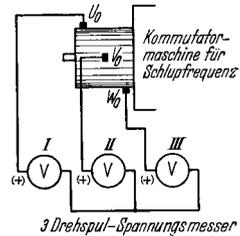


Abb. 86. Bestimmung der Phasenfolge bei Schlupffrequenz mittels dreier Drehspul-Spannungsmesser, deren zeitliche Ausschlagsfolge die Phasenfolge am Kommutator (oder an Schleifringen) anzeigt. Achtung auf Drehzahl, da bei Übersynchronismus Phasenfolge umkehrt.

oder durch Antrieb derselben von einer Hilfsmaschine aus, wobei die Schleifringe offen bleiben. Die drei Spannungsmesser schlagen nacheinander im Takte der Schlupffrequenz aus. Man bezeichnet die Geräte nach der Reihenfolge des Ausschlags mit I , II , III und die mit ihnen verbundenen Schleifringe mit U , V , W . Bedingung ist, daß der Sternpunkt der Spannungsmesser an Klemmen gleicher Polarität hergestellt wurde. (Wenn man Wechselstromgeräte benutzt, also z. B. Weicheisen- oder elektrodynamische Instrumente wählt, so erhält man die doppelte Anzahl von Anschlägen in der Zeiteinheit. Wenn wiederum I , II , III die Reihenfolge der Ausschläge angibt, müssen die zugehörigen Ringe mit U , W , V , also mit anderer Phasenfolge wie vorher, bezeichnet werden.)

Dieselbe Bestimmung der Phasenfolge wird bei den Kommutatorbürsten des Frequenzwandlers angewendet. Wenn diese falsch ist, darf sie nur durch entsprechende Umbezeichnung auf der Kommutatorseite selbst berichtigt werden, keinesfalls aber der Versuch gemacht werden, etwa primär zwei Phasen zu tauschen. Dies hätte das Auftreten von praktisch doppelter Netzfrequenz statt Schlupffrequenz zur Folge. Im übrigen sei bemerkt, daß die Phasenfolge bei allen läuferseitig gespeisten Kommutatormaschinen der entgegengesetzten Ankerdrehrichtung ent-

spricht. Man gelangt also von der Bürste U_0 zur Bürste V_0 , indem man gegen die Drehrichtung des Kommutators wandert, und von da im gleichen Sinne zur Bürste W_0 . Bei ständergespeisten Kommutatormaschinen hängt die Phasenfolge auf der Kommutatorseite nur von der Phasenfolge der Erregerspannung, nicht aber von der Drehrichtung ab. Die Phasenfolge der ständerlosen, eigenerrigten Drehstromerregemaschinen stimmt dagegen immer mit der Drehrichtung überein.

Anschließend wird die Phasenlage der Sekundärspannung, also der Drehzahlregelspannung U_{regel} oder der Kompensationsspannung U_{komp} bzw. ihrer Summenspannung, zur Schlupfspannung der Asynchronmaschine geprüft und richtig eingestellt. Man benutzt zur Ausmessung am besten zwei sog. Nullpunktswiderstände, von denen der eine nach Abb. 85 an die drei Schleifringe und der andere an die drei Kommutator-

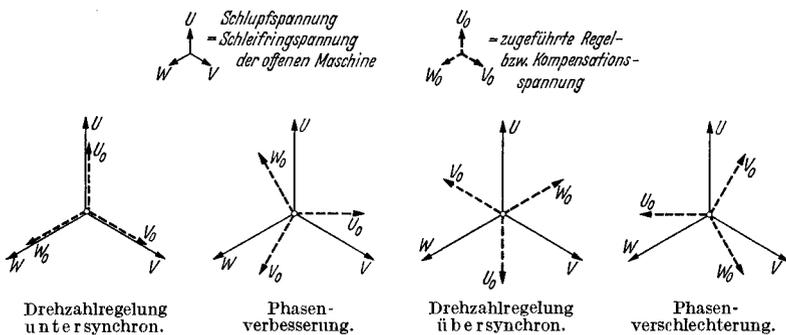


Abb. 87. Erforderliche Lage der Spannungssterne bei Drehzahl- oder Phasenregelung von Asynchronmaschinen.

bürsten gelegt wird. Die künstlich gebildeten Nullpunkte werden miteinander verbunden. Durch systematische Ausmessung der Spannungen zwischen den drei Schleifringen U, V, W und den drei Kommutatorbürsten U_0, V_0, W_0 und dem Nullpunkt bzw. untereinander, kann die Lage des Spannungssterne der Schlupfspannung der Asynchronmaschine und der ihr zugeführten Sekundärspannung eindeutig ermittelt werden. Am besten trägt man die Sterne auf Papier auf. In den Darstellungen der Abb. 87 ist die erforderliche Relativlage der beiden Sterne für die einzelnen Fälle: Drehzahlregelung nach unten, Drehzahlregelung nach oben, Phasenverbesserung, Phasenverschlechterung wiedergegeben.

Im allgemeinen ist es ein Zufall, wenn die Phasenlage von Schlupf- und Sekundärspannung von vornherein die richtige ist. In den meisten Fällen muß sie erst eingestellt werden. Die Lage der Schlupfspannung ist unveränderlich, sie könnte nur durch räumliche Verdrehung des Motorgehäuses beeinflusst werden. Dies scheidet aus. Also kann der Eingriff nur bei der zugeführten Sekundärspannung erfolgen. Hier bestehen zwei Möglichkeiten. Entweder man beeinflusst die Phasenlage der Erregerspannung, oder aber man verschiebt die Bürstenbrücke. Ersteres muß geschehen, wenn die Kommutatormaschine Wendezonen oder eine Kompensationswicklung besitzt, da dann die Bürstenbrücke nicht bewegt

werden darf. Letzteres darf bei allen ständerlosen Maschinen gemacht werden. Bei läufergespeisten Maschinen hat man noch ein weiteres Hilfsmittel in der Hand, das in der Verstellung der einen gegen die andere Kupplungsscheibe besteht. Hierbei bleiben die Bürsten also in ihrer alten Lage, aber man verdreht die momentane Achse des Drehfeldes, da man ja den Anker der Kommutatormaschine samt den Anschlußpunkten der Schleifringe aus der bisherigen Lage verdreht. Bei ständergespeisten Maschinen hätte diese Maßnahme keinen Zweck. Im bisher zugrunde gelegten Fall des Frequenzwandlers als Hintermaschine greift man, sofern die Maschine keinen Ständer hat, zur Bürstenverschiebung als dem einfachsten Mittel. Verdrehung im Sinne der Drehrichtung ergibt Voreilung, Verdrehung gegen die Drehrichtung also Nacheilung. Im Falle der mit Ständer und Kompensationswicklung ausgerüsteten Maschine verstellt man die Kupplung. Verstellt man dabei den Anker in seiner Drehrichtung, so entspricht dies einer Drehung der Sekundärspannung im Sinne einer Nacheilung; umgekehrt entspricht Verstellung gegen die Drehrichtung einer Voreilung. Der Zusammenhang beider Maßnahmen wird klar, wenn man bedenkt, daß einer Verdrehung der Bürstenbrücke im einen Sinn offenbar eine Verstellung des Ankers im andern Sinn entspricht, da es auf die Relativbewegung beider ankommt. Praktisch geht man so vor, daß man zuerst die gewünschte Lage und Größe der Spannungsterne aufzeichnet und nunmehr die Verdrehung von Bürsten, Kupplung oder Erregerspannung so weit durchführt, bis die Differenzspannung gleichbezeichneter Schleifringe und Bürsten den der Zeichnung entnommenen Sollwert erreicht. Durch Ausmessung weiterer Spannungen zwischen ungleich bezeichneten Ringen und Bürsten erhält man die Gewißheit, die Phasenverschiebung im richtigen Sinne vorgenommen zu haben.

Schließlich erfolgt das Zuschalten der Hintermaschine auf den Hauptasynchronmotor. Am besten regelt man dessen Drehzahl möglichst nahe an Synchronismus heran und verringert die Spannung der Hintermaschine auf Null oder den möglichen Kleinstwert. Dann kann man bei kleinstem Ausgleichsstrom zuschalten. Als ungefähren Anhalt kann man sich merken, daß die Überbrückung einer Restspannung von je 1% einen Ausgleichsstrom von 100% zur Folge hat.

Wenn anschließend die Sekundärspannung auf vollen Wert gebracht wird, kann man an der Drehzahl und am Leerlaufstrom, den die Asynchronmaschine dem Netz entnimmt, sofort die Einstellung nochmals überprüfen. Bei reiner Drehzahlregelung muß die Leerlaufdrehzahl betragen:

$$n_0 = n_{\text{syn}} \cdot \left(1 \pm \frac{U_{\text{sec}}}{U_{2_0}}\right),$$

dabei gilt das $+$ -Zeichen für gegenphasige Lage, das $-$ -Zeichen für gleichphasige Lage von U_{sec} und U_{2_0} .

Bei reiner Phasenregelung ändert sich die Drehzahl im Leerlauf fast nicht. Der Leerlaufstrom im Netz jedoch beträgt:

$$I_{0\text{komp}} = I_0 - \frac{U_{\text{sec}} - 3}{0,866 \cdot R_{\text{schl}}} \cdot \frac{U_{2_0}}{U_1},$$

wobei das —-Zeichen vor dem zweiten Glied für den praktisch ausschließlich interessierenden Fall der Phasenverbesserung gilt. Im Falle der Phasenverschlechterung (Spannungsregelung nach unten bei Phasenschiebern!) muß es durch ein +-Zeichen ersetzt werden. In den beiden Gleichungen bedeuten wie bisher U_1 die primäre Netzspannung, U_{2_0} die Läuferstillstandsspannung des Asynchronmotors zwischen zwei Schleifringen, U_{sec} die zugeführte Sekundärspannung zwischen zwei Bürsten, R_{schl} der zwischen zwei Schleifringen gemessene Ankerwiderstand des Asynchronmotors und I_0 dessen normalen Leerlaufstrom. Die Zahl 3 berücksichtigt den Spannungsabfall der Bürsten auf Ringen und Kommutator und in der Zuleitung; sie ist gleich $\sqrt{3} \cdot (0,3 + 1,0 + 0,4)$.

Die einfachste Methode zur Kontrolle der richtigen Phasenlage der Kompensationsspannung besteht darin, daß man die Netzspannung kurz vor und kurz nach dem Zuschalten der Hintermaschine beobachtet. Diese steigt etwas an, wenn die Asynchronmaschine richtig kompensiert wird.

Die Prüfung der Regelsätze besteht im wesentlichen in der Aufnahme von Belastungspunkten bei verschiedenen Werten der Regel- bzw. der Kompensationsspannung. Meistens ist aber ihre Leistung recht groß, oder es stehen nicht immer alle Hilfsmaschinen zur Verfügung. In diesen Fällen erlaubt das nachstehend erläuterte, vereinfachte Kreisdiagramm einen guten Überblick über das Verhalten des Satzes im Betrieb.

Das vereinfachte Kreisdiagramm der geregelten Asynchronmaschine. Dieses Diagramm nach Abb. 88 gilt genügend genau für Maschinen mit einer Leistung ab einigen hundert Kilowatt, denen eine von der Last und der Drehzahl praktisch unabhängige Regel- oder Kompensationsspannung zugeführt wird. Der Ohmsche Widerstand der sekundären Spannungsquelle wird vernachlässigt, oder aber durch einen Zuschlag zu R_{schl} berücksichtigt. Die Spannungsabfälle der Schleifring- und der Kommutatorbürsten werden dagegen wie oben durch einen Wert von 3 V in Rechnung gesetzt. Der Ständerwiderstand der Asynchronmaschine wird dagegen nicht berücksichtigt. Dies bedingt einen vernachlässigbar kleinen Fehler. Das Diagramm kann gezeichnet werden, wenn man folgende Werte kennt: Leerlaufstrom I_0 , ideellen Kurzschlußstrom $I_{k_i} = I_k / \sin \varphi_k$, Widerstand zwischen zwei Schleifringen R_{schl} , Stillstandsspannungen zwischen zwei Schleifringen U_{2_0} und die zugeführte Sekundärspannung U_{sec} nach Größe und Phase. Andererseits kann letztere aus dem Diagramm gefunden werden, wenn zu einer bestimmten Belastung Phasenlage des Stromes und Höhe der Drehzahl gefordert werden.

Der Kreis durch P_0 und durch P_{k_i} , dessen Mittelpunkt M auf der Nulllinie liegt, gilt für die unregelte Maschine. Der Mittelpunkt M' des geregelten Motors ergibt sich durch eine Verschiebung um die Strecke MM' , die gleich ist:

$$\text{Mittelpunktsverschiebung } MM' = -\frac{1}{2} \left(\frac{u_{\text{regel}}}{m_{u_{\text{sec}}}} + \frac{u_{\text{komp}}}{m_{u_{\text{sec}}}} \right) = -\frac{1}{2} u_{\text{sec}}.$$

eben untersuchten Betriebspunkt P' mit P_{ki} verbindet und das von diesen Linien auf der Senkrechten abgeschnittene Stück in s gleiche Teile unterteilt. Jedes von ihnen entspricht dann 1% Schlupf, und der Schlupf zu einem beliebigen Punkt wird gefunden, indem man ihn mit P_{ki} verbindet und den Wert des Schlupfes auf der Senkrechten abliest.

Die Primär- und Sekundärströme können unmittelbar dem Diagramm entnommen werden. Dasselbe gilt für die primäre Schein-, Blind- und Wirkleistung.

Wenn bei einer bestimmten Last der $\cos\varphi$ und der Schlupf vorgeschrieben sind und die Regel- und die Kompensationsspannung gesucht werden, geht man folgendermaßen vor. Man legt den Punkt P' unter Berücksichtigung des mutmaßlichen Wirkungsgrades und des geforderten Leistungsfaktors hin. Dann sucht man den Punkt P'' auf der Schlupfspannungslinie, indem man macht:

$$P_0 P'' = \frac{s\%}{100} \cdot U_{2_0} \cdot \frac{P_{ki} P'}{P_{ki} P_0} \cdot \frac{1}{m_{u_{sec}}} \dots$$

Durch P'' zieht man die Senkrechte und durch P' die Waagerechte, welche sich im Punkte P''' schneiden. Die Regelspannung ist gleich $P''' P'' \cdot m_{u_{sec}}$ und die Kompensationsspannung gleich $P''' P' \cdot m_{u_{sec}}$.

Der Asynchronmotor mit ständerloser, eigenerregter Drehstromerregemaschine. Die großen, langsam laufenden Asynchronmaschinen

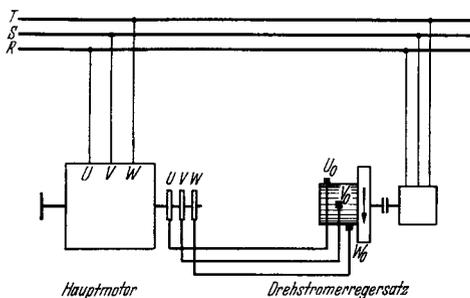


Abb. 89. Asynchronmotor mit eigenerregter, ständerloser Drehstromerregemaschine. (Bei Generatorbetrieb sind zwei Sekundäranschlüsse zu tauschen.)

haben Leistungsfaktoren, die meistens unter 0,8 liegen. Wegen des entsprechend hohen Blindlastbedarfes ist eine Verbesserung des $\cos\varphi$ erwünscht. Daher werden solche Motoren oft mit Drehstromerregemaschinen, wie sie auf S. 303 eingehend behandelt werden, ausgerüstet. Die Schaltung zeigt Abb. 89. Der Hauptmotor liegt am Netz und ist läuferseitig mit den auf einem Kommutator schleifenden Bürsten

der Erregemaschine verbunden. Diese wird von einem kleinen Antriebsmotor angetrieben, der nur ihre Reibungsverluste zu decken hat. Bei richtiger Verbindung der Schleifringe U, V, W mit den Bürsten U_0, V_0, W_0 gibt die Erregemaschine eine um 90° gegen den aufgenommenen Strom nacheilende Spannung ab, welche phasenverbessernd auf den Asynchronmotor einwirkt.

Die Prüfung einer auf diese Weise kompensierten Asynchronmaschine erfolgt erst als normaler Motor unter Vornahme der Leerlauf-, Kurzschluß- und Belastungsversuche und anschließend mit Erregemaschine nur unter Vornahme der Belastungsablesungen. Weitere Proben, insbesondere Kurzschluß- und Leerlaufmessungen, entfallen. Eine Einstellung der Phasenlage ist nicht erforderlich, sondern es ist nur die

richtige Phasenfolge der Schleifringe und der Kommutatorbürsten zu bestimmen. Die Phasenfolge der Schleifringe kann, wie auf S. 147 angegeben, mit Hilfe dreier Drehspulspannungsmesser bei leicht schlüpfendem Motor ermittelt werden. Die Phasenfolge der Erregermaschine ist einfach gleich der räumlichen Folge der Bürsten in Drehrichtung des Kommutators. Wenn eine beliebige Bürste mit U_0 bezeichnet wird, so heißt die in Umlaufrichtung folgende V_0 und die nächste W_0 . Da die Verbindung der Bürsten mit den Anschlußklemmen leicht verfolgt werden kann, ist deren Bezeichnung mithin gut zu überprüfen und gegebenenfalls zu berichtigen.

Die Inbetriebnahme kann folgendermaßen geschehen: Die Asynchronmaschine wird hochgefahren, der Anlasser in Kurzschlußstellung gebracht und dann die Umschaltung der Schleifringe auf die laufende Erregermaschine vorgenommen.

Die kurze Zeit, in welcher der Sekundärkreis dabei unterbrochen wird, spielt auch bei belasteter Maschine keine Rolle. Der richtige Anschluß der Erregermaschine läßt sich ohne weiteres an der Stromaufnahme der schwach oder voll belasteten Maschine erkennen, die gegenüber vorher zurückgegangen sein muß. Wenn sie dagegen angestiegen ist, müssen zwei der Zuleitungen zur Erregermaschine miteinander vertauscht werden.

Falls dies Schwierigkeiten bereitet, kann auch die Drehrichtung der Erregermaschine umgekehrt werden, sofern deren Bürsten nicht für Lauf in einer bestimmten Richtung vorgesehen sind. Da keinerlei nachteilige Folgen bei unrichtigen Anschlüssen auf der Sekundärseite auftreten, verzichtet man im Prüffeld oft auf die genaue Feststellung der Phasenfolge der drei Schleifringe und läßt einen einzigen Versuch über das richtige oder falsche Zusammenarbeiten entscheiden. Die zusammengehörigen Klemmen sind nachher genau zu bezeichnen, wobei man die Bezeichnung der Kommutatorbürsten als maßgebend zugrunde legt.

Wenn der kompensierte Asynchronmotor als Generator laufen soll, müssen zwei Sekundärleitungen getauscht werden, da sich bei Übersynchronismus die Phasenfolge der Schleifringe umkehrt. Andernfalls würde die Erregermaschine eine Phasenverschlechterung bewirken.

Die Ergebnisse des Belastungsversuches werden in der normalen Weise dargestellt. Es empfiehlt sich, die Ströme in Ständer und Läufer, den Leistungsfaktor, den Schlupf und den Wirkungsgrad für Betrieb mit und ohne Erregermaschine auf gemeinsamen Blättern darzustellen, um einen unmittelbaren, vergleichenden Überblick für beide Betriebs-

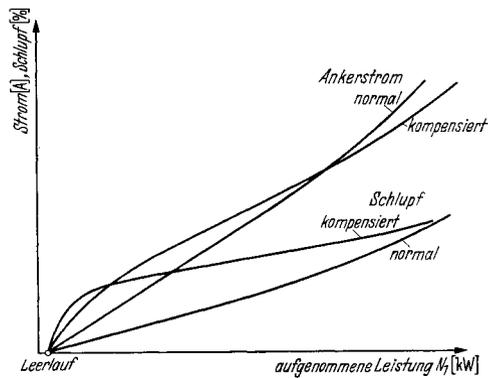


Abb. 90. Schlupf und Ankerstrom des normalen und des mit eigenerregerter Erregermaschine kompensierten Asynchronmotors.

zustände zu gewinnen. Abb. 90 zeigt den charakteristischen Verlauf des Ankerstromes und des Schlupfes. Man bemerkt, daß bei Leerlauf keinerlei Phasenverbesserung erzielt werden kann.

Die Wirkungsgradbestimmung erfolgt genau wie bei dem gewöhnlichen Asynchronmotor nach dem Einzelverlustverfahren. Insbesondere werden die Sekundärverluste ebenfalls aus Schlupf und Luftspaltleistung errechnet. Den Gesamtverlusten ist natürlich die Leistungsaufnahme des Antriebsmotors der Erregermaschine zuzuzählen. Nur wenn der Schlupf nicht gemessen wurde, also wenn keine Belastungsaufnahmen durchgeführt werden konnten, berechnet man die Sekundärverluste aus den Stromwärmeverlusten der Ankerwicklung des Hauptmotors und der Erregermaschine, den Übergangsverlusten der Schleifring- und Kommutatorbürsten und den Eisenverlusten der Erregermaschine. Die gesamten Übergangsverluste bei Vollast betragen rund $5 \cdot I_2$ in Watt.

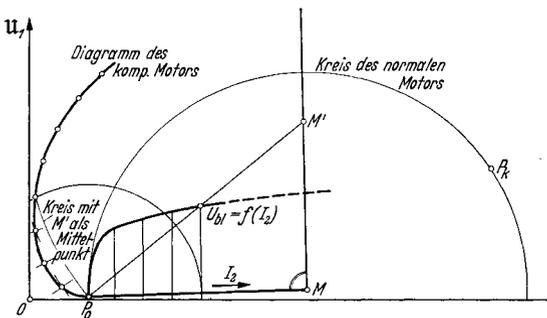


Abb. 91. Punktweise Ermittlung des Diagrammes des durch eigeneregte Erregermaschine kompensierten Asynchronmotors mittels deren Sättigungskurve $U_{b1} = f(I_2)$.

Die Ständerströme des kompensierten Asynchronmotors liegen nicht mehr auf einem Kreis, sondern, wie aus dem Diagramm in Abb. 91 zu erkennen ist, auf einer Kurve höherer Ordnung. Diese kann genau ermittelt werden, wenn der Leerlaufstrom I_0 , der Kurzschlußstrom I_k ,

der zwischen zwei Schleifringen zu messende Ankerwiderstand des Asynchronmotors R_{schl} und die Sättigungskennlinie der Erregermaschine bekannt sind. Ein Zuschlag von 10% zu R_{schl} berücksichtigt den Widerstand der Erregermaschine, der, falls bekannt, auch unmittelbar zu R_{schl} addiert werden kann. Auch er ist zwischen zwei Bürsten zu messen. Wenn die Sättigungskennlinie der Erregermaschine fehlt, ersetzt man sie durch eine Gerade, die durch den Punkt der vollen Spannung bei vollem Ankerstrom und durch 75% dieses Spannungswertes bei Stromlosigkeit geht. Diese Ersatzkennlinie ist bis 20% des Stromes gut brauchbar.

Man legt I_0 und I_k hin und gewinnt die Punkte P_0 und P_k . Durch den Mittelpunkt M des normalen Kreises wird eine Senkrechte zu P_0M gezogen. Dann trägt man über P_0M als Nulllinie die Sättigungskennlinie der Erregermaschine auf. Als Abszisse dienen die verschiedenen Ankerströme, die im Sekundärstrommaßstab $a_2 = a_1 \cdot U_1/U_2$ abgetragen werden. Die Ordinaten sind die zugehörigen Spannungen, welche im Sekundärspannungsmaßstab $m_{u_{sec}} = 0,866 \cdot a_2 \cdot R_{schl} + \frac{3}{P_0 P'}$ aufgetragen werden. $P_0 P'$ ist dabei die ungefähre Länge des Sekundärnennstromes in Millimeter.

Die punktweise Ermittlung der Ständerstromortskurve geht ohne weiteres aus der Abb. 91 hervor. Der Schlupf kann keiner Schlupfgeraden entnommen werden, sondern ist punktweise zu errechnen zu:

$$\text{Schlupf } s\% = 100 \cdot \frac{\text{Gesamtsekundärverluste}}{\text{Leistungsabgabe} + \text{Gesamtsekundärverluste}}.$$

Das Diagramm gibt einen guten Einblick in die Verhältnisse, die bei Überlast und bei kleinen Lasten auftreten. Zu beachten ist jedoch, daß bei Schlupfwerten über 4—5% die von der Erregermaschine abgegebene Spannung trotz steigender Ankerstromstärke wieder zurückgeht, da die Relativgeschwindigkeit der Ankerleiter der Erregermaschine zum Drehfeld kleiner wird. In der Abb. 91 ist diesem durch Abbiegen der Sättigungskennlinie Rechnung getragen. Zwischen Leerlauf und Vollast braucht man diese Tatsache noch nicht zu berücksichtigen.

Durch umgekehrte Konstruktion kann zu einem beliebigen Punkte P' die erforderliche Spannung der Erregermaschine gefunden werden.

C. Die Synchronmaschinen.

Aufbau. Die Synchronmaschinen bestehen aus dem mit Gleichstrom erregten Induktor und dem die Ein- oder Mehrphasenwechselstrom-Wicklung tragenden Anker. Das Polsystem ist bei vier- und mehrpoligen Maschinen meistens mit ausgeprägten Polen ausgerüstet, während die zweipoligen und teilweise die ganz großen vierpoligen Generatoren und Motoren einen trommelförmigen Induktor besitzen. Man bezeichnet letztere als Turboläufer. Die Erregerwicklung der Einzelpolmaschinen ist als konzentrische Wicklung auf den Polen aufgebracht; bei den Turboläufern ist sie dagegen verteilt angeordnet und in Nuten eingebettet. Außer bei Maschinen kleiner Leistung ist der Induktor als der sich drehende Teil der Maschine ausgebildet, der im allgemeinen im Innern des Ankers umläuft und nur selten zur Erzielung eines besonders hohen Schwungmomentes (Dieselantrieb) außenrotierend angeordnet wird. Die Pole können massiv, ganz oder teilweise geblättert sein. Der aus Dynamoblechen aufgebaute Ständer trägt in Nuten die Ankerwicklung. In den Polschuhen befindet sich, sofern sie aus Blechen aufgebaut sind, häufig eine sog. Dämpferwicklung, die aus mehreren, den Schuh in axialer Richtung durchsetzenden Stäben aus Kupfer, Messing, Bronze oder Eisen gebildet wird, die durch Endringe auf beiden Seiten zu einem gemeinsamen Kurzschlußkäfig verbunden sind. Bei massiven Polschuhen fehlen die Stäbe; Kurzschlußringe um die Pole herum ergeben einen unvollkommenen, aber doch ausreichenden Käfig. Der aus Kupfer aufgebaute Kurzschlußkäfig dient der Dämpfung der aus irgendeinem Grund angeregten Pendelungen und vor allem bei einphasigen oder unsymmetrisch belasteten Maschinen zur Aufhebung des inversen Feldes. Der aus Widerstandswerkstoff ausgeführte Käfig ermöglicht den Selbstanlauf der Synchronmaschine als Motor auch gegen beachtliche Gegenmomente.

Die Prüfung der Synchronmaschine ist grundsätzlich die gleiche für den Motor und für den Generator. Sie besteht im wesentlichen im Leer-

lauf-, Kurzschluß- und Belastungsversuch und in der Dauerprobe zur Bestimmung der Erwärmung. Ergänzend finden Untersuchungen statt über die Kurvenform der Spannung, über die Höhe des Stromes und das Verhalten der Maschine bei Stoßkurzschluß sowie über den Hochlauf der selbstanlaufenden Motoren. Durch besondere Messungen, die der Beschaffung von Unterlagen und der Bestimmung kennzeichnender Größen dienen, kann die Prüfung vervollkommenet werden. Der Dauerlauf großer Maschinen muß meistens mit stark verringerter Spannung, häufig aber im Kurzschluß gefahren werden. Die Verluste werden durchweg im Leerlauf und Kurzschluß einzeln ermittelt. Seltener werden sie im Übererregungsverfahren nach S. 42 unmittelbar gemessen. Die Bestimmung des Wirkungsgrades findet nach dem Einzelverlustverfahren statt. Die Einphasenmaschinen werden der gleichen Prüfung wie die Mehrphasenmaschinen unterzogen.

Die Streuprobe ohne Induktor. Bei größeren Synchronmaschinen wird vor Einbau des Induktors die sog. Streuprobe durchgeführt, die die Bestimmung des Ständerstreuwiderstandes bzw. der ihr entsprechenden Ständerstreuspannung ermöglicht. Gleichzeitig ist sie eine erste Prüfung der Ständerwicklung auf Richtigkeit der Schaltung und Windungszahl. Bei dem Versuch wird der fertiggeschaltete Ständer an kleine Spannung gelegt, die so lange gesteigert wird, bis der aufgenommene Strom die Höhe des Nennstromes erreicht hat. Die aufzuwendende Spannung teilt sich auf in den Betrag zur Deckung der Streuspannung der Ständerwicklung und den restlichen Wert zur Deckung der vom Bohrungsfelde induzierten Bohrungsspannung. Letztere läßt sich recht genau berechnen. Zieht man sie von der Gesamtspannung ab, so erhält man den Wert der gesuchten Ständerstreuspannung. Die Formel für die Bohrungsspannung lautet:

$$U_{\text{bohrphase}} = \frac{1}{6,63} \cdot \left(\frac{w \cdot f_w}{100} \right)^2 \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{1}{2p} \cdot \left(l_{\text{anker}} - \frac{1}{2} l_{\text{vk}} + \frac{\tau_p}{6} \right) \cdot I_{\text{phase}},$$

wobei bedeuten: w, f_w Windungszahl und Wickelfaktor der Ständerwicklung je Phase, f die Frequenz, $2p$ die Polzahl, l_{anker} die Länge des Eisenpaketes, l_{vk} die Summe aller Ventilationskanäle, beide in Zentimeter, τ_p die Polteilung in Zentimeter, I_{phase} den aufgenommenen Strom je Phase und $6,63 = 125/6\pi$.

Die Streuspannung des Ständers je Phase beträgt mithin:

$$U_{s_{\text{ständer}}} = U_{\text{versuchphase}} - U_{\text{bohrphase}},$$

woraus sich errechnen läßt:

$$\text{die prozentuale Ständerstreuspannung } u_{s_{\text{ständer}}} \% = \frac{U_{s_{\text{ständer}}}}{U_{\text{nennphase}}} \cdot 100.$$

Der Streublindwiderstand beträgt:

$$X_{s_{\text{ständer}}} = \frac{U_{s_{\text{ständer}}}}{I_{\text{nenn}}} \text{ in Ohm.}$$

Die prozentuale Ständerstreuspannung liegt etwa in den Grenzen 7 bis 20%.

Der Leerlaufversuch. Der Leerlaufversuch, der im Anschluß an die Widerstandsmessung der Anker- und der Erregerwicklung vorgenommen wird, kann im Generator- oder im Motorverfahren durchgeführt werden. Man bevorzugt das Generatorverfahren. In diesem Falle wird die Synchronmaschine mit einer geeichten Gleichstrommaschine gekuppelt, deren Leistung zur Deckung der Verluste ausreichen muß.

Beide Maschinen werden hochgefahren und die Leerlaufablesungen bei steigenden Werten des Erregerstromes durchgeführt. Man vermeidet dabei jegliches Zurückregeln des Erregerstromes, um eindeutig auf einem Kurvenast liegende Punkte zu erhalten. Den Erregerstrom entnimmt man am besten einem getrennten Erregernetz. Beobachtet werden: Spannung, Erregerstrom und Erregerspannung der Synchronmaschine, Drehzahl, Spannung und Stromaufnahme des Antriebsmotors. Die Ergebnisse werden in zwei Kurvenblättern dargestellt. In dem einen wird die Spannung über dem Erregerstrom, im zweiten die Eisen- und Reibungsverluste über der Spannung aufgetragen.

Das Motorverfahren ($\cos \varphi_0 = 1,0!$) wendet man meistens nur bei kleineren Maschinen an. Die Messung der Leistung ist nicht so genau wie beim Generatorverfahren; insbesondere kann die Trennung der Reibungsverluste nur graphisch nach dem auf S. 15 beschriebenen Verfahren erfolgen. Man erspart aber das Ankuppeln der Hilfsmaschine.

In vielen Fällen besitzt die Synchronmaschine eine angebaute Erregermaschine, die entweder selbsterregt oder durch eine Hilfserregermaschine fremderregt arbeitet. Die Regelung des Feldstromes der Synchronmaschine, welche früher oft durch einen großen, in Reihe geschalteten Magnetregler erfolgte, geschieht durch einen feinstufigen Regelwiderstand im Feldkreis einer der Erregermaschinen. Die Untersuchung der richtigen Stufung dieses Widerstandes gehört zur Prüfung der Maschine. Die Abstufung gilt als gut, wenn erstens 80% der Nennspannung im Leerlauf, zweitens 100% der Nennspannung im Leerlauf bei etwa $\frac{1}{3}$ Verdrehung des Reglers und drittens der volle Erregerstrom bei $\frac{2}{3}$ Verdrehung eingestellt werden können.

Durch schnelles Zurückdrehen des Reglers in die Endlage überzeugt man sich, ob die Erregermaschine nicht zum Entregen oder Ummagnetisieren neigt. Diese Gefahr besteht bei aus der Neutralstellung verstellten Bürsten.

Die Spannungskurve. Durch eine Reihe geeigneter Maßnahmen bei der Auslegung der Wicklung der Synchronmaschine und der Formgebung, der Schrägstellung oder der Staffelung der Polschuhe wird angestrebt, der Spannungskurve eine möglichst sinusförmige Gestalt zu verleihen. Auch die durchweg bevorzugte Sternschaltung dient diesem Zwecke, da durch sie die in der Phasenspannung enthaltene dritte Harmonische in der verketteten Spannung wegfällt. Bei Dreieckschaltung der Wicklung, die für Motoren mit Sterndreieckanlauf Verwendung findet, vermeidet man die dritte Harmonische durch Sehnung der Wicklung um 60° .

Die Nachprüfung der wirklichen Spannungskurve erfolgt durch oszillographische Aufnahme der Leerlaufspannung. Gute Spannungs-

wandler verursachen keine Verzerrung und können daher bei Hochspannungsmaschinen unbedenklich zur Spannungsherabsetzung verwendet werden. Man nimmt die Phasen- und die Klemmen-

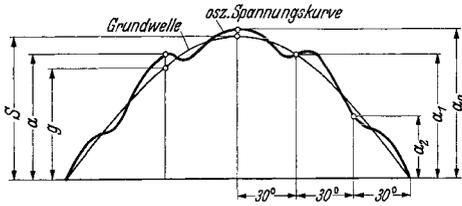


Abb. 92. Untersuchung der oszillographierten Kurve der verketteten Spannung auf praktische Sinusform.

spannung auf. Nach den REM gilt die Spannungskurve als praktisch sinusförmig, wenn die größte Abweichung des Augenblickswertes a vom gleichphasigen Wert g der Grundwelle nicht mehr als 5% des Scheitelwertes S der Grundwelle beträgt. Untersucht

wird nur die Spannung an den Klemmen. Der Scheitelwert wird, unter Berücksichtigung der Darstellung in Abb. 92, berechnet zu:

$$S = \frac{a_0 + \sqrt{3} \cdot a_1 + a_2}{3}$$

sofern die Viertelperioden symmetrisch zueinander sind. Dies trifft in den allermeisten Fällen zu.

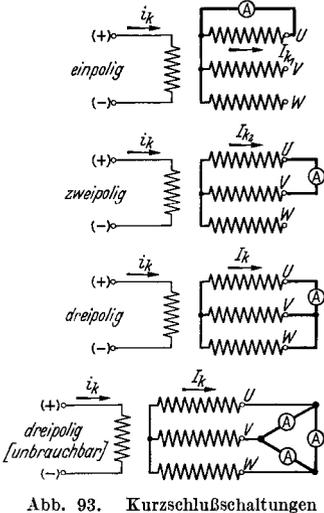


Abb. 93. Kurzschlußschaltungen der Synchronmaschine. (Letzte Schaltung unbrauchbar, da Anzeige der drei Strommesser vom Widerstand der Verbindungen abhängt.)

Wenn die Güte der Spannungskurve nicht ausreicht, kann an der fertigen Maschine durch Änderung der Polschuhform oder Staffelung oder Schrägstellung der Polschuhe unter Umständen eine weitgehende Verbesserung erzielt werden. Maßnahmen an der Wicklung sind nur in den seltensten Fällen möglich. Die Erhöhung des Erregerstromes, welche durchweg als Folge dieser Änderungen auftritt, ist vor deren Inangriffnahme zu überschlagen.

Der Kurzschlußversuch. Dieser Versuch dient der Aufnahme der Kurzschlußkennlinie $I_k = f(i)$ und der Bestimmung der lastabhängigen Zusatzverluste. Üblicherweise wird bei Drehstrommaschinen nur der dreipolige Kurzschlußversuch durchgeführt, der selten durch den zwei- und den einpoligen Versuch ergänzt wird. In Abb. 93 sind die entsprechenden Schaltungen dargestellt. Die Kurzschlußbügel werden beim dreipoligen Kurzschluß als Stern geschaltet. Dreieckschaltung darf nicht angewendet werden, da infolge der stets vorhandenen Ungleichmäßigkeiten des Widerstandes die Stromverteilung stark unsymmetrisch werden könnte. Bei dem einphasigen Versuch in zwei- oder einpoliger Schaltung werden bei fehlender Dämpferwicklung in den nicht kurzgeschlossenen Wicklungsteilen vom inversen Feld Spannungen induziert, die infolge ihrer Höhe eine Gefährdung für den Bedienenden mit sich

bringen können. Bei diesen Prüfungen muß die Maschine daher als unter voller Spannung stehend betrachtet werden. Der Erregerstrom wird bei den einphasigen Versuchen nur von einem Drehspulgerät richtig gemessen, da ein normales Wechselstromgerät auch den im Erregerkreis induzierten Wechselstromanteil doppelter Frequenz mitmessen würde. Bei Maschinen in Dreieckschaltung wird als Kurzschlußstrom der Linienstrom gemessen; der Phasenstrom ergibt sich dabei als der $1/\sqrt{3}$ Teil.

Die Kurzschlußkennlinie kann auch bei mehr oder weniger stark abweichender Drehzahl ermittelt werden, da der Kurzschlußstrom I_k praktisch unabhängig von der Geschwindigkeit ist. Dies kommt daher, daß sowohl die induzierte Spannung wie auch der induktive Widerstand der Wicklungen linear mit der Frequenz ansteigen. Nur bei ganz kleiner Drehzahl würde man zu kleine I_k -Werte erhalten, da dann der Ohmsche Wicklungswiderstand immer stärker in Erscheinung tritt.

Die Kurzschlußverluste setzen sich zusammen aus den Reibungsverlusten, den reinen Kupferverlusten und den *Zusatzverlusten*. Die Erregerverluste werden von außen gedeckt, brauchen also nicht berücksichtigt zu werden. Die normalen Eisenverluste werden beim Kurzschlußversuch vernachlässigt. Die tatsächlich auftretenden Eisenverluste gehören zu den Zusatzverlusten, die sich außerdem aus den Verlusten durch Wirbelströme in der Wicklung und in benachbarten metallischen Bauteilen der Maschine sowie aus Verlusten in den Dämpferstäben zusammensetzen. Da die Zusatzverluste sich mit der Frequenz ändern, muß bei ihrer Messung auf genaue Nenndrehzahl geachtet werden. Während des Versuchs soll die Wicklungstemperatur durch ein Thermometer, besser jedoch durch vorherige und anschließende Widerstandsmessung gemessen werden. Die Zusatzverluste liegen in der Größenordnung von 10 bis 100% der Kupferverluste, und diese können sich infolge der veränderlichen Temperatur bei gleichen Strömen um rund 25 bis 30% ändern, also praktisch um den gleichen Betrag, den die zu messenden Verluste ausmachen. Wenn man keine Temperaturablesungen vorgenommen hat, legt man den Mittelwert zwischen dem kalten und dem betriebsmäßigen Widerstand zugrunde.

Die gesamten Kurzschlußverluste werden von einer angekuppelten Gleichstrommaschine, deren Verluste bekannt sind, gedeckt. Man nimmt mehrere Punkte bis zum Nennstrom oder etwas darüber hinaus auf. Der Zusammenhang zwischen Kurzschlußstrom und Erregerstrom ist in diesem Bereich linear, so daß eigentlich die Aufnahme eines einzigen Punktes genügen würde. Durch remanenten Magnetismus kann sich die Kurzschlußkennlinie um einen kleinen Betrag nach links oder rechts verschieben. Man legt daher durch die Meßpunkte eine Gerade, die also nicht unbedingt durch den Nullpunkt zu gehen braucht.

Bei ganz großen Maschinen oder solchen, wo keine Antriebsmaschine angekuppelt werden kann und die eigene Erregermaschine nicht zum Antrieb ausreicht, wird der Kurzschlußversuch im *Auslauf* durchgeführt. Man fährt die Synchronmaschine mit steigender Frequenz über ihre Nenndrehzahl hoch, schaltet sie vom Netz ab und auf einen Kurzschluß über. Wenn die Erregung vorher eingeschaltet war, muß

sie zur Vermeidung des Stoßkurzschlusses erst ausgeschaltet und dann wieder neu eingestellt werden. Man wiederholt diese Ausläufe für verschiedene Kurzschlußströme und entnimmt der Auswertung die Kurzschlußkennlinie und die Gesamtkurzschlußverluste. Die reinen Reibungsverluste bestimmt man durch einen weiteren, anschließenden Auslauf bei Erregung Null. Die Verluste bei Durchgang durch die Synchrondrehzahl werden bestimmt zu:

$$\text{Verluste in kW} = \frac{(\text{Schwungmoment in kgm}^2) \cdot (\text{Nenn Drehzahl})^2}{(\text{Gedachte Auslaufzeit}) \cdot 366000}$$

Nähere Angaben hierüber finden sich auf S. 37. Die Ergebnisse solcher Auslaufverlustmessungen streuen etwas. Man tut daher gut, die ermittelten Zusatzverluste alle quadratisch auf Nennstrom umzurechnen,

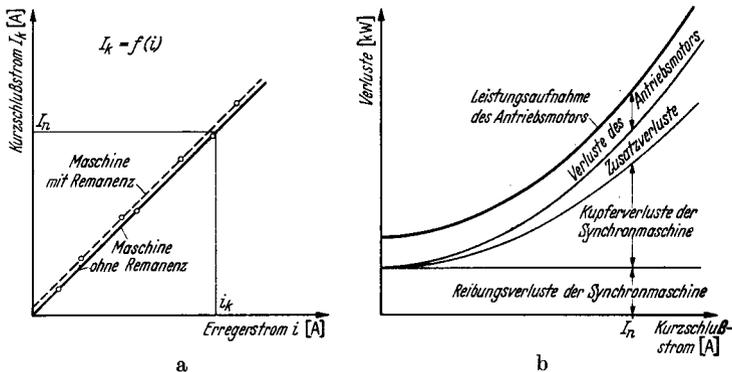


Abb. 94. Kurzschlußstromkennlinie (a) und Aufteilung der Gesamtkurzschlußverluste (b) der Synchronmaschine.

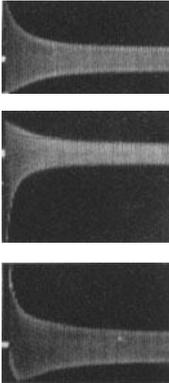
den Mittelwert zu bilden und diesen dann wieder rückwärts auf die Teilströme zu beziehen.

Die Zusatzverluste können auch bei Leerlauf im über- oder untererregten Zustand nach den Angaben der S. 42 als Teil der Gesamtverluste bestimmt werden.

Die Kurzschlußkennlinie wird über dem Erregerstrom, die Verluste über dem Ankerstrom aufgetragen (Abb. 94).

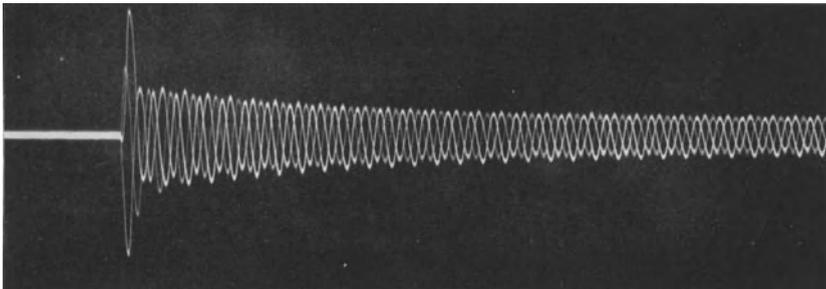
Der Stoßkurzschlußversuch. Dieser Versuch dient der Bestimmung des bei plötzlichem Klemmenkurzschluß auftretenden Stromes und dem Nachweis der mechanischen Festigkeit der Maschine, insbesondere der Wicklung gegen die dabei auftretenden Kräfte. Das Gehäuse selbst wird durch das hohe, pulsierende Stoßkurzschlußdrehmoment beansprucht. Der Versuch wird folgendermaßen durchgeführt. Die Synchronmaschine wird durch eine Gleichstrommaschine oder aber asynchron etwas über Nenn Drehzahl hochgefahren. Dann wird die Verbindung mit dem Netz getrennt und die Maschine erregt. Bei Durchgang durch die Nenn Drehzahl wird ein Schalter betätigt, der die Klemmen satt kurzschließt. In diesem Augenblick beginnt der Stoßkurzschluß, der nach einigen Sekunden in den Dauerkurzschluß übergeht. Die Dreh-

zahl nimmt, da keinerlei Energie mehr vom Netz zufließen kann, während des Versuches ab, und zwar während des eigentlichen Stoßkurzschlusses nach einer periodischen Funktion. Dies rührt von dem pulsierenden, aber bald abklingenden Stoßmoment her, welches abwechselnd verzögernd und dann wieder beschleunigend auf die träge Schwungmasse des Läufers einwirkt.



a

Die Ströme der drei Ankerphasen werden oszillographisch aufgenommen. Man erkennt aus den in Abb. 95 wiedergegebenen Oszillogrammen, daß dem eigentlichen Stoßkurzschluß-Wechselstrom in den verschiedenen Phasen ein verschieden hoher Stoßkurzschluß-Gleichstrom überlagert ist, der in jener Phase den höchsten Wert hat, deren Achse im Augenblick des Kurzschlusses der Erregerachse am nächsten lag. Die Summe der überlagerten Gleichströme ist in jedem Zeitpunkt gleich Null. (In Wirklichkeit ist dem Gleichstrom selbst ein Wechselstrom doppelter Frequenz überlagert, der aber sehr schnell abklingt und stets vernachlässigt werden kann.) Maschinen mit Dämpferwicklungen haben im allerersten Augenblick einen



b

Abb. 95. Oszillogramme von Stoßkurzschlüssen. (Einzelaufnahmen (a) und Gesamtaufnahme (b) der drei Phasen.)

höheren Stoßkurzschlußstrom als gleiche Maschinen ohne Dämpfer. Dieser flüchtige Anteil geht bereits nach wenigen Perioden in den länger dauernden Stoßkurzschlußstrom über und dieser nach längerer Zeit in den Dauerkurzschlußstrom. Zum Unterschied soll der Strom in dem allerersten Zeitpunkt der flüchtige Stoßkurzschlußstrom, der anschließende der Stoßkurzschlußstrom genannt werden.

Nach den REM, in denen der flüchtige Stoßkurzschlußstrom nicht berücksichtigt wird, unterscheidet man entsprechend der Darstellung in Abb. 96 den Effektivwert des Stoßkurzschluß-Wechselstroms, den Absolutwert des Stoßkurzschluß-Gleichstroms, den Absolutwert des Stoßkurzschlußstroms und den Effektivwert des Dauerkurzschlußstroms. Der Stoßkurzschlußstrom kann etwa den 1,8fachen Scheitelwert des Stoßkurzschluß-Wechselstroms annehmen. Weiterhin bezeichnet man als

Stoßkurzschlußverhältnis das Verhältnis des Stoßkurzschluß-Wechselstroms zum Nennstrom und den umgekehrten Wert als relative Stoßkurzschlußstreuspannung.

Die Höhe des Stoßkurzschluß-Drehmomentes kann zwar durch Auswertung der Auslaufkurve gefunden werden, doch ist deren Aufnahme nur mit einem gewissen Aufwand durchzuführen. Man verzichtet daher auf die Messung und errechnet dieses Stoßmoment zu:

$$Md_{\text{stoß}} = \pm Md_{\text{nenn}} \cdot \frac{I_{\text{stoß}}}{I_{\text{nenn}} \cdot \cos \varphi},$$

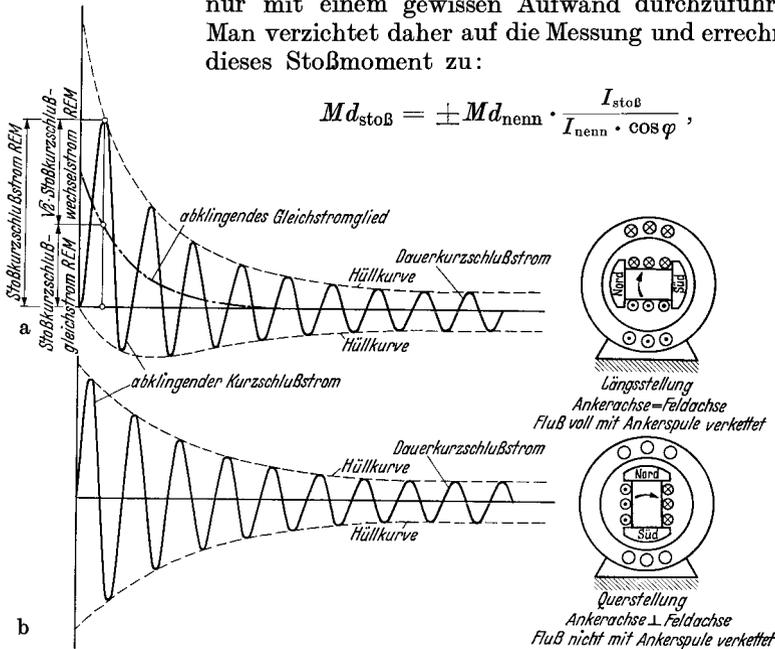


Abb. 96. Der Stoßkurzschluß bei ungünstiger (a) und bei günstiger Lage (b) der betrachteten Phase. Im ersten Fall volles, im zweiten kein Gleichstromglied. (Auswertung nach R.E.M.)

worin bedeutet: Md_{nenn} = Nenndrehmoment,
 I_{nenn} = Nennstrom,
 $\cos \varphi$ = Nennleistungsfaktor,
 $I_{\text{stoß}}$ = Stoßkurzschluß- Wechselstrom (Effektivwert).

Das (+)- und das (-)-Zeichen erinnern an den pulsierenden Charakter dieses Momentes. Der Schwingungsvorgang kommt zustande durch den Umsatz der Feldenergie in lebendige Energie der bewegten Schwungmassen.

Der Hochlaufversuch. An allen selbstanlaufenden Synchronmaschinen, also vor allem an den Synchronmotoren für industrielle Antriebe aller Art, wird der Hochlaufversuch durchgeführt, wobei die oszillographische Aufnahme des Stromes, der Spannung und der Drehzahl in derselben Weise wie beim Asynchronmotor stattfindet. Es mag daher auf S. 27 und S. 88 Bezug genommen werden. Synchronmaschinen laufen entweder mit voller oder durch Anlaßtransformator bzw. vor-

geschaltete Drosselspulen verringerter Netzspannung an. Außerdem findet der Anlauf in Stern-Dreieck-Schaltung sowie der sog. Teilwicklungsanlauf Verwendung. Die Dämpferkäfige übernehmen während des Hochlaufes die Rolle, die der Kurzschlußläufer bei der Asynchronmaschine spielt. Sie werden oft als Einstabkäfig, gelegentlich aber auch als Doppelkäfig ausgebildet. Die Erregerwicklung hat im allgemeinen nur einen Einfluß zweiter Ordnung. Sie darf, um hohe Spannungen zu vermeiden, nie offenbleiben, sondern wird zweckmäßigerweise durch einen Widerstand von etwa 8- bis 10fachem Eigenwiderstand überbrückt. Häufig wird die Erregermaschine in diesen Stromkreis mit einbezogen.

Im ersten Augenblick des Einschaltens der Spannung auf die ruhende Maschine liegen die gleichen Verhältnisse wie beim Stoßkurzschluß vor. Infolge des verhältnismäßig hohen Widerstandes des Anlaufkäfigs klingt die allererste Stromspitze, die der flüchtigen Stoßreaktanz entspricht, schnell ab. Im übrigen ist der Stromverlauf ähnlich dem des Asynchronmotors, nur macht sich der Einfluß der Pollücken und der einachsigen Erregerwicklung im Stromoszillogramm durch typische Zickzackschwankungen bemerkbar (Abb. 14 b). Der Drehmomentverlauf unterscheidet sich meistens etwas von dem des Asynchronmotors, und zwar ist der Kippschlupf im allgemeinen wesentlich größer. Das Kippmoment wird also früher erreicht. Bei rund 3 bis 5% Schlupf stellt sich die Beharrungsdrehzahl ein, wobei der Schlupf natürlich dem Belastungsdrehmoment proportional ist. Im allgemeinen wird jetzt auf normale Spannung oder normale Schaltung umgeschaltet. Die Drehzahl steigt noch etwas an und der Strom klingt nach dem Überschaltstoß auf einen etwas kleineren Wert ab. Jetzt wird die Gleichstromerregung eingeschaltet und der im Feldkreis liegende Anfahrschutzwiderstand kurzgeschlossen. Die Maschine fällt von selbst in Tritt. Man schaltet die Erregung in dem Augenblick ein, in welchem der im Erregerkreis induzierte schlupffrequente Wechselstrom gerade dieselbe Richtung wie der zuzuschaltende Erregerstrom hat. Man beobachtet das Drehspulgerät im Erregerkreis. Sobald der Zeiger nach rechts geht, wird erregt. Das nunmehr einsetzende synchronisierende Moment beschleunigt zusammen mit dem noch wirksamen asynchronen Moment die Schwungmassen auf volle Drehzahl. Der benötigte Erregerstrom hängt ab von der Höhe der Schwungmassen, der Größe des Gegendrehmomentes durch die Last und von dem Betrage des Schlupfes bei Nennmoment. In praktischen Fällen reicht die Nennerregung immer zum Synchronisieren aus, sofern der Nennschlupf den Wert von 5% nicht übersteigt.

Durch Veränderungen des Anlaufwiderstandes im Erregerkreis kann die Höhe des Anlaufdrehmomentes in mäßigen Grenzen beeinflußt werden. Wenn er vergrößert wird, ist die Erhöhung der an der Erregerwicklung auftretenden Spannung besonders zu beachten, da sie eine ernstliche Gefährdung der Isolation bedeuten kann.

Die Belastungsaufnahmen. Die Belastung der Synchronmaschine als Motor oder Generator wird, wenn die Leistungsfähigkeit der Prüffeldanlagen dies erlaubt, im Nennbetrieb, also mit Nennspannung, Nennstrom, Nennfrequenz und Nennleistungsfaktor vorgenommen. Zu diesem

Zwecke wird die Maschine mit einer entsprechend großen Gleichstrommaschine gekuppelt, von dieser aus hochgefahren, synchronisiert und dann belastet. Außer dem Nennlastpunkt werden weitere Lastpunkte gefahren, die die charakteristischen Belastungskennlinien der Synchronmaschine ergeben. Anschließend wird der Dauerlauf zur Bestimmung der Erwärmung durchgeführt.

Das Synchronisieren. Unter Synchronisieren versteht man das Umschalten der laufenden und auf Netzspannung erregten Synchronmaschine auf das Netz unter Vermeidung eines jeden merklichen Stromstoßes. Zu diesem Zwecke müssen drei Bedingungen erfüllt sein. Die Spannung der Synchronmaschine muß gleich der des Netzes sein, die Frequenz gleich der Netzfrequenz und die Phasenlage der Spannungen

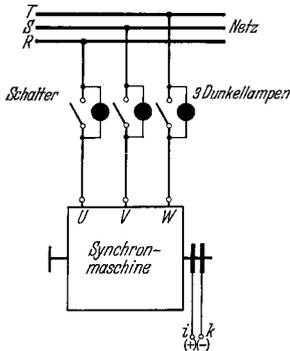


Abb. 97. Dunkelschaltung zum Synchronisieren. (Bei vollkommener Synchronisation sind alle 3 Lampen erloschen. Wenn 1 Lampe erloscht und die beiden andern leuchten, liegt falsche Phasenfolge auf Netz- oder Maschinenseite vor.)

gleich der der Netzspannungen. Letztere Bedingung schließt gleichzeitig die gleiche zeitliche Phasenfolge der Spannungen in sich ein. Der Beobachtung dieser Bedingungen dienen gelegentlich besonders entwickelte Synchronisiergeräte, die allerdings im Prüffeld fast niemals Anwendung finden. Hier benutzt man die ebenso einfach wie sicher arbeitenden Phasenlampen in Hell- oder Dunkelschaltung, an deren Stelle genau so gut Spannungsmesser treten können.

Die Dunkelschaltung. In Abb. 97 ist die am meisten verwendete Dunkelschaltung dargestellt, und zwar für den Fall einer Niederspannungsmaschine. Bei Hochspannungsmaschinen werden die Lampen über einen Spannungswandler gespeist. Parallel zu den drei Trennstellen des Schalters liegt je eine Lampe, die für die doppelte Phasenspannung

bemessen sein muß. Wenn die Nennspannung der Lampe zu klein ist, benutzt man zwei oder noch mehr in Reihe geschaltete Lampen. Die Wirkungsweise der Anordnung ist einfach. Sobald Spannung, Frequenz und Phasenlage der Synchronmaschine und des Netzes übereinstimmen, ist zu jedem Zeitpunkt die Potentialdifferenz an den Trennstellen des noch offenen Schalters gleich Null. Er kann eingelegt werden, ohne daß irgendein Strom zum Fließen kommt. Die Bedingung der vollkommenen Synchronisation ist also erfüllt. Solange noch keine Frequenzgleichheit besteht, leuchten die Lampen gemeinsam im Takte der Frequenzdifferenz auf.

Die Hellschaltung. Diese Schaltung, die in Abb. 98 dargestellt ist, hat vor der Dunkelschaltung den Vorzug, daß man erkennen kann, ob die zuzuschaltende Synchronmaschine zu schnell oder zu langsam läuft. Eine Lampe liegt zwischen zwei gleichen Phasen, die beiden andern dagegen über Kreuz zwischen zwei verschiedenen Phasen von Netz und Generator. Bei Synchronismus muß also die erste Lampe erlöschen, während die beiden andern dagegen ziemlich hell aufleuchten. Die

„Dunkellampe“ muß besonders gekennzeichnet sein, da nur sie, nicht aber eine der beiden andern Lampen dunkel werden darf. Man ordnet die Lampen am besten in Kreisform an, wobei man vorteilhafterweise jeder einzelnen eine gleichartig gespeiste weitere Lampe gegenübersetzt, also insgesamt sechs Lampen verwendet. Solange wohl die Spannung, jedoch noch nicht die Frequenz genau übereinstimmt, beobachtet man, daß alle Lampen nacheinander dunkel werden, aufhellen und wieder trübe werden. Es entsteht ein umlaufender Lichteindruck. Sobald dieser zum Stillstand kommt, ist die Frequenzgleichheit erreicht; sobald die Dunkellampe erlischt, ist die Synchronisation vollkommen. Bei dem in Abb. 98 gezeichneten Anschluß entspricht einem links umlaufenden Lichteindruck ein zu langsam laufender Generator. Seine Drehzahl muß also erhöht werden. Läuft das Licht rechts um, so ist die Generatordrehzahl zu hoch; sie ist herabzuregeln.

Die Dunkelschaltung hat den Vorzug geringerer Fehlermöglichkeiten und eignet sich für Prüffeldzwecke besonders gut. Die Hellschaltung empfiehlt sich für feste Anlagen und wird gern für stationäre Prüffeldumformer benutzt.

Kontrolle einer vorliegenden Hell- oder Dunkelschaltung. Wenn eine vorliegende Synchronisierschaltung nicht mit Sicherheit bekannt ist oder möglicherweise Fehler in ihr enthalten sein können, so wird erst ein Vorversuch gemacht. Dies empfiehlt sich immer bei Hochspannungsanlagen, wo durch die Spannungswandler leicht Fehlschaltungen gemacht werden können. Man klemmt den Generator ab und isoliert die freien Zuleitungsenden zum Schalter. Dann legt man den Netzschalter ein. Für die Synchronisierereinrichtung schafft man also hierdurch den Betriebszustand, der einer vollkommenen Synchronisation entspricht. Sind alle Lampen dunkel, so liegt Dunkelschaltung vor, brennen zwei hell und bleibt die dritte dunkel, so hat man Hellschaltung. Nunmehr wird der Netzschalter getrennt und die Maschine wieder angeklemmt. Man fährt hoch, erregt und beobachtet aufmerksam das Verhalten der Lampen. Hatte man vorher Dunkelschaltung festgestellt, so müssen sie alle drei gleichzeitig an- und ausgehen und schließlich gemeinsam erlöschen. Hatte man dagegen Hellschaltung beobachtet, so muß kreisendes Licht entstehen und schließlich die gleiche Lampe wie vorher erlöschen, die beiden andern aber gleich hell leuchten.

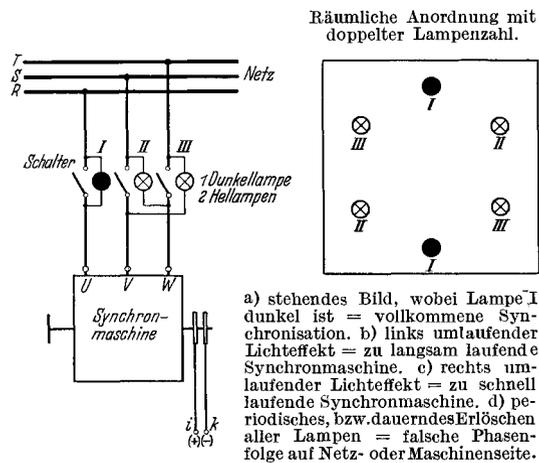


Abb. 98. Hellschaltung zum Synchronisieren.

Wenn man aber im Vorversuch Dunkelschaltung hatte und bei Lauf die Lampen kreisendes Licht zeigen, so ist die Drehrichtung des Generators falsch oder aber die Phasenfolge von Netz und Generator verschieden voneinander. Das gleiche gilt, wenn sich statt der erwarteten Hellschaltung Dunkelschaltung ergibt. In beiden Fällen ist entweder die Generatordrehrichtung umzukehren oder, falls diese mechanisch richtig ist, eine Vertauschung zweier Zuleitungen des Netzes oder der Maschine vorzunehmen. Da hierbei eine andere Lampe in der Hellschaltung zur „Dunkellampe“ werden kann, wird der Vorversuch aus Gründen der Sicherheit wiederholt. Fehlschaltungen beim Synchronisieren können Drehmomente vom Vierfachen des Stoßmomentes zur Folge haben und die Maschine ernstlich gefährden.

Bei allen Schaltungen gelangt über die Lampen und die gegebenenfalls verwendeten Spannungswandler auch bei noch offenem Netzschalter die volle Netzspannung an die Maschinenklemmen. Diese dürfen also auch bei Stillstand nur dann berührt werden, wenn die Trennmesser vor dem Schalter gezogen oder die Lampen herausgedreht worden sind.

Bei unruhigen Netz- oder Antriebsverhältnissen ist gelegentlich eine vollkommene Synchronisierung nur sehr schwer zu erreichen. In diesen Fällen beobachtet man einige Schwebungen und legt den Schalter, kurz bevor der richtige Zeitpunkt gekommen ist, ein. Es ist dabei immer am besten, den Generator etwas schneller laufen zu lassen, weil dann seine Schwungmassen nicht auf die Synchrondrehzahl beschleunigt zu werden brauchen, sondern sich von der ein wenig höheren Geschwindigkeit auf diese abbremsten. Dem Netz wird dann also keine Leistung entzogen, sondern solche rückgeliefert.

Die Belastungseinstellung. Die Synchronmaschine kann als Erzeuger und als Verbraucher von Wirkleistung und als Erzeuger und als Verbraucher von Blindleistung arbeiten. Sie setzt nur Wirkleistung um, wenn sie bei $\cos \varphi = 1,0$ läuft, und nur Blindleistung, wenn der $\cos \varphi = 0,0$ ist. Im allgemeinen arbeiten Motoren mit $\cos \varphi = 1,0$ und Generatoren mit einem $\cos \varphi = 0,7$ bis $0,8$. Bei Lauf der Maschine an einem hinreichend großen Netz können diese vier Betriebszustände und die Zwischenzustände beliebig eingestellt werden.

Langsamer Regeln der Antriebsmaschine ergibt: Wirkstromaufnahme aus dem Netz, also Motorbetrieb. Die Antriebsmaschine wird zur Belastungsmaschine. Vom Wechselstromnetz aus betrachtet, wirkt die Synchronmaschine wie ein Ohmscher Widerstand.

Schneller Regeln der Antriebsmaschine ergibt: Wirkstromabgabe an das Netz. Die Antriebsmaschine wird belastet. Vom Netz gesehen, wirkt die zum Generator gewordene Synchronmaschine wie ein negativer Widerstand.

Verringerung des Erregerstromes der Synchronmaschine, also Untererregung, ergibt: Blindstromaufnahme aus dem Netz. Die Antriebsmaschine wird nicht beeinflusst. Vom Wechselstromnetz aus betrachtet, wirkt die Synchronmaschine wie eine Drosselpule, welche Magnetisierungsleistung verbraucht.

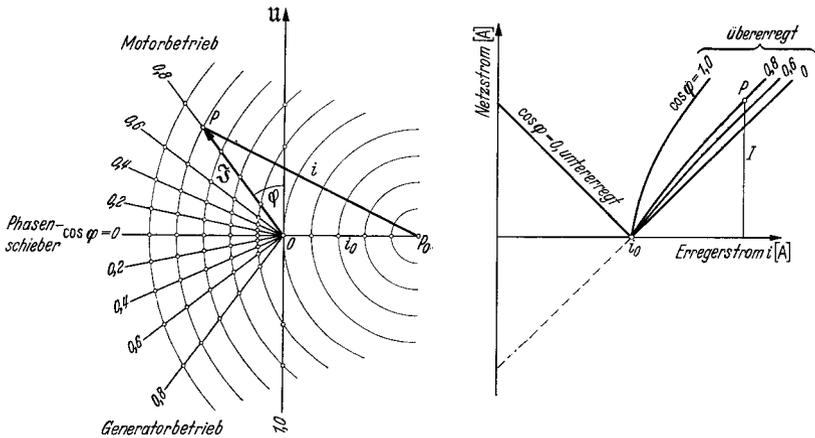
Erhöhung des Erregerstromes der Synchronmaschine, also Übererregung, bewirkt: Blindstromabgabe an das Netz. Die Antriebsmaschine wird nicht beeinflusst. Vom Wechselstromnetz aus gesehen, wirkt die Synchronmaschine wie ein Kondensator.

Üblicherweise laufen die Synchronmaschinen immer mit einem Erregerstrom, der größer als der Leerläufererregungsstrom ist. Sie gelten als übererregt, wenn Blindstrom an das Netz geliefert wird. Dies ist bei belasteten Generatoren die Regel. Nur beim Arbeiten im Leerlauf auf eine lange Leitung mit kapazitivem Charakter oder bei Phasenschieberbetrieb zur Herabsetzung der Netzspannung wird die Erregung geschwächt und mit Untererregung gefahren. Ein nachteiliger Leistungsfaktor kommt also nur sehr selten vor.

Praktisch geschieht das Einstellen auf Voll- oder Teillast folgendermaßen: Die mit einer Prüffeldmaschine gleicher Leistung gekuppelte Synchronmaschine wird hochgefahren, erregt, synchronisiert und aufs Netz geschaltet. Im Falle der *Prüfung eines Synchronmotors* wird nunmehr der Erregerstrom der Antriebsmaschine erhöht. Die Folge ist, daß sie generatorischen Strom an ihr Netz abgibt, langsamer zu laufen versucht und die Synchronmaschine abbremst. Diese wird dadurch zum Motor. Man erhöht die Erregung der Gleichstrommaschine, bis die Leistungsmesser des Synchronmotors die gewünschte Leistungsaufnahme anzeigen. Nunmehr wird der $\cos\varphi$ eingestellt, indem man den Erregerstrom des Synchronmotors erhöht. Eine Erhöhung über den Leerlaufwert um etwa 30 bis 50% führt auf $\cos\varphi = 1,0$, der leicht am Minimum des Netzstromes und am gleichen Ausschlag beider Leistungsmesser erkannt werden kann. Weitere Steigerung der Erregung bewirkt den übererregten Zustand, in welchem also Blindstrom an das Netz abgegeben wird. Dies wird bei Synchronmotoren allerdings nur dann gewünscht, wenn benachbarte Verbraucher von Blindstrom kompensiert werden sollen. Häufig laufen Synchronmotoren mit $\cos\varphi = 1,0$. Die Übererregung hat, wie unten weiter ausgeführt wird, eine wesentliche Erhöhung des synchronen Kippmomentes zur Folge und wird daher gelegentlich aus diesem Grunde gefordert.

Bei der *Prüfung eines Synchrongenerators* wird nach dem Synchronisieren der Erregerstrom der Antriebsmaschine geschwächt. Sie versucht also schneller zu laufen und treibt dadurch die Synchronmaschine verstärkt an. Diese wird zum Generator. Die Leistungsmesser zeigen den Wert der abgegebenen Wirkleistung an, die durch weitere Feldschwächung des Antriebsmotors auf den Wert der gewünschten Wirklast gleich Scheinleistung mal Leistungsfaktor eingeregelt wird. Jetzt wird der Leistungsfaktor selbst eingestellt. Wiederum ist der Erregerstrom der Synchronmaschine zu erhöhen. $\cos\varphi = 1,0$ wird bei geringerer Erhöhung des Erregerstromes als beim Motor erreicht, weil dessen Luftspalt im allgemeinen größer gehalten wird. Meistens ist aber der Leistungsfaktor des Generators gleich 0,8 oder 0,7. Diese Werte werden mit Erregerströmen vom rund doppelten Betrag des Leerläufererregungsstromes erreicht. Man erkennt den gewünschten Leistungsfaktor am Verhältnis der Leistungsmesserausschläge oder einfacher am Wert des

zugehörigen Netzstromes, den man am besten vorher aus Scheinleistung und Netzspannung errechnet hat. An Synchronmaschinen, für die keine Antriebsmaschine zur Verfügung gestellt werden kann, können nur Blindbelastungen durchgeführt werden. Unterschiede zwischen Motor und Generator bestehen nicht. Die Maschine entnimmt dem Netz die geringe Wirkleistung zur Deckung ihrer Verluste, läuft also als leer laufender Motor und gibt bei Übererregung Blindleistung ab, bei Untererregung nimmt sie solche auf. Bei der leer laufenden Maschine, die hart auf der Grenze zwischen Motor und Generatorbetrieb arbeitet, erkennt man am besten, daß den leider üblichen Bezeichnungen kapazitiv beim übererregten Motor und induktiv beim übererregten Generator nur eine irreführende Vorstellung zugrunde liegt. Durch geringe Antriebs- oder Bremsmomente kann die Maschine generatorisch oder motorisch werden, ihre Blindstromabgabe wird nicht beeinflusst.

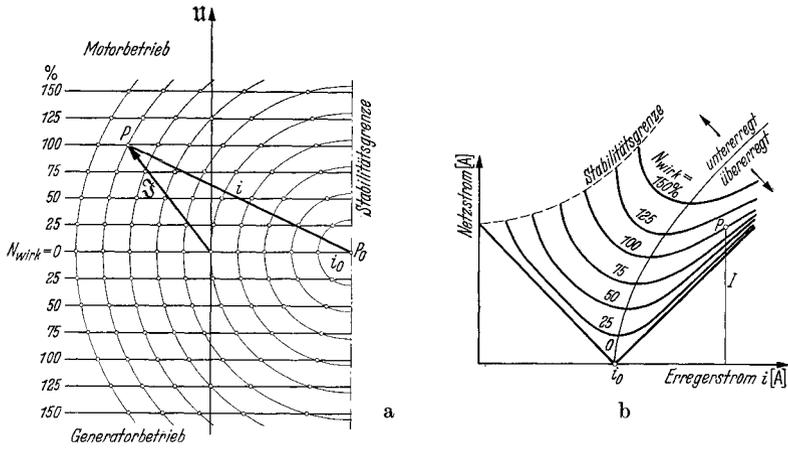


a) Zusammengehörige Werte von \mathfrak{I} und i liegen auf Strahlen durch den Nullpunkt.
 b) Regelkennlinien $I = f(i)$ für $\cos \varphi = \text{konst.}$ (Motorkurven \approx Generatorkurven.)
 Abb. 99. Die Regelkennlinien $I = f(i)$ für $\cos \varphi = \text{konst.}$ im Vektor- (a) und im Liniendiagramm (b) bei der idealen, ungesättigten, verlustlosen Volltrommelmaschine.

Die Belastungskennlinien. Für das praktische Verhalten der Synchronmaschine sind die Kennlinien bei konstanter Klemmenspannung die wichtigsten. Man kann solche aufnehmen bei konstantem Leistungsfaktor, bei konstanter Wirkleistung und bei konstantem Erregerstrom. Wenn man eine dieser Scharen gemessen hat, kann man die andern leicht daraus ermitteln. Bei Generatoren interessieren vor allem die Kennlinien für konstanten $\cos \varphi$, bei Motoren die für konstante Wirkleistung oder, wenn die Erregung nicht nachgeregelt wird, jene für konstanten Erregerstrom. Immer nimmt man die $\cos \varphi = 0$ -Linie auf, die die Blindstromaufnahme bzw. -abgabe in Abhängigkeit der Erregung wiedergibt.

Die Regelkennlinien: $I = f(i)$. $U = \text{konst.}$ $\cos \varphi = 1,0, 0,8, \dots, 0,0 = \text{konst.}$ Bei der Aufnahme dieser Kennlinien, die für eine Reihe von jeweils konstant zu haltenden Werten des Leistungsfaktors

aufgenommen werden, kann man die Maschine entweder im Motor- oder im Generatorbetrieb fahren. Nur bei kleineren Maschinen ergibt sich ein geringfügiger Unterschied im Erregerstrom. Man richtet sich nach den Einrichtungen des Prüffeldes. In Abb. 99a sind verschiedene Stromkreise wiedergegeben, auf denen die durch eine Regelkennlinie gegebenen Punkte durch Geraden verbunden sind. Man sieht, daß alle Linien für $I = 0$ durch den gleichen Wert des Erregerstromes, nämlich durch den Leerlaufstrom i_0 gehen müssen. Praktisch geht man bei der Aufnahme so vor, daß man vorher die einzuhaltenden Verhältnisse der Leistungsmesserausschläge errechnet. Es gilt z. B. für $\cos \varphi = 1,0$ $\alpha_{\text{klein}}/\alpha_{\text{groß}} = 1,0$, für $\cos \varphi = 0,8$ $\alpha_{\text{klein}}/\alpha_{\text{groß}} = 0,4$, $\cos \varphi = 0,6$ $\alpha_{\text{klein}}/\alpha_{\text{groß}} = 0,13$ und endlich für $\cos \varphi = 0,0$ $\alpha_{\text{klein}}/\alpha_{\text{groß}} = -1,0/+1,0$. Zugehörige weitere Werte können der Leiter auf S. 326 entnommen werden. Man erhöht schrittweise die Wirkleistung durch Regelung der



a) Zusammengehörige Werte von β und i liegen auf Parallelen zur Nulllinie.

b) V-Kurven $I = f(i)$ für $N_{\text{wirk}} = \text{konst.}$ (Motorcurven \approx Generatorcurven.)

Abb. 100. Die V-Kurven $I = f(i)$ für $N_{\text{wirk}} = \text{konst.}$ im Vektor- (a) und im Liniendiagramm (b) bei der idealen, ungesättigten, verlustlosen Volltrommelmaschine.

Erregerstromstärke der Gleichstrommaschine und stellt den Erregerstrom der Synchronmaschine nach. Meistens begnügt man sich mit den Kurven für $\cos \varphi = 1,0, 0,8$ und $0,0$. Letztere sollte man immer auch auf das Gebiet der Untererregung ausdehnen und bis zum Erregerstrom Null aufnehmen. Die übliche Art der Darstellung ist in Abb. 99b wiedergegeben.

Die V-Kurven: $I = f(i)$. $U = \text{konst.}$ $N_{\text{wirk}} = \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1, \frac{5}{4} N_{\text{wirk, nenn}} = \text{konst.}$ Diese Kennlinien sind sehr bequem aufzunehmen. Man stellt die Synchronmaschine auf konstante Wirkleistung ein und ändert nur noch den Erregerstrom. Abb. 100a läßt erkennen, daß auch hier praktisch gleiche Kurven für Motor- oder Generatorbetrieb zu erwarten sind. Die Punkte einer Kennlinie liegen im Stromdiagramm auf Parallelen zur Grundlinie. Man erkennt, daß sich durch einen bestimmten Erreger-

strom bei den einzelnen Wirkleistungen das Stromminimum des Netzstromes einstellen läßt. Bei Abweichungen von diesem Erregerstrom wird der Strom wieder größer, und zwar infolge Blindstromabgabe an das Netz, wenn übererregt wird und durch Blindstrombezug vom Netz, wenn untererregt wird. Die übliche Darstellung ist in Abb. 100 b wiedergegeben. Der Verlauf der Kurven hat ihnen den Namen V-Kurven gegeben. Die einzelnen Kurven haben keinen Punkt gemeinsam. Die V-Kurve für $N_{\text{wirk}} = 0$ ist identisch mit der $\cos \varphi = 0$ -Kurve der Regelkennlinien.

Wenn man auf den einzelnen V-Kurven die Punkte für $\cos \varphi = 1,0, 0,8, 0,6$ usw. einträgt und gleichbezeichnete Punkte untereinander ver-

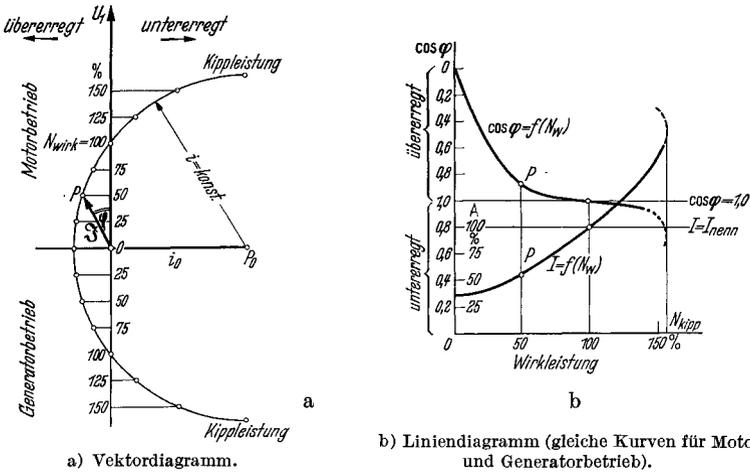


Abb. 101. Ortskurve der idealen, ungesättigten, verlustlosen Synchronmaschine im Vektor- (a) und im Liniendiagramm (b).

bindet, erhält man ohne weiteres die Regelkennlinien. Umgekehrt kann man aus diesen die V-Kurven erhalten, indem man Punkte gleicher Wirkleistung aufsucht und miteinander verbindet.

Die Ortskurven: I und $\cos \varphi = f(N)_{\text{wirk}}$. $U = \text{konst.}$ $i_{\text{err}} = i_0$, $i_{\frac{1}{2}}$, $i_{\text{nenn}} = \text{konst.}$ Die Ortskurven geben einen unmittelbaren Einblick in das Verhalten des Stromvektors bei Laständerungen. Man hält den Erregerstrom konstant, wobei man am besten den Leerlauferregerstrom, den Halblastwert, den normalen Erregerstrom und, mit einiger Vorsicht, den Erregerstrom Null einstellt. Abb. 101a zeigt die Lage der Punkte, die also auf den Kreisdiagrammen der Synchronmaschine liegen. Die Bezeichnung Kreise soll nur an den Kreis des Asynchronmotors bzw. des Asynchrongenerators erinnern. In Wirklichkeit hat nur die ungesättigte Volltrommelmaschine ein Kreisbild, die Einzelpolmaschine dagegen als Ortskurve eine PASCALSche Schnecke, die allerdings im Bereich des Nennbetriebes recht gut durch einen Kreisbogen ersetzt werden kann. Infolge des stark ansteigenden Erregerbedarfs der Pole sind die Kreise bei reiner Blindstromabgabe, also bei Wirklast Null ziemlich stark abgeplattet. Die übliche Darstellung der Ortskurven

wird nicht vektoriell durchgeführt, sondern man trägt nach Abb. 101b Strom und Leistungsfaktor über der aufgenommenen bzw. der abgegebenen Wirkleistung auf. Die einzelnen Punkte der Ortskurven können ohne weiteres den Regelkennlinien für $i_{err} = \text{konst}$ entnommen werden. Demnach sind alle drei Arten von Kennlinien gegeben, wenn man eine einzige Schar derselben aufgenommen hat.

Die Bestimmung des Erregerstromes und der Spannungsänderung nach den schwedischen Normalien. In der Prüffeldpraxis hat sich diese Bestimmung des Erregerstromes

eingeführt und gut bewährt. Man benötigt die Leerlaufkennlinie, den Leerläufererregestrom, den Kurzschlußerregestrom und den Erregerstrom für Nennstrom bei $\cos\varphi = 0$ und Nennspannung. Diese Werte werden bei jeder Prüfung bestimmt. Abb. 102 zeigt die Konstruktion des Diagrammes für Nennstrom. Auf der Waagrechten wird der Leerläufererregestrom und der Erregerstrom für $\cos\varphi = 0$ abgetragen. Im Endpunkt des Leerläufererregestromes T wird eine Senkrechte von der Länge des Kurzschlußerregestromes errichtet. Bei kleinen Maschinen unter 100 kVA erhöht man den Wert um etwa 10%, bei mittleren Einheiten von einigen Hundert kVA um 5% und bei den großen um 0 bis 2%. Durch

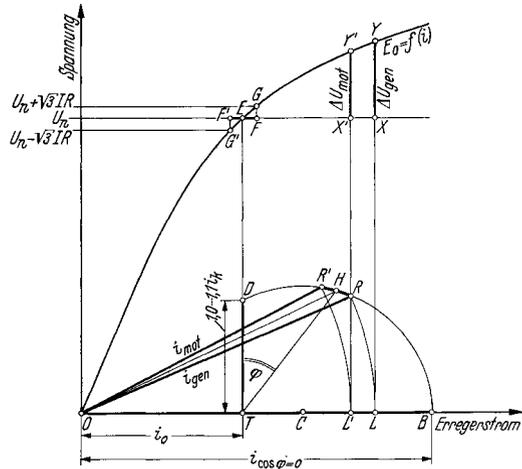


Abb. 102. Das „Schwedendiagramm“. Bestimmung des Erregerstromes für Motor- oder Generatorbetrieb bei $\cos\varphi = 1,0$ oder Übererregung nach den schwedischen Normalien Sen 3. $O E Y =$ Leerlaufkennlinie. $O T = i_0 =$ Leerläufererregestrom. $T D = (1,0 \text{ bis } 1,1) \cdot i_k = (1,0 \text{ bis } 1,1) \cdot$ Kurzschlußerregestrom. $O B = i_{\cos\varphi = 0} =$ Erregerstrom bei Strom I und $\cos\varphi = 0$. $H R = E F$; $H R' = E F'$. $O R = O L = i_{\text{gen}} =$ Erregerstrom des Generators. $O R' = O L' = i_{\text{mot}} =$ Erregerstrom des Motors. $Y X =$ Spannungsänderung des Generators, $Y' X' =$ Spannungsänderung des Motors. $\varphi =$ Phasenverschiebungswinkel. Im allgemeinen gibt $O H$ praktisch den richtigen Erregerstrom für Motor oder Generator, da $\sqrt{3} I R$ vernachlässigt werden darf.

den so gewonnenen Punkt D und den Punkt B auf der Waagrechten wird ein Kreis gelegt, dessen Mittelpunkt C auf der Waagrechten liegt. Die Konstruktion zeigt, wie zu einem beliebigen $\cos\varphi$ bei übererregter Maschine, Motor oder Generator, der Erregerstrom recht genau als die Strecke $O H$ gefunden wird. Die schwedischen Normalien berücksichtigen auch noch den Ohmschen Spannungsabfall in der Ankerwicklung, wodurch ein kleiner Unterschied zwischen Motor- und Generatorerregestrom zustande kommt. In Abb. 102 ist die entsprechende Konstruktion eingetragen, von der man praktisch wegen der Geringfügigkeit des Spannungsabfalles keinen Gebrauch macht. Der etwas größere Generatorerregestrom i_{gen} wird als $O R$, der etwas kleinere Motorerregestrom als $O R'$ gefunden. Die Kreise für $3/4, 1/2, 1/4$ Stromstärke werden auf die gleiche Weise gefunden. Sie haben

keine gemeinsamen Mittelpunkte. Auf der Senkrechten TD nimmt man eine lineare Unterteilung vor, auf der Waagerechten trägt man die der $\cos\varphi = 0$ -Linie, also der V-Kurve für Leerlauf entnommenen Erregerströme ab. Die Kreismittelpunkte rücken für fallende Ströme nach links, bleiben aber auch für die kleinsten Ströme etwas rechts vom Fußpunkt der Senkrechten, also vom Endpunkt T des Leerlaufferregerstromes liegen.

Unter *Spannungsänderung* wird die auf Nennspannung bezogene Differenz zwischen der Leerlaufspannung, die sich bei entlasteter, nicht nachgeregelter Synchronmaschine einstellt, und der Nennspannung selbst verstanden. Man drückt sie in Prozent aus. In den weitaus meisten Fällen ist der Erregerstrom der vollbelasteten Maschine größer als der Leerlaufferregerstrom. Die zugehörige Leerlaufspannung liegt also über der Nennspannung, und zwar um so mehr, je schwächer die Maschine gesättigt ist. Dies trifft besonders bei kleineren Maschinen mit Rücksicht auf deren beschränkten Erregerwicklungsraum zu. Diese Maschinen zeigen daher Spannungsänderungen, die hart an den von den REM vorgeschriebenen oberen Wert von 50% bei $\cos\varphi = 0,8$ herankommen. Man findet die Spannungsänderung, indem man zu dem aus der Lastablesung oder dem Schwedendiagramm bekannten Nennererregerstrom in der Leerlaufkennlinie den zugehörigen Wert E_0 entnimmt und die Änderung errechnet zu:

$$= \frac{\text{Spannungsänderung in \%}}{\text{Nennspannung}} = \frac{[(\text{Leerlaufspannung bei Nennerregung}) - (\text{Nennspannung})] \cdot 100}{\text{Nennspannung}}$$

Wenn die Spannungsänderung bei der fertigen Maschine bei $\cos\varphi = 0,8$ größer als 50% wird, hilft im allgemeinen nur eine Verringerung der Ankerwindungszahl, die mitunter durch Totlegen einzelner Windungen ohne größere Schwierigkeiten durchgeführt werden kann. Maschinen mit zu hoher Spannungsänderung haben im Betrieb an sich keine besonderen Nachteile.

Bestimmung des Erregerstromes und der Spannungsänderung nach den amerikanischen Normalien (ASA C 50-1936). Nach den amerikanischen Normalien wird die *Potierspannung* als Streuspannung zur Bestimmung des Erregerstromes der belasteten Synchronmaschine benutzt. Es muß bekannt sein: die Leerlaufkennlinie, die Kurzschlußkennlinie bzw. der Kurzschlußerregerstrom i_k und der Erregerstrom für $\cos\varphi = 0$ bei Nennstrom und Nennspannung. Die Konstruktion des Diagrammes ist in Abb. 103 durchgeführt. Die Potierspannung U_{pot} wird entsprechend der Darstellung bestimmt. Der Ohmsche Spannungsabfall des Ankers $\sqrt{3} \cdot I \cdot R$ ist in der Zeichnung berücksichtigt, kann aber stets vernachlässigt werden. Die Spannungen im Diagramm werden verkettet eingeführt, da die Leerlaufkennlinie für die verkettete Spannung vorliegt. An die Klemmenspannung U wird der Ohmsche und der induktive Spannungsabfall angetragen und zur sich ergebenden EMK \mathcal{E} der Leerlaufferregerstrom bestimmt. Von diesem wird aber nur der über die Luftspaltlinie hinausgehende Teil Δi benutzt. Der Gesamterregerstrom i wird

gefunden als vektorielle Summe aus dem Luftspaltanteil $i_{0,l}$ des zur Nennspannung gehörigen Leerläufererregers und dem Kurzschlußerregers i_k . Hierzu kommt als algebraischer Zuschlag Δi .

Man sieht, daß diese Konstruktion, die an Einfachheit etwas hinter der nach den schwedischen Normalen zurücksteht, genau die gleichen Werte wie diese für den Leerlauf und für Phasenschieberbetrieb ergibt. Man erhält in beiden Fällen den tatsächlich gemessenen Erregersstrom i_0 bzw. $i_{\cos\varphi=0}$. Für beliebige Belastungen weichen die Erregersströme nur unwesentlich voneinander ab.

Die *Spannungsänderung* wird auf übliche Weise gefunden, indem man zu i aus der Leerlaufkennlinie die zugehörige Spannung E_0 abgreift und $E_0 - U_{\text{nenn}}$ in Prozent von U_{nenn} ausdrückt.

Das Diagramm der Synchronmaschine. Bei den Synchronmaschinen besteht ein Unterschied, ob es sich um eine Volltrommelmaschine oder um eine Einzelpolmaschine handelt. Zu ersteren zählen die Turboläufer und die synchronisierten Asynchronmaschinen, zu letzteren die üblichen Maschinen mit ausgeprägten Polen.

Die Volltrommelmaschine kann nur im erregten Zustand synchron laufen, die Einzelpolmaschine dagegen bleibt auch bei Erregersstrom Null im Tritt und kann sogar in diesem Zustand mit etwa 10 bis 20% ihres Nenn Drehmomentes belastet werden. Im Leerlauf kann ein schwacher Erregersstrom sogar in umgekehrter Richtung durch die Erregerswicklung geschickt werden. Betrieblich hat dies aber kein Interesse. Dagegen findet die unerregte Synchronmaschine, die keine Erregerswicklung, sondern nur einen Anlaufkäfig besitzt, als sog. *Reluktanzmotor* für Spezialantriebe kleiner Leistung und für Regelzwecke, wo synchrone Drehzahl gefordert wird, eine gewisse Anwendung.

Die *Volltrommelmaschine* verhält sich genau wie der synchronisierte Asynchronmotor, dessen Diagramm bereits auf S. 123 beschrieben wurde. Erregersstrom i und Ankerstrom I erregen gemeinsam den Kraftfluß der Maschine. In Abb. 104a ist das Kreisdiagramm zum unmittelbaren Vergleich mit dem Diagramm der Einzelpolmaschine nochmals dargestellt. Da es bei der Synchronmaschine bequemer ist, dem Diagramm den leicht meßbaren Erregersstrom zugrunde zu legen, wird der Netzstrom I durch zugehörigen Kurzschlußerregersstrom i_k

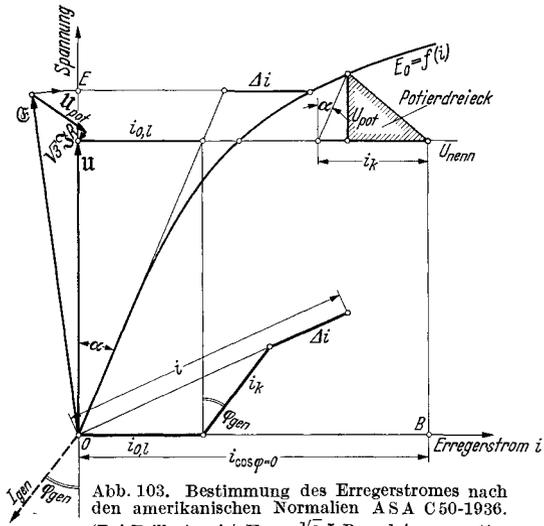


Abb. 103. Bestimmung des Erregersstromes nach den amerikanischen Normalen ASA C 50-1936. (Bei Teillasten ist U_{pot} , $\sqrt{3} I R$ und i_k proportional mit Strom I umzurechnen. Der gezeichnete Generatorzustand ist derselbe wie in Abb. 102. Das Ergebnis ist dasselbe.)

ausgedrückt. Der Maßstab für den Netzstrom ist also gleich dem gewählten Erregerstrommaßstab mal I_{nenn}/i_k .

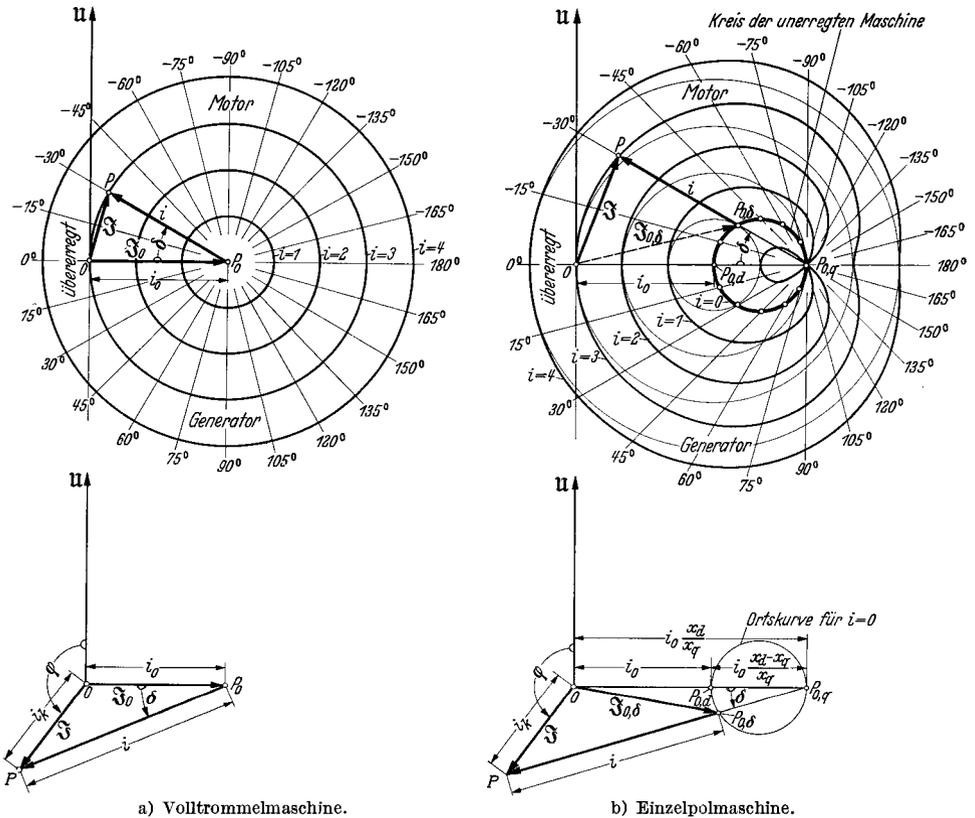


Abb. 104. Ortskurven und Diagramm der idealen, ungesättigten, verlustlosen Synchronmaschine in der Ausführung als Volltrommel- (a) und als Einzelpolmaschine (b). Oben ist der Betriebszustand eines schwach untererregten Motors eingetragen, unten das Diagramm für einen übererregten Generator dargestellt.

Im Falle (a) ergibt sich Erregerstrom i als vektorielle Differenz zwischen Ankerstrom I und Leerlaufstrom I_0 , die der Länge nach durch i_k und i_0 wiedergegeben werden. I_0 ist von der Polradstellung δ unabhängig. Im Falle (b) ergibt sich i als vektorielle Differenz zwischen Ankerstrom I und „Leerlaufstrom“ $I_{0,\delta}$, deren Länge i_k und $i_{0,\delta}$ geben. $I_{0,\delta}$ hängt von Polradwinkel δ ab, der seinerseits durch Betriebspunkt P gegeben ist. Polradwinkel δ ist voreilend bei Generatoren, nacheilend bei Motoren. Ortskurven (a) sind Kreise mit i als Radius, Ortskurven (b) Pascalsche Schnecken, die punktwise gefunden werden, indem man auf beliebigen Strahlen durch P_0, q vom Schnittpunkt mit dem Kreis der unerregten Maschine aus i nach beiden Seiten abträgt. Konstruktion dieses Grundkreises ist möglich, wenn X_d/X_q bekannt ist; Bestimmung von X_d und X_q S. 179.

Aus dem Diagramm kann man die in guter Annäherung stimmende Beziehung für das Kippmoment der Volltrommelmaschine entnehmen, nämlich:

$$Md_{\text{kipp}} = Md_{\text{nenn}} \cdot \frac{i}{i_k \cdot \cos \varphi},$$

wobei i der Erregerstrom bei Nennbetrieb ist. Da i vom Leerlauferrregerstrom i_0 abhängt, wächst die Überlastbarkeit mit steigendem Leerlauf-

erregterstrom stark an. Auch wirkt ein voreilender, kleiner Vollaust- $\cos\varphi$ günstig auf die Überlastbarkeit ein. Soll er jedoch, wie es bei Motoren häufig gefordert wird, gleich 1,0 sein, so muß der Luftspalt des Synchronmotors gegenüber der normalen Ausführung vergrößert werden, um die Einbuße durch den guten Leistungsfaktor durch erhöhten Erregerbedarf bei Leerlauf wieder auszugleichen (vgl. S. 124).

Das Diagramm für die *Einzelpolmaschine* ist in Abb. 104 b dargestellt¹. Man sieht, daß die Einzelpolmaschine auch im unerregten Zustand imstande ist, eine gewisse motorische oder generatorische Leistung abzugeben. Wenn man den Ankerstrom der unerregten Maschine als „Leerlaufstrom“ bezeichnen will, dann sind alle Ströme, die durch den „unerregten“ Kreis gegeben sind, als Leerlaufströme anzusprechen. Ihre Größe hängt nur ab von der elektrischen Winkelverdrehung des Polrades δ . Der Erregerstrom zu einem beliebigen Ankerstrom \mathfrak{J} wird unter dieser Annahme auf die gleiche Weise wie bei der Volltrommelmaschine als vektorielle Differenz von \mathfrak{J} und $\mathfrak{J}_{0,\delta}$ bzw. i_k und $i_{0,\delta}$ gefunden. Damit ist auch die Konstruktion der Ortskurve gegeben. Durch den Leerlaufpunkt für die Querstellung $P_{0,q}$ werden eine Reihe von Strahlen gelegt, auf denen man, vom Schnittpunkt mit dem Leerlaufkreis ausgehend, nach beiden Seiten den Erregerstrom i abträgt und die für konstante Werte von i ermittelten Punkte untereinander verbindet. Man sieht, daß durch die Pollücken Ortskurven zustande kommen, die nur in zwei einander gegenüberliegenden Punkten mit dem Kreis der Volltrommelmaschine übereinstimmen. Im übrigen Teil verläuft die Kurve der Einzelpolmaschine außerhalb des Volltrommelkreises. Größer ist der Unterschied bezüglich des Verdrehungswinkels δ des Polrades, der bei gleichen Wirkleistungen kleiner ausfällt. Dies bedeutet aber, daß das synchronisierende Moment der Einzelpolmaschine größer als das der Volltrommelmaschine ist. Den Leerlaufkreis findet man, indem man die unerregte, am Netz liegende Maschine durch eine geeignete Antriebsmaschine zum ganz langsamen Schlüpfen bringt. Der kleinste Strom ergibt den Punkt $P_{0,a}$ und der größte Strom den Punkt $P_{0,q}$. Durch beide wird ein Kreis gelegt, dessen Mittelpunkt auf der Waagerechten liegt (vgl. S. 179).

Beide Diagramme, der Kreis für die Volltrommelmaschine und die Pascalschnecke für die Einzelpolmaschine, gelten in der wiedergegebenen Form nur für die *nichtgesättigte Maschine*, deren Ankerwiderstand vernachlässigbar klein ist. Sie haben daher für die modernen, hoch ausgenutzten Maschinen keine praktische Bedeutung, da bei diesen zu große Abweichungen zu erwarten sind. Für den Einblick in die inneren Verhältnisse bei beiden Maschinengattungen sind sie von großem Wert.

Die *Sättigung* wird jedoch bei den nachfolgend beschriebenen Diagrammen berücksichtigt. Zu ihrer Konstruktion benötigt man den Verlauf des Polflusses, des Flusses in der aktiven Schicht: Luftspalt, Ankerzähne und Ankerrücken, und des Polstreufusses über dem Erregerstrom.

¹ SCHAMMEL, I.: Arch. Elektrotechn. Bd. 23 (1930) S. 237 und KRAPP: Wiss. Veröff. Siemens-Werk Bd. 5 (1926/27) Heft 2. — SIEGEL: Elektrotechn. u. Masch.-Bau E. & M. 45. Jg. (1927) S. 1—8.

Außerdem muß bekannt sein: die Ständerstreuspannung, die Ankerückwirkung und bei der Einzelpolmaschine das Verhältnis zwischen Hauptfeldlängs-Blindwiderstand zu Hauptfeldquer-Blindwiderstand, das allerdings allgemein zu 1 : 0,7 gesetzt werden kann.

In Abb. 105 a ist die ohne weiteres verständliche Konstruktion für die Volltrommelmaschine dargestellt, und in Abb. 105 b ist die für die Einzelpolmaschine geltende Konstruktion wiedergegeben. Bei diesen

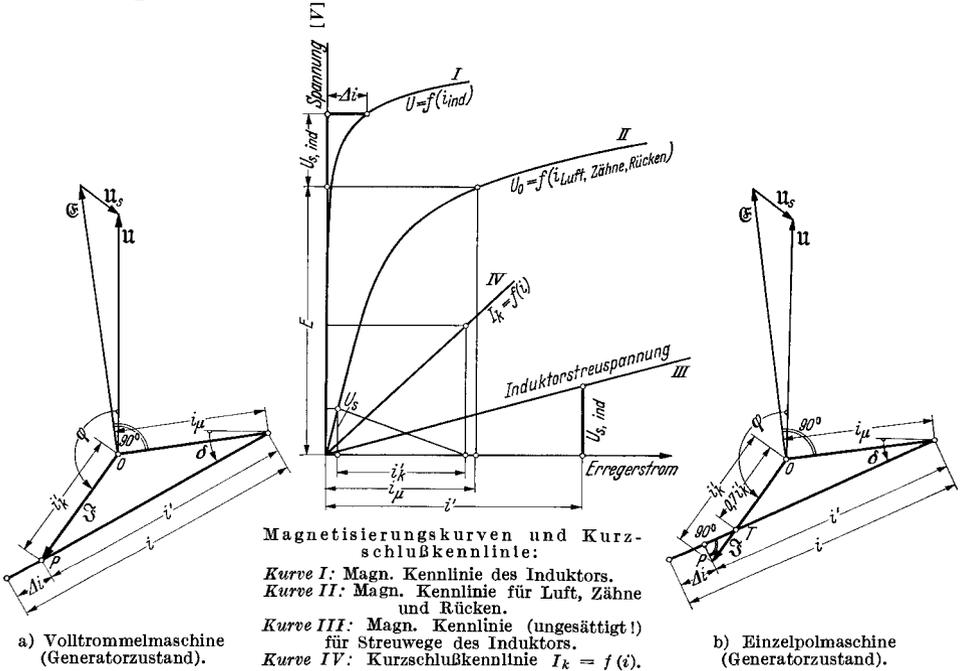


Abb. 105. Diagramm der gesättigten Synchronmaschine unter der üblichen Vernachlässigung des Ohmschen Abfalles im Anker. (i_{μ} = Magn.strom zur EMK E. i_k = Ankerrückwirkung für Ankerstrom I in Längsstellung, $0,7 i_k$ = Ankerrückwirkung in Querstellung. i' = Erregerstrom bei ungesättigtem Induktor; Δi = zusätzliche Erregung des gesättigten Induktors; i = tatsächlicher Erregerstrom. δ = Polradwinkel, nach unten: voreilend im Generatorbetrieb, nach oben: nacheilend bei Motorbetrieb. φ = Phasenwinkel zwischen u und \mathfrak{F} , $< 90^\circ$ bei Motor-, $> 90^\circ$ bei Generatorbetrieb. U_s = Streuspannung des Ankers beim Strom I. $U_{s,ind}$ = Streuspannung des Induktors beim Erregerstrom i' .

Diagrammen wird der Netzstrom \mathfrak{F} nicht durch den Kurzschlußerregstrom i_k , sondern durch die Ankerrückwirkung i'_k wiedergegeben, welche um den der Streuspannung U_s entsprechenden Magnetisierungsstrom i_{μ} , der ungesättigten Maschine kleiner als i_k ist. (Vgl. weiter unten.)

Die Polverdrehungswinkel δ sind in beiden Diagrammen eingezeichnet. Da die Sättigungskennlinie für die Pole und der Polstreufuß, sowie die Kennlinie für die aktive Schicht bei der normalen Prüfung nicht ermittelt werden, können diese beiden genauen Diagramme, die der Vorausberechnung der Maschinen zugrunde liegen, nicht an Hand der Meßergebnisse gezeichnet werden. Sie lassen aber den mitunter sehr starken Einfluß der steigenden Polsättigung bei der Einzelpolmaschine erkennen.

In Abb. 106 ist das ohne Erklärungen verständliche Diagramm der kurzgeschlossenen und der mit $\cos \varphi = 0$ bei Nennspannung laufenden Synchronmaschine wiedergegeben. Man erkennt, wie bei Kenntnis der Ankerstreuspannung U_s , die durch die Bohrstreuprobe ermittelt wird, aus dem Kurzschlußversuch die Ankerrückwirkung i_k' ermittelt werden kann.

Die charakteristischen Größen der Synchronmaschine und ihre experimentelle Ermittlung¹.

Die Synchronmaschine besitzt eine Reihe von kennzeichnenden Größen, die für die Überlastbarkeit, die Stabilität, die Werte des Dauer- und des Stoßkurzschlusses, für das Verhalten bei schiefer oder Nullpunktbelastung und den einwandfreien Lauf bei pulsierendem Antriebs- oder Belastungsdrehmoment von besonderer Bedeutung sind. Bei Kenntnis dieser Größen können Maschinen verschiedener Herkunft miteinander verglichen werden. Zu beachten ist, daß alle Blindwiderstände mehr oder weniger stark vom Sättigungszustand der Maschine abhängen und deshalb angegeben werden muß, ob es der gesättigte oder der ungesättigte Wert ist.

Das Kurzschlußverhältnis. Unter Kurzschlußverhältnis (short-circuit ratio) versteht man das Verhältnis des Leerläuferergerstromes bei Nennspannung zum Kurzschlußerregerstrom bei Nennstrom, also

$$\text{Kurzschlußverhältnis} = \frac{i_0}{i_k},$$

oder auch die identische Beziehung: Dauerkurzschlußstrom bei Leerlauf-erregung zu Nennstrom, also

$$\text{Kurzschlußverhältnis} = \frac{J_{k_0}}{J_{\text{nenn}}}.$$

Je größer das Kurzschlußverhältnis ist, desto größer ist die Überlastbarkeit der Synchronmaschine. Für die Überlastbarkeit gilt:

$$\frac{Md_{\text{kip}}}{Md_{\text{nenn}}} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{i_0}{i_k \cdot \cos \varphi} + \text{tg} \varphi\right)^2}.$$

Maschinen mit hohem Fluß haben ein großes, Maschinen mit hohem Strombelag ein kleineres Kurzschlußverhältnis. Im allgemeinen liegt der Wert etwa zwischen 0,8 und 1,5.

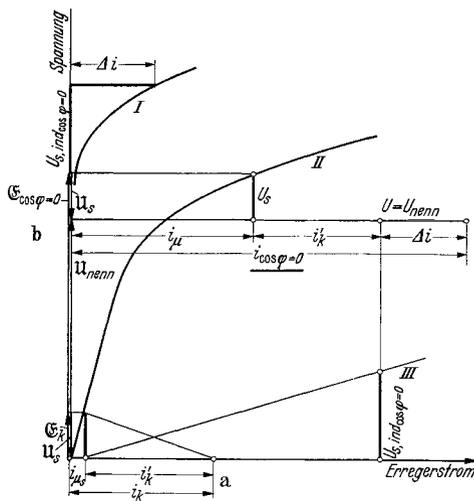


Abb. 106. Bestimmung des Erregerstromes bei Kurzschluß: i_k (a) und bei Phasenschieberbetrieb mit $\cos \varphi = 0$ und Nennspannung: $i_{\cos \varphi = 0}$ (b).

¹ Zum Teil nach Vorschlägen des AIEE. (American Inst. of El. Eng.).

Die synchrone Reaktanz X . Die einzelnen Definitionen der synchronen Reaktanz weichen im Schrifttum und auch in der Praxis voneinander ab. Bei der ungesättigten Maschine decken sie sich dagegen. Man versteht unter synchroner Reaktanz den Blindwiderstand je Phase, den die synchronlaufende, aber unerregte Maschine der Netzspannung bietet. Bei Transformatoren und Asynchronmotoren bezeichnet man die gleiche Größe mit Leerlaufreaktanz. Sie stellt also nichts anderes dar als das Verhältnis der Leerlaufspannung je Phase zu dem dem Netz entnommenen Leerlaufstrom je Phase, wenn man, wie immer zulässig, den Ankerwiderstand vernachlässigt. Die synchrone Reaktanz hängt unmittelbar vom Kehrwert der Größe des wirksamen Luftspaltes ab. Bei der Einzelpolmaschine gäbe es nach dieser Definition zu jeder Stellung des Polrades δ eine andere synchrone Reaktanz. Man unterscheidet aber nur die Reaktanz in der Längsstellung X_a und die in der Querstellung X_q , die wegen des der Pollücke entsprechenden größeren Ersatz-Luftspaltes kleiner als X_a sein muß. Im allgemeinen ist die synchrone Reaktanz in der Querstellung rund 70 bis 75% derjenigen in der Längsstellung. In der synchronen Reaktanz ist bereits der Streublindwiderstand der Ankerwicklung eingeschlossen, denn es gilt die Gleichung:

Synchrone Reaktanz = Streureaktanz des Ankers + Hauptfeldreaktanz.

Es ist üblich, die synchrone Reaktanz wie folgt zu definieren:

$$\text{Längsstellung: } X_a = \frac{\text{Spannung je Phase}}{\text{Dauerkurzschlußstrom je Phase}}$$

bei gleichem Erregerstrom und bei ungesättigter Maschine,

$$= \frac{\text{Spannung je Phase}}{\text{Ankerstrom je Phase}}$$

bei unerregter, in Längsstellung befindlicher Maschine; bzw. den prozentualen Wert:

$$\frac{X_a \%}{100} = \frac{\text{Kurzschlußerregerstrom bei Nennstrom}}{\text{Luftspaltanteil des Leerlaufferregerstromes bei Nennspannung}}$$

Man sieht, daß diese Definition der prozentualen Synchronreaktanz bei der ungesättigten Maschine mit dem Kehrwert des Kurzschlußverhältnisses übereinstimmt. Wenn man beide Werte miteinander malnimmt, erhält man also das Verhältnis Gesamtleeerlaufferregerstrom zu Luftspaltanteil desselben, also ein Maß für den Sättigungsgrad der Maschine.

$$\text{Querstellung: } X_q = \frac{\text{Spannung je Phase}}{\text{Ankerstrom je Phase}}$$

in Querstellung der unerregten, ungesättigten Maschine.

X_a und X_q sind also ungesättigte Größen. Sie werden durch einen Leerlaufversuch der unerregten, ganz langsam schlüpfenden Synchronmaschine experimentell ermittelt. Die Synchronmaschine wird an ein Netz von Nennfrequenz und ungefähr 25% der Nennspannung gelegt und durch eine entsprechend bemessene Antriebsmaschine auf eine nur ganz wenig von der synchronen Drehzahl abweichende Geschwindigkeit gebracht. Der dem Netz entnommene Leerlaufstrom schwankt zwischen

einem Kleinstwert in der Längsstellung und einem rund 30 bis 50% größeren Höchstwert in der Querstellung hin und her. Den Kleinstwert $I_{0,d}$ liest man ab, wenn das an die offenen Erregerschleifringe gelegte Spannungsmeßgerät (am besten Drehspulinstrument!) die induzierte Spannung Null anzeigt. Den Höchststrom $I_{0,q}$ dagegen liest man ab, wenn die induzierte Spannung an den Schleifringen ihren Höchstwert hat. Wenn sich die Netzspannung mit den Stromschwankungen ändert, ist sie zur selben Zeit mit den Strömen abzulesen. Ihr Wert soll durch die Fußzeichen d in der Längsstellung und q in der Querstellung bezeichnet werden. Dann ergibt sich:

$$X_d = \frac{U_d}{\sqrt{3} I_{0,d}} \quad \text{und} \quad X_q = \frac{U_q}{\sqrt{3} I_{0,q}}$$

In Abb. 107 ist die Schaltung und bildliche Erläuterung dieses Versuches wiedergegeben. Dem Versuch liegt die Identität zwischen Dauerkurzschlußstrom bei Leerlauferregung und Leerlaufankerstrom in der Längsstellung der unerregten, ungesättigten Maschine zugrunde. Sobald die Maschine in den gesättigten Zustand übergeht, wird der Kurzschlußstrom, der zur Leerlauferregung gehört, größer als der Ankerstrom der unerregten Maschine bei gleicher Spannung.

Die ungesättigte synchrone Reaktanz X_d gibt die obere Grenze für den kapazitiven Widerstand X_c an, auf den die Synchronmaschine noch arbeiten darf, ohne sich selbst zu erregen. Solche Widerstände werden von langen Hochspannungsleitungen und Kabelnetzen dargestellt. Zum besseren Vergleich benutzt man wiederum den prozentualen Wert und spricht von der prozentualen *Ladeleistung* innerhalb der Selbsterregungsgrenze, die also definiert wird zu:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ladeleistung in Prozent der Nennleistung} \\ \text{innerhalb der Selbsterregungsgrenze} \end{array} \right\} = \frac{100}{X_d \%} \cdot 100.$$

Die flüchtige Stoßkurzschlußreaktanz X'' (subtransient reactance) ist der Blindwiderstand, der sich plötzlichen, symmetrischen Laständerungen im allerersten Augenblick entgegensetzt. Im allgemeinen wird diese Reaktanz aus den Ergebnissen des Stoßkurzschlußversuches ermittelt. Man erhält den Wert für die Längsrichtung, und zwar den gesättigten Wert, da der Stoßkurzschlußstrom ein Vielfaches des Nennstromes ausmacht. Durch einen Versuch an der stillstehenden Maschine kann man auch den mäßig gesättigten Wert erhalten, und zwar, je nach Stellung des Polrades, den Wert für die Längsstellung und den für die Querstellung.

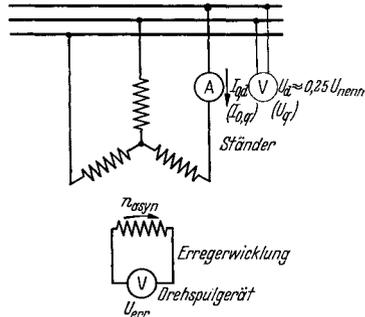


Abb. 107. Bestimmung der synchronen Reaktanzen X_d und X_q durch netzseitige Magnetisierung der unerregten, mit ganz geringem Schlupf angetriebenen Synchronmaschine. Zugeführte Spannung etwa 25% der Nennspannung. Synchronreaktanz in Längsstellung $X_d = \frac{U_d}{\sqrt{3} I_{0,d}}$, wenn $U_{err} \sim 0$. Synchronreaktanz in Querstellung $X_q = \frac{U_q}{\sqrt{3} I_{0,d}}$, wenn $U_{err} \sim \pm \text{Maximum}$ (Erregerschleifringe offen!).

Längsstellung: X''_d aus Stoßkurzschlußversuch. Man zeichnet entsprechend Abb. 108 die Hüllkurve an den Stoßkurzschlußstrom und verlängert sie rückwärts bis zum Zeitpunkt des Beginnes. Dabei ist Rücksicht auf die allerersten Stromwellen zu nehmen, die besonders schnell abklingen. Man dividiert den doppelten Scheitelwert des Stromes durch $2 \cdot \sqrt{2}$ und erhält den Effektivwert des flüchtigen Stoßkurzschlußstromes. Hieraus und aus dem Leerlaufspannungswert vor Beginn des Stoßversuches ergibt sich:

$$X''_d = \frac{U_0}{\sqrt{3} I'_k} \quad (\text{stark gesättigter Wert}).$$

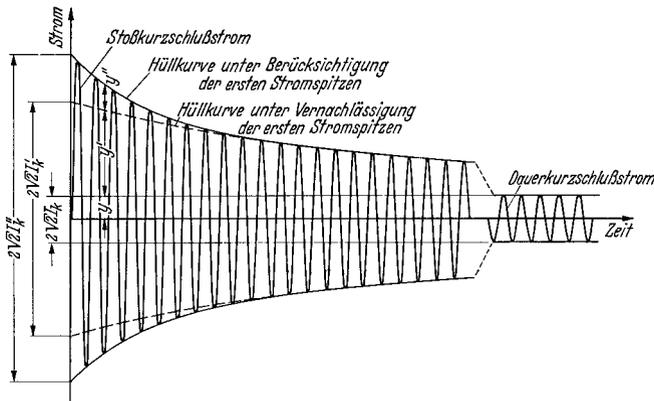


Abb. 108. Ermittlung der flüchtigen Stoßreaktanz X''_d und der Stoßreaktanz X'_d in Längsstellung aus dem Stoßkurzschluß-Oszillogramm. (Gesättigte Werte.)

$$X''_d = \frac{U_0}{\sqrt{3} I'_k} \quad X'_d = \frac{U_0}{\sqrt{3} I'_k} \quad U_0 = \text{verk. Leerlaufspannung vor dem Stoßversuch.}$$

Die Ordinatenifferenz: y ist konstant und gleich $\sqrt{2} \bar{I}_k$

y' klingt exponentiell ab mit der Kurzschlußzeitkonstanten T'_d

y'' klingt exponentiell ab mit der flüchtigen Kurzschlußzeitkonstanten T''_d

Die Trennung von y' und y'' erfolgt auf halblogarithmischem Papier nach Darstellung von $y' + y'' = f(\text{Zeit})$.

Querstellung: X''_q ist bei laufender Maschine nur schwer zu bestimmen. Im allgemeinen erfolgt die Messung bei Stillstand im nachstehend beschriebenen Versuch.

Längsstellung: X'_d aus Stillstandversuch. Man macht den in Abb. 109 dargestellten Versuch an der zweisträngig gespeisten, stillstehenden Maschine, deren Erregerwicklung in sich kurzgeschlossen ist. Ein im Kurzschlußkreis des Feldes eingeschalteter Wechselstrommesser (Netzfrequenz!) zeigt an, ob der dort fließende Kurzschlußstrom einen Höchstwert oder den Wert Null hat. Wenn U die zugeführte Spannung und I der in den in Reihe liegenden Phasen fließende Strom ist, so erhält man:

$$X'_d \approx \frac{U}{2I},$$

wenn der Strom in der Erregerwicklung seinen Höchstwert annimmt. Im allgemeinen steht das Polrad in einer beliebigen Stellung und muß

daher so lange verdreht werden, bis der Strom in der Erregerwicklung am größten wird.

Querstellung: X''_q aus Stillstandsversuch. Der gleiche Versuch dient der Bestimmung der flüchtigen Stoßkurzschlußreaktanz in der Querstellung. Man muß nunmehr das Polrad so lange verdrehen, bis in der Erregerwicklung induzierte Kurzschlußstrom Null wird. Dann ist:

$$X''_q \approx \frac{U}{2I}.$$

Beide Blindwiderstände hängen von der Stärke des der Maschine zugeführten Stromes ab. Da man mit Rücksicht auf die Erwärmung, vor allem auch der Erregerwicklung bei Turboläufern, nicht wesent-

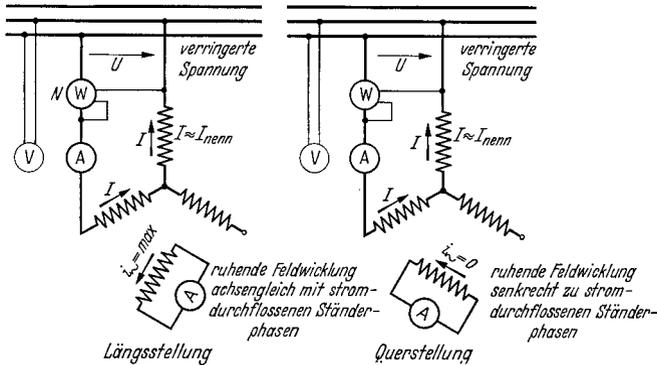


Abb. 109. Ermittlung der flüchtigen Stoßreaktanz X''_d und X''_q in Längs- und in Querstellung bei der stillstehenden, einphasig gespeisten Synchronmaschine (ungesättigte Werte, da $I \approx I_{nenn}$).

$$X''_d = \frac{U \cdot \sin \varphi}{2I} \approx \frac{U}{2I}, \text{ wenn } i_{\sim} \text{ in Feldwicklung ein Maximum ist.}$$

$$X''_q = \frac{U \cdot \sin \varphi}{2I} \approx \frac{U}{2I}, \text{ wenn } i_{\sim} \text{ in Feldwicklung verschwindet.}$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{N}{UI}\right)^2}.$$

lich über $1/4$ -Nennstrom gehen darf, erhält man praktisch ungesättigte oder doch nur ganz schwach gesättigte Werte. Sie liegen rund 25% über den beim Stoßkurzschluß ermittelten Beträgen; diese betragen daher rund 80% der beim Stillstandsversuch ermittelten Widerstände.

Die Stoßkurzschlußreaktanz X' (transient reactance). Dieser Blindwiderstand ist bei den Maschinen ohne Dämpferkäfig oder ohne massive Polschuhe identisch mit dem flüchtigen Blindwiderstand. Es ist also der Widerstand, den eine Maschine beim Stoßkurzschluß bieten würde, wenn man den vorhandenen Dämpfer ausbauen oder die massiven Schuhe durch lamellierte ersetzen würde. Er ist größer als der flüchtige Widerstand, denn Dämpfer und massive Schuhe setzen den Stoßkurzschlußstrom hinauf. (Vergleiche Doppelnut-Asynchronmotor, wo nach Ausbau des oberen Käfigs der Kurzschlußstrom auf 50 bis 75% heruntergehen würde!) Man erhält ihn aus dem Kurzschlußversuch auf die gleiche Weise wie den flüchtigen Widerstand, wenn man die Hüll-

Die Nullreaktanz X_0 wird durch einen Versuch an der stillstehenden oder laufenden Maschine, deren Erregerwicklung in sich kurzgeschlossen ist, vorgenommen. Man speist die in offener Dreieckschaltung liegende Ankerwicklung nach Abb. 111 mit der Spannung U und mißt den aufgenommenen Strom I . Dieser Versuch entspricht dem gleichen Versuch beim Transformator. Dann ergibt sich

$$X_0 \approx \frac{U}{3I}$$

als ungesättigter Wert. X_0 hängt sehr stark von der Sehnung der Ankerwicklung ab und ist für eine Wicklung mit $\frac{2}{3}$ Schritt am kleinsten. Der Wert liegt bei etwa $\frac{1}{3}$ von X''_d bei normalen Wickelschritten von 83% und bei $\frac{1}{6}$ bei einem Schritt von 66,6% der Polteilung.

Die Potierspannung und die Potierreaktanz. In einer Synchronmaschine mit ungesättigten Polen kann die Streuspannung und also auch die Streureaktanz des Ankers durch Eintragen des sog. *Potierdreiecks* gewonnen werden. Tatsächlich kommt bei modernen Maschinen infolge der hohen Ausnutzung des Polquerschnittes ein Fehler durch den vernachlässigten, beträchtlichen Anteil der Pol-AW hinein, der allerdings zum großen Teil wieder durch einen zweiten Fehler wettgemacht wird, der darin besteht, daß bei der Konstruktion des Dreiecks nicht die Sättigungskurve für die aktive Schicht: Luft, Ankerzähne und Ankerrücken, sondern die durch den Leerlaufversuch gewonnene Leerlaufkennlinie benutzt wird. Immerhin bietet die durch die Potierkonstruktion gewonnene Potierspannung einen guten Anhalt für die Streuspannung der Ankerwicklung. Die Potierreaktanz erhält man, wenn die Potierspannung durch den $\sqrt{3}$ fachen Ankerstrom geteilt wird. Wie auf S. 173 dargestellt, wird die Potierspannung nach den amerikanischen Normalien zur Bestimmung der Erregerstromstärke bei beliebiger Belastung und Phasenverschiebung benutzt.

Am besten drückt man die Potierstreuspannung in Prozent der Nennspannung der Maschine aus. Man erhält Werte zwischen 8 und 20%. Sie gibt gute Vergleichsmöglichkeiten zwischen ähnlichen Maschinen.

Die Konstruktion des Potierdreiecks ist Abb. 103 zu entnehmen.

Die Eigenschwingungszahl der Synchronmaschine. Zu jeder Belastung der Synchronmaschine gehört ein bestimmter Verdrehungswinkel des Polrades gegenüber der Leerlauflage. Man bezeichnet diesen Winkel mit δ und mißt ihn in elektrischen Graden, die p mal größer als die entsprechenden räumlichen Winkelgrade sind. p ist die halbe Polzahl der Maschine. Wenn das Polrad durch einen Laststoß oder durch plötzliche Entlastung aus der bisherigen Winkelstellung entfernt oder in eine neue Stellung geführt wurde, so nimmt es die alte bzw. die neue

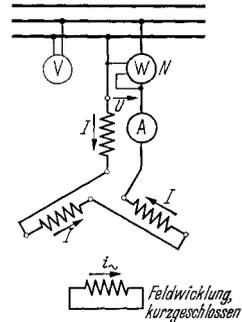


Abb. 111. Bestimmung des Nullreaktanz X_0 bei einphasig in Reihenschaltung aller Phasen gespeister, synchron angetriebener oder ruhender Synchronmaschine.

$$X_0 = \frac{U \cdot \sin \varphi}{3I} \approx \frac{U}{3I},$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{X}{U \cdot I}\right)^2}.$$

Stellung erst nach einigen Pendelungen ein. Durch die Wirkung der synchronisierenden Kraft werden die Schwungmassen beschleunigt und führen so die Schwingungen herbei. Die Eigenfrequenz dieser Schwingungen bzw. die zugehörige Eigenschwingungszeit interessiert in jenen Fällen, wo das Antriebs- oder das Belastungsmoment pulsierend sind. Die Frequenz dieser Pulsationen muß zur Vermeidung gefährlicher Resonanzerscheinungen mindestens 30% von der Eigenfrequenz der Synchronmaschine entfernt liegen. Dies kann man durch geeignete Größe des Schwungmomentes stets erreichen. Die Eigenfrequenz der Synchronmaschine hängt ab von der Höhe der Erregung und umgekehrt von der Höhe des GD^2 . Von der Netzfrequenz ist sie in weiten Grenzen unabhängig. Diese erscheint zwar neben der von ihr abhängigen Synchrondrehzahl in der nachstehend angegebenen Formel, jedoch erkennt man leicht, daß die scheinbare Abhängigkeit nur auf die aus praktischen Gründen erfolgte Einführung der Nennleistung $N = \sqrt{3} \cdot U \cdot I/1000$ zurückgeht. U ist unmittelbar abhängig von f , kann also durch $\Phi \cdot k \cdot f$ ersetzt werden, wo Φ der Kraftfluß und k eine Maschinenkonstante ist. Dann erscheint unter dem Wurzelzeichen f^2 , dessen Wurzel f gegen f in der Synchrondrehzahl $n_{\text{syn}} = 60f/p$ außerhalb des Wurzelzeichens gekürzt werden kann.

Die Eigenschwingungszahl wird zweckmäßig in Schwingungen je Minute angegeben, um unmittelbare Vergleiche mit den Pulsationsschwingungszahlen des Antriebes oder der Last zu erhalten, da letztere mit der halben, der doppelten oder wirklichen Drehzahl zusammenfallen, also in Schwingungen je Minute bekannt sind.

Die Formeln sind bei der Volltrommel- und der Einzelpolmaschine wegen der das Drehmoment beeinflussenden Polücke voneinander verschieden. Sie lauten für die *unbelastete* Maschine:

Volltrommelmaschine

$$f_{\text{eigen}} = \frac{14460}{n_{\text{syn}}} \cdot \sqrt{\frac{N \cdot f}{GD^2} \cdot \frac{i'}{i_k}} \text{ Schwingungen/min.}$$

Einzelpolmaschine

$$f_{\text{eigen}} = \frac{14460}{n_{\text{syn}}} \cdot \sqrt{\frac{N \cdot f}{GD^2} \cdot \frac{(i' + i_0/3)}{i_k}} \text{ Schwingungen/min,}$$

dabei bedeuten:

$$14460 = \frac{18000}{\pi} \sqrt{\frac{20}{\pi}}$$

n_{syn} = Synchrondrehzahl in U/min,

N = Nennleistung in kVA = $\sqrt{3} \cdot U \cdot I/1000$,

f = Netzfrequenz,

GD^2 = Schwungmoment aller umlaufenden Teile in m^2kg ,

i_k = Kurzschlußerregestrom zu Strom I in A ,

i_0 = Leerlauferregestrom zu Spannung U in A ,

i' = reduzierter Erregestrom nach Abb. 112.

Die belastete Maschine schwingt etwas langsamer.

Man erkennt, daß innerhalb des Bereiches, wo der reduzierte Erregerstrom i' mit dem tatsächlichen Erregerstrom i zusammenfällt, die Eigenschwingungszahl der Volltrommelmaschine mit der Wurzel des Erregerstromes zunimmt. (Bei den höheren Erregerstromstärken nimmt sie weniger stark zu.) Bei Erregung Null verliert die Maschine ihre Schwingfähigkeit. Abb. 113 zeigt den Verlauf von $f_{\text{eigen}} = f(i')$.

Die Einzelpolmaschine ist auch bei Erregung Null zu Schwingungen fähig. Dies beruht auf der Reaktionskraft der Einzelpole, die sich von selbst in die Achse des aufgedrückten Flusses einzustellen versuchen. Ihre Kurve $f_{\text{eigen}} = f(i')$ entspricht daher der Kurve der Volltrommelmaschine, wenn man diese um den Betrag $i_0/3$ nach links verschieben würde. Der Wert $1/3$ müßte genau heißen $(X_d - X_q)/X_q$, mit X_d gleich Synchronreaktanz in Längsstellung und X_q in Querstellung. $1/3$ entspricht dem praktisch häufig vorkommenden Verhältnis von $X_q/X_d = 0,75$.

Die Messung der Eigenschwingungszahl ist recht einfach, kann aber nur oszillographisch erfolgen. Es genügt bei bekanntem Papiervorschub die Aufnahme des Ankerstromes. Man belastet die Synchronmaschine

etwa mit 25% ihrer Nennleistung mittels einer angekuppelten Gleichstrommaschine und entlastet plötzlich. Nach wenigen Sekunden beendet man die Aufnahme. Man wiederholt den Versuch am besten für einen oder zwei geänderte Erregerströme, wobei man vorzugsweise auch den Leerlaufstrom i_0 wählt. Außer dem

Erregerstrom braucht nur noch die Spannung U im Drehstromnetz abgelesen zu werden. Für I , welches beim Versuch keine Rolle spielt, setzt man in den Formeln immer den Nennstrom, für i_k den zugehörigen Kurzschlußerregerstrom ein, für U dagegen den Meßwert. Abb. 114 gibt zwei Oszillogramme wieder, eins bei Leerläufererregung, das andere bei Halblastererregung. Die scheinbare Schwingung doppelter Frequenz kommt dadurch zustande, daß die Maschine über die Nullage in das Generatorgebiet hinüberschwingt, wo innerhalb der gleichen Periode die Stromstärke wieder zunimmt. Sie erreicht aber nicht den gleichen Wert wie im Motorgebiet, da die Schwingungen um

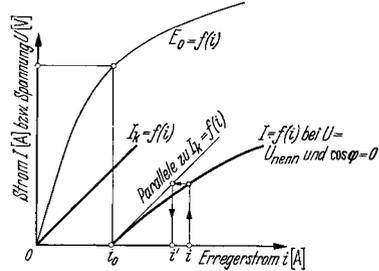


Abb. 112. Reduktion des Erregerstromes i auf i' zur Berechnung der Eigenschwingungszahl der Synchronmaschine.

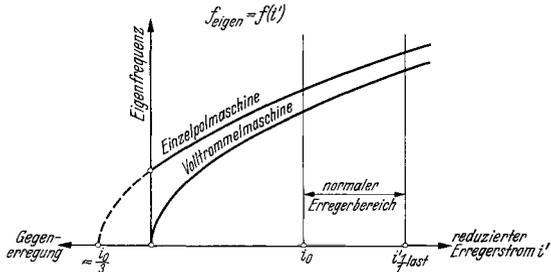
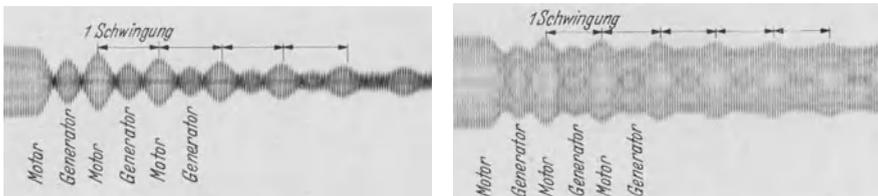


Abb. 113. Abhängigkeit der Eigenschwingungszahl der Synchronmaschine vom reduzierten Erregerstrom. Die Einzelpolmaschine ist auch im unerregten Zustand wegen der Reaktionswirkung der Pole noch schwingungsfähig.

eine kleine motorische Winkellage (Reibungsverluste + Eisenverluste!) erfolgen.

Die Drehmomente der Synchronmaschine. Stillstands- oder Anzugsdrehmoment heißt das von den selbstanlaufenden Maschinen aus dem Stillstand heraus ausgeübte Drehmoment. Es ist wie beim Asynchronmotor vom Quadrat der zugeführten Spannung abhängig. Die Messung erfolgt aber nicht wie bei jenem im Stillstand mittels eines Hebelarmes oder einer mit Gegenstrom gespeisten Gleichstrommaschine, sondern immer durch den Hochlaufversuch. Man wertet den ersten Punkt der Hochlaufkurve aus und erhält das mittlere Anzugsdrehmoment. Schwankungen in Abhängigkeit der Läuferstellung werden auf diese Weise nicht festgestellt.

Hochlaufmoment heißt das kleinste während des gesamten Hochlaufes auftretende Drehmoment zwischen Stillstand und Kippmoment. Es soll den Wert von 30% des Nenn Drehmomentes nicht unterschreiten.



Erregerstrom = Leerläufererregstrom

Erregerstrom = $\frac{1}{2}$ Last-Erregerstrom

Abb. 114. Bestimmung der Eigenschwingungszahl einer Synchronmaschine (Motor) bei Leerlauf durch oszillographische Aufnahme des Netzstromes. Anstoß zur Pendelung erfolgt durch plötzliches Entlasten von geringer Teillast auf Leerlauf. Maschine schwingt von Motorstellung des Polrades auf Generatorstellung hinüber und wieder zurück. Eigenschwingungszahl bei Last nimmt mit Wurzel aus dem „synchronisierenden Drehmoment“ ab.

Intrittfallmoment nennt man jenes höchste Lastdrehmoment, welches der Motor nach dem Einschalten der Erregung im günstigen Schaltmoment noch mit Sicherheit überwindet, wenn er seine eigene und die angekuppelten Schwungmassen in Tritt zieht. Dieses Drehmoment hängt also sowohl vom Belastungsdrehmoment wie auch vom Schwungmoment ab. Außerdem ist es stark von der Erregerstromstärke abhängig, deren Normalwert man zugrunde legt. Unter gegebenen Verhältnissen kann das Eintrittfallmoment ohne weiteres gemessen werden. Man steigert nach und nach das Belastungsdrehmoment, bis die Maschine nicht mehr imstande ist, in Tritt zu laufen. Das Zuschalten der Erregung, das in fertigen Anlagen u. U. von polarisierten Relais überwacht wird, erfolgt in jenem Augenblick, wo der in der Erregerwicklung induzierte Schlupfstrom gerade die gleiche Richtung wie der zuzuschaltende Gleichstrom hat. Man erkennt dies am eingebauten Drehspulstrommesser.

Nennintrittfallmoment heißt zum Unterschied vom Eintrittfallmoment jenes Drehmoment, welches die Synchronmaschine bei 95% ihrer Synchrondrehzahl, also bei 5% Schlupf, abgibt. Dieses Moment, welches etwa in der Größe von 75 bis 100% des Nennmomentes liegt, erlaubt in jenen Fällen, wo die Schwungmomente der Last unbekannt

sind, einen guten Vergleich von ähnlichen Maschinen. Es kann durch eine Belastungsaufnahme an der noch nicht in Tritt gefallenen unerregten Maschine wie beim Asynchronmotor gemessen werden.

Synchrones Moment nennt man zum Unterschied vom asynchronen Moment während des Hochlaufes das bei Synchronlauf abgegebene Drehmoment, das bei gegebenem Erregerstrom nur von der Winkellage des Polrades abhängig ist (Abb. 115a, b). Bei Volltrommelmaschinen ist es von $\sin \delta$, bei der Einzelpolmaschine außerdem wegen der Reaktionskraft der Pole von $\sin 2\delta$ abhängig.

Synchronisierendes Drehmoment nennt man das von der Synchronmaschine ausgeübte Drehmoment, welches auftritt, wenn man das

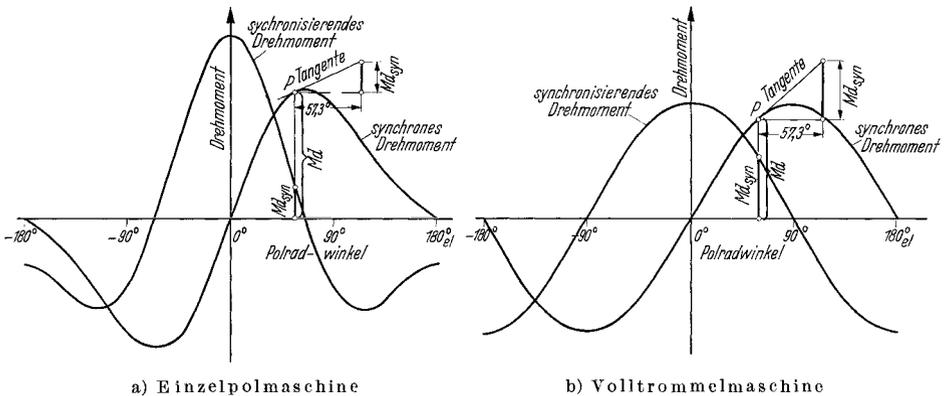


Abb. 115. Synchrones Drehmoment (Md) und Synchronisierendes Drehmoment (Md_{syn}) der Einzelpol- (a) und der Volltrommelmaschine (b) über dem elektrischen Polradwinkel, nebst graphischer Ermittlung des letzteren Momentes zu einem beliebigen Polradwinkel.

Polrad aus der dem Belastungszustand entsprechenden Stellung im voroder nachteilenden Sinne zu verstellen sucht. Dieses Moment ist am größten im Leerlauf, etwas kleiner bei Nennlast und gleich Null bei Kipplast. Bei kleinen Winkelabweichungen von der Sollage des Polrades ist es diesen proportional. Man gibt seine Größe für einen ganz bestimmten elektrischen Winkel, und zwar für den Winkel im Bogenmaß 1,0, also einen Winkel von $180^\circ/\pi = 57,3^\circ$ an. Für einen beliebigen Winkel β im Bogenmaß ist das tatsächliche rückführende Drehmoment gleich: Synchronisierendes Drehmoment $\cdot \beta$, und bei einem Winkel β in Grad gleich: Synchronisierendes Drehmoment $\cdot \beta/57,3$. Man kann das synchronisierende Drehmoment für jedes Belastungsdrehmoment bestimmen, wenn der Verlauf des synchronen Drehmomentes der Synchronmaschine über dem Polradwinkel δ bekannt ist. In Abb. 115a, b ist der Verlauf desselben für den Fall der Einzelpol- und der Volltrommelmaschine dargestellt. Zu einem beliebigen Belastungspunkt P gehört der Polradwinkel δ . Wenn dieser um den Winkel β vergrößert wird, tritt das zusätzliche Drehmoment $\sphericalangle Md$, also das synchronisierende Moment auf. Man erhält dessen oben definierte Größe, indem man nicht den beliebigen Winkel β , sondern den Winkel 1 bzw. $57,3^\circ$ einführt, aber statt mit

der Drehmomentkurve selbst, mit der Tangente im Punkte P arbeitet. Die dem Winkel 1 bzw. $57,3^\circ$ entsprechende Länge findet man, indem man die Strecke einer Halbperiode durch π teilt. Tatsächlich stellt also das synchronisierende Moment nichts anderes dar, als die Neigung der Drehmomentlinie, d. h. deren Differentialquotienten. Je steiler der Drehmomentverlauf ist, desto kräftiger beantwortet die Synchronmaschine jeden Versuch, ihr Polrad aus der richtigen Lage zu verdrehen. Man gibt das synchronisierende Drehmoment meistens für den Leerlaufzustand bei Nennerregung an, wobei man für *Volltrommelmaschinen* recht angenähert setzen kann:

Synchronisierendes Drehmoment im Leerlauf auf Winkel 1 ,
d. h. $57,3^\circ$ bezogen = Kippmoment der Maschine.

Dies ist aus der Abb. 115 b ohne weiteres zu ersehen. Bei *Einzelpolmaschinen* ist der Wert etwa $\left(1 + \frac{i_0}{3i'}\right)$ mal größer, wobei i' der reduzierte Erregerstrom nach Abb. 112 ist. Das synchronisierende Moment ändert sich bei Volltrommelläufern mit dem \cos des Polradwinkels δ . Es kann bei allen Maschinen experimentell bestimmt werden, wenn besondere Vorrichtungen zum Messen des räumlichen Polradstellwinkels δ_r vorhanden sind. Man belastet die Synchronmaschine *zusätzlich* mit einer kleinen Leistung und mißt den zusätzlichen Verdrehungswinkel gegenüber der Ausgangsstellung. Dann ist:

$$\begin{aligned} & \text{Synchronisierendes Drehmoment bei Leerlauf, bzw. bei Last} \\ & \quad \text{Zusatzbelastung in kW} \qquad \qquad \qquad 112000 \\ = & \frac{\text{Räumliche Polradwinkeländerung in Grad} \cdot \text{Synchrondrehzahl} \cdot \text{Polzahl}}{60000 \cdot 180} \text{ ist.} \\ & \quad \text{wobei } 112000 = \frac{60000 \cdot 180}{9,81 \pi^2} \text{ ist.} \end{aligned}$$

Außertrittfallmoment heißt das Kippmoment der Synchronmaschine bei Synchronbetrieb. Es gilt für Nennspannung, Nennfrequenz und Nennerregung. Seine Größe beträgt angenähert:

$$\begin{aligned} Md_{\text{kipp syn}} &= Md_{\text{nenn}} \cdot \frac{i}{i_k \cdot \cos \varphi} \text{ bei der Volltrommelmaschine und} \\ &= Md_{\text{nenn}} \cdot \frac{i}{i_k \cdot \cos \varphi} \left(1 + \frac{i_0}{6i} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{3}{2} \left(\frac{i}{i_0}\right)^2}} \right) \text{ bei der Einzel-} \\ & \qquad \qquad \qquad \text{polmaschine*}. \end{aligned}$$

Der Dauerlauf. Wenn möglich, wird der Temperaturlauf der Synchronmaschine mit Nennspannung, Nennstrom und Nennerregung gefahren, wobei es meistens ohne Bedeutung ist, ob die Maschine als Motor oder Generator läuft. In vielen Fällen kann, weil der entsprechende Antrieb oder Belastung nicht zur Verfügung steht, nur ein Lauf als Phasenschieber mit $\cos \varphi \approx 0$ durchgeführt werden. Wenn der Nennleistungsfaktor der Maschine unter 0,9 liegt, kann man ohne weiteres den Lauf mit voller Spannung und voller Ankerstromstärke fahren. Man erhält praktisch richtige Werte für die Erwärmung des Ständer-

* Literaturangabe S. 175.

eisens und der Ankerwicklung. Die Erwärmung der Erregerwicklung ist wegen des zu hohen Erregerstromes natürlich zu hoch, kann aber unbedenklich quadratisch auf die Nennstromstärke umgerechnet werden.

Bei Maschinen mit einem Leistungsfaktor über 0,9, also besonders bei Synchronmotoren mit $\cos\varphi = 1,0$, erhält man beim Lauf als Phasenschieber viel zu hohe Erregerverluste, wodurch auch die Erwärmungen des Ankers wesentlich beeinflußt werden. Man zieht in diesen Fällen einen Lauf mit Nennererregerstrom vor und reduziert die kVA-Leistung der Maschine. Dies kann durch Herabsetzen der Spannung oder des Stromes geschehen. Üblicherweise fährt man mit Nennstrom und verringert die Klemmenspannung. In besonderen Fällen berücksichtigt man die Höhe der Eisen- und der Kupferverluste und wählt jenen Lauf, der den tatsächlichen Beanspruchungen am nächsten kommt.

Die *Temperatur der Erregerwicklung* kann laufend überwacht werden, indem man den Erregerstrom und die Erregerspannung an den Schleifringen beobachtet. Wenn man den Erregerwiderstand aus Spannung und Strom errechnet, kommt man meistens zu 5 bis 10° höheren Erwärmungen, als sich aus der nachherigen Widerstandsmessung mit der Brücke ergibt.

Nur bei Maschinen mit besonders langer Auslaufzeit kann es unter Umständen notwendig sein, die wahre Erwärmung durch rückwärtige Extrapolation einer durch mehrere Messungen gewonnenen Abkühlkurve zu ermitteln. Es entspricht den praktischen Anforderungen, wenn man durch Abbremsen der Maschine den Auslauf genügend verkürzt und die Kühlluft sofort bei Beendigung des Dauerlaufes abstellt. In diesen Fällen ergibt eine einmalige Messung des warmen Widerstandes genügend genaue Meßresultate.

Dauerläufe in Kunstschaltungen, in denen die Wicklung mit Gleichstrom oder mit Wechselstrom in offener Dreieckschaltung gespeist wird, werden in der Prüffeldpraxis nicht durchgeführt. Wenn kein geeignetes Netz zur Verfügung steht oder die Antriebsmaschinen zu klein sind, fährt man oft den Erwärmungslauf im Kurzschluß. Man braucht dann eine Antriebsmaschine, welche die vollen Verluste, verringert um den Betrag der Eisenverluste und evtl. der Erregerverluste, aufzubringen imstande ist. Diese Leistung entspricht bei den großen Maschinen aber nur einem ganz geringen Prozentsatz der vollen Leistung. Der Kurzschlußlauf wird durch einen Lauf mit voller Spannung im Leerlauf ergänzt und die Erwärmungen beider Läufe zusammengezählt. Man erhält meistens um 5° zu hohe Erwärmungen.

Der Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad der Synchronmaschine wird fast ausschließlich nach dem Einzelverlustverfahren bestimmt. Das Rückarbeits- und das Übererregungsverfahren, welche auf S. 42 beschrieben werden, ermöglichen zwar die Ermittlung der Gesamtverluste, werden in der Praxis aber nur zur Belastung der Maschinen benutzt.

Die Verluste der Synchronmaschine bestehen aus den *Leerverlusten*, den *Lastverlusten* und den *Erregerverlusten*. Sie werden aus den Messungen im Leerlauf und im Kurzschluß und durch Berechnung gewonnen.

Die Leerverluste:

1. Eisenverluste = V_{fe} = Verluste bei Spannung U_{nenn} im Leerlauf. Die Ohmschen und induktiven Spannungsabfälle werden nach REM nicht berücksichtigt. (Die amerikanischen Normalien ASA berücksichtigen den Ohmschen Spannungsabfall.)

2. Reibungsverluste = V_{rbg} = Verluste durch Luft- und Lagerreibung bei Synchrondrehzahl im Leerlauf. Lagerverluste in Lagern fremder Herkunft werden nicht berücksichtigt. Bei langsam laufenden Kompressormotoren werden die Reibungsverluste meistens nicht eingesetzt, worauf im Wirkungsgrad hingewiesen wird.

Reibungs- und Eisenverluste sind demnach nach den REM unabhängig von Art und Grad der Belastung.

Die Lastverluste:

1. Ankerkupferverluste = $V_{cu_a} = 3 \cdot I_{ph}^2 \cdot R_{ph} = 1,5 \cdot I^2 \cdot R_{kl}$, wobei I den Netzstrom und R_{kl} den warmen Widerstand zwischen zwei Ankerklemmen bezeichnet. Der warme Wert ist auf 75° oder auf die durch Messung gefundene Temperatur zu beziehen.

2. Zusatzverluste = $V_{zus} = I^2 \left(\frac{V_{zus_{kz}}}{I_{kz}^2} \right)$, wobei $V_{zus_{kz}}$ die Zusatzverluste im Kurzschluß beim Kurzschlußstrom I_{kz} bedeuten.

3. Übergangsverluste = $0,9 \cdot I$ bei metallhaltigen und = $3 \cdot I$ bei Graphit- oder Kohlebürsten. Sie treten nur bei kleinen Maschinen mit umlaufendem Anker auf.

Die Erregerverluste:

1. Erregerkupferverluste = $V_{err} = i_{err}^2 \cdot R_{err} + V_{r,e}$, wobei das erste Glied die reinen Wicklungsverluste in der warmen Erregerwicklung und das zweite Glied die Verluste in den Regelwiderständen sowie in den *angebauten* Erregermaschinen bedeutet. Verluste in *fremdangetriebenen* Erregermaschinen werden nicht eingerechnet.

2. Übergangsverluste = $0,6 \cdot i_{err}$ bzw. $2 \cdot i_{err}$ treten an den Schleifringen auf und werden allgemein vernachlässigt.

Bei *Generatoren* geht man von der *abgegebenen elektrischen Wirkleistung* aus, zu der man die Summe der Einzelverluste addiert, um die aufgenommene Leistung zu ermitteln. Diese besteht entweder aus rein mechanischer Leistung bei Maschinen mit Eigenerregung oder aus mechanischer plus Erregerleistung bei fremderregten Generatoren. Es gilt:

$$N_{\text{aufnahme}} = (N_{\text{el, wirk}} + V_{fe} + V_{rbg} + V_{cu_a} + V_{zus} + V_{err}) = (N_{\text{el, wirk}} + \sum V).$$

Hieraus wird der Wirkungsgrad η errechnet zu:

$$\eta\% = 100 \cdot \frac{N_{\text{el, wirk}}}{N_{\text{aufnahme}}} = 100 \cdot \frac{N_{\text{el, wirk}}}{N_{\text{el, wirk}} + \sum V} = 100 - \frac{\sum V \cdot 100}{N_{\text{el, wirk}} + \sum V}.$$

Die zuletzt angegebene Formel eignet sich besonders gut zur genauen Berechnung des Wirkungsgrades sehr großer Maschinen.

Bei *Motoren* geht man von der *aufgenommenen Leistung*, also bei eigenerregten Maschinen von der dem Netz entnommenen Wirkleistung, bei den fremderregten Motoren von der Summe aus Netzaufnahme und Erregerleistung aus. Im allgemeinen wird man den Wirkungsgrad zu

bestimmten motorischen Lasten erst angeben können, wenn man zu den gerechneten Punkten die Wirkungsgradkennlinie zeichnet. Es gilt:

$$N_{\text{aufnahme}} - (V_{\text{fe}} + V_{\text{rbg}} + V_{\text{cu}_a} + V_{\text{zus}} + V_{\text{err}}) = N_{\text{abgabe}}.$$

Man zieht also von der aufgenommenen Leistung die Summe aller Verluste ab und erhält die abgegebene mechanische Leistung an der Welle. Hieraus errechnet man η zu:

$$\eta \% = 100 \cdot \frac{N_{\text{abgabe}}}{N_{\text{aufnahme}}} = 100 \cdot \frac{N_{\text{aufnahme}} - \sum V}{N_{\text{aufnahme}}} = 100 - \frac{\sum V \cdot 100}{N_{\text{aufnahme}}}.$$

Bei *Phasenschiebern* werden nur die Verluste errechnet. Gelegentlich werden die Verlust-kW je 100 kVA oder die Verlust-kW in Prozent der umgesetzten Blindleistung angegeben. Auf diese Weise können die umlaufenden Phasenschieber am besten mit Kondensatoren verglichen werden, bei denen ebenfalls die Verluste je 100 kVA angegeben werden. Die Verluste bestehen aus:

$$V = (V_{\text{fe}} + V_{\text{rbg}} + V_{\text{cu}_a} + V_{\text{zus}} + V_{\text{err}}).$$

und sind gleich der zugeführten Netz- plus der evtl. getrennt zugeführten Erregerleistung. Obwohl die unmittelbare Messung naheliegt, verzichtet man doch auf diese, da der sehr kleine Leistungsfaktor von etwa 0,02 bis 0,05 zu relativ großen Meßfehlern Anlaß gibt.

Der Leistungsfaktor ist von ausschlaggebendem Einfluß auf die Wirkungsgrade der Generatoren und Motoren, da bei gleicher Wirkleistung sowohl die Anker- und die Zusatzverluste, wie auch die Erregerverluste stark mit fallendem $\cos\varphi$ ansteigen. Es ist üblich, den Wirkungsgrad für $\cos\varphi = 1,0$ und für $\cos\varphi = 0,8$ anzugeben. Nur selten errechnet man den Wirkungsgrad für konstante Erregung, also für mit der Last veränderlichen $\cos\varphi$. Wird nur vom Wirkungsgrad ohne nähere Angaben gesprochen, so ist darunter der Wert bei Nennspannung, Nennstrom und Nennleistungsfaktor zu verstehen.

Toleranzen. Für die gewährleisteten technischen Daten der Synchronmaschinen gelten nach den REM folgende Toleranzen:

Gewährleistungen für:	Zulässige Abweichungen:
Wirkungsgrad η %	$\pm \frac{100 - \eta \%}{10}$, aufgerundet auf 0,1%, mindestens aber 0,5%. (Dies bedeutet 10% Toleranz der Verluste bei Wirkungsgraden unter 95%.)
Spannungsänderung	$\pm 20\%$ des gewährleisteten Wertes. (Dieser soll 50% bei $\cos\varphi = 0,8$ nicht überschreiten.)
Stoßkurzschlußstrom	$\pm 20\%$ des Sollwertes. (Dieser soll den 21fachen Nennstrom nicht überschreiten.)
Dauerkurzschlußstrom	$\pm 15\%$ des Sollwertes.
Anlaufstrom bei asynchronem Anlauf	$\pm 20\%$ des Sollwertes.
Kippmoment (synchr.)	$\pm 10\%$ des Sollwertes. (Das Kippmoment von Synchronmotoren soll bei Nennerregung mindestens das 1,5fache des Nennmomentes betragen.)
Anlaufmoment	$\pm 10\%$ des Sollwertes. (Das Hochlaufmoment, mithin also auch das Anlaufmoment, soll nicht unter 0,3fachem Nennmoment liegen. Nur bei besonderen Abmachungen darf das Anlaufmoment kleiner sein.)

D. Die Gleichstrommaschinen.

a) Allgemeines.

Der Aufbau. Die Gleichstrommaschinen bestehen im wesentlichen aus dem Magnetgestell, das aus den Haupt- und Hilfspolen sowie dem Joch zusammengebaut ist, und aus dem darin umlaufenden Anker. Die Hauptpole tragen Erregerwicklungen, die selbst-, fremd- oder hauptstromerregt werden können. Bei Selbst- und Fremderregung spricht man von Nebenschlußmaschinen, bei alleiniger Hauptstromerregung von Reihenschlußmaschinen. Motoren oder Generatoren mit gemischter Erregung heißen Doppelschluß- oder Compoundmaschinen. Das Joch besteht in den weitaus meisten Fällen aus Stahlguß oder Walzeisen. Die Pole dagegen werden häufig geblättert ausgeführt. Bei kompensierten Maschinen liegt in den Polschuhen in Nuten eingebettet eine weitere Haupt-

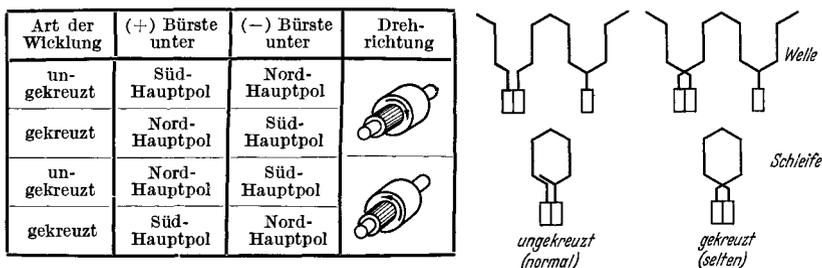


Abb. 116. Räumliche Stellung der Bürsten von Gleichstrommaschinen.

stromwicklung, deren Achse senkrecht zur Achse der Hauptpole liegt. Sie hat den Zweck, die magnetisierende Wirkung des Ankers in Verbindung mit der Wendepolwicklung aufzuheben, also zu kompensieren.

Die Hilfs- oder Wendepole finden sich heute bei allen Gleichstrommaschinen bis hinab zu Leistungen von nur wenigen Kilowatt. Sie dienen der einwandfreien Stromwendung und werden vom Ankerstrom erregt. Die Einstellung des richtigen Wendepolluftspaltes ist eine der wichtigsten Aufgaben der Gleichstrommaschinenprüfung.

Der Anker trägt eine Schleifen- oder Wellenwicklung, die an die Segmente des Kommutators angeschlossen ist. Bei Maschinen für Spannungsteilung ist die Wicklung außerdem mit zwei oder mehreren Schleifringen verbunden.

Auf dem Kommutator schleifen die Bürsten, die je zur Hälfte an die (+)- und an die (-)-Klemme der Maschine angeschlossen sind. Die Bürsten stehen üblicherweise unter der Mitte der Hauptpole, und zwar hängt die Stellung der (+)-Bürste unter einem Nord- oder einem Südpol von der offenen oder gekreuzten Ankerwicklung ab. Dies ist aus der Abb. 116 zu entnehmen. In den Schaltschemas stehen die Bürsten stets in der magnetischen Achse des Ankers, also unter den Hilfspolen, unter Annahme einer ungekreuzten Wicklung.

Das Schaltschema. Infolge der mannigfaltigen Anordnung der Erregerwicklungen auf den Hauptpolen ist bei den einzelnen Gleichstrom-

maschinen ein eindeutiges Schaltschema zur Prüfung unerlässlich. Diesem Schema ist die Drehrichtung, der Betrieb als Motor oder Generator und die sich unterstützende oder einander entgegengerichtete Wirkung der Hauptpolvergericklungen zu entnehmen. Außerdem ist die Bezeichnung der oft zahlreichen Klemmen darin enthalten. Pfeile deuten die Stromrichtung und die mit ihr übereinstimmende Richtung der magnetischen Felder an. Spulen, deren Strompfeile gleiche Richtung haben, unterstützen sich, Spulen mit entgegengesetzten Pfeilen wirken sich entgegen. Die Drehrichtung liegt fest, wenn der Pfeil des Hauptfeldes und der Pfeil des Ankers gegeben sind. Bei Motoren ist die Drehrichtung so einzutragen, als wollte man den Ankerpfeil auf kürzestem Wege in die Richtung des Hauptfeldpfeiles bringen. Bei Generatoren zeichnet man den Drehrichtungspfeil umgekehrt, also, als wollte man den Ankerpfeil auf dem längeren Wege in die Richtung des Feldpfeiles drehen. Die Pfeile des Ankers und des Wendepoles müssen immer entgegengesetzt liegen. Da Kompensations- und Wendepolwicklung sich unterstützen, stimmen ihre Pfeile überein. Allerdings wird die Kompensationswicklung nicht mehr getrennt gezeichnet. Das Schema und die Drehrichtung werden angegeben für Ansicht von der Antriebsseite aus. Will man es als von Kommutatorseite gesehen betrachten, so braucht man es nur von der Rückseite her anzuschauen. Alle Pfeile behalten ihre Gültigkeit. Die wichtigsten Schemen der Wendepolmotoren und Generatoren sind in den weiter unten folgenden Abb. 135 bis 146 wiedergegeben.

Die Ankerrückwirkung. Der stromdurchflossene Anker der Gleichstrommaschine übt einen magnetisierenden oder entmagnetisierenden Einfluß auf die Hauptpole aus. Man bezeichnet ihn als Ankerrückwirkung. Diese Rückwirkung kommt durch drei verschiedene Ursachen zustande, und zwar durch *Sättigung der auflaufenden Polschuhkante* bei den Motoren bzw. der ablaufenden Kante bei den Generatoren, durch *Verschiebung der Bürsten* aus der neutralen Stellung und durch *Verschiebung der Kommutierungszone* aus der Bürstenmitte durch die *Wendepole*.

Die Rückwirkung durch *Sättigungserscheinung* tritt nur im gekrümmten Teil der Sättigungskennlinie auf. Sie wirkt stets feldschwächend, unabhängig, ob die Maschine als Motor oder Generator arbeitet. Man drückt sie aus durch jene Anzahl AW , die zusätzlich auf dem Hauptpol benötigt werden, um bei Fließen des Ankerstromes die gleiche EMK in der Ankerwicklung wie bei Leerlauf zu erzielen. Sie sei mit AW_s bezeichnet, wobei das Fußzeichen s auf die Sättigungsabhängigkeit hinweist. In Abb. 117 ist ihre graphische Ermittlung wiedergegeben. Links und rechts von den Hauptpol- AW wird eine Strecke entsprechend dem Betrage der Anker- AW unter der linken und rechten Polschuhspitze abgetragen, also $AS \cdot b_p/2$ oder $AW_a \cdot b_p/t_p$. Hierin bedeutet AS den Ankerstrombelag in A/cm, b_p und t_p Polbogenbreite und Polteilung in cm und AW_a die gesamten Anker- AW unter dem Wendepol, also den Wert $AS \cdot t_p/2$.

Die geschwächte EMK E' ergibt sich als mittlere Höhe der Fläche $E_1 E_0 E_2 AB$. Diese kann durch Planimetrieren gefunden werden. Wesent-

lich einfacher, aber mit recht guter Genauigkeit ermittelt man den Abfall der EMK nach der auf die SIMPSONSche Regel zurückgehenden Formel:

$$\Delta E = E_0 - E' = \frac{e_2 - e_1}{6},$$

zu dem man ohne weiteres die Zahl der feldschwächenden AW_s ablesen kann. Die AW_s sind immer negativ und ändern sich zwischen Leerlauf und etwa 1,25facher Nennlast *quadratisch* mit dem Ankerstrom I . Es ist also nur nötig, $AW_{s, \text{nenn}}$ für den Nennstrom zu bestimmen und bei beliebigen Strömen zu setzen:

$$AW_s = -AW_{s, \text{nenn}} \cdot \left(\frac{I}{I_{\text{nenn}}}\right)^2.$$

Bei höheren Strömen ändern sich die AW_s nur noch linear mit der Stromstärke. Die AW_s sind die Hauptursache für das Unstabilwerden größerer Gleichstrommotoren, da sie mit steigender Last zunehmend das Feld schwächen und die Motordrehzahl in die Höhe treiben.

Die kompensierte Gleichstrommaschine besitzt keine merkliche Ankerrückwirkung durch Sättigungserscheinungen und wird daher für Großmaschinen besonders gern verwendet.

Die Ankerrückwirkung durch Bürstenverschiebung sei mit $AW_{\text{bü}}$ bezeichnet; sie wird berechnet nach der Beziehung:

$$AW_{\text{bü}} = k \cdot s \cdot \frac{D_a}{D_K} \cdot AS,$$

wobei bedeuten: k = Anzahl der Segmente, um welche die Bürsten verschoben sind,

s = Breite eines Segmentes in cm,

D_a = Ankerdurchmesser in cm,

D_K = Kommutatordurchmesser in cm,

AS = Ankerstrombelag in A/cm.

$AW_{\text{bü}}$ kann positiv oder negativ sein. Positiv, also feldverstärkend, wirkt die Bürstenverschiebung im Sinne der Kommutatordrehung bei Motoren und gegen die Drehrichtung bei Generatoren. Negativ, also schwächend auf das Hauptfeld, wirken die Bürsten, wenn sie gegen die Drehrichtung bei Motoren, in der Drehrichtung bei Generatoren verstellt werden. Man erhält das richtige Vorzeichen für $AW_{\text{bü}}$, wenn man k positiv bei Verschiebung in Drehrichtung, negativ bei Verschiebung dagegen einsetzt,

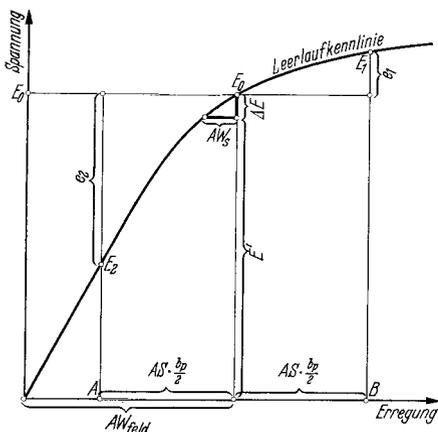


Abb. 117. Bestimmung der Ankerrückwirkung AW_s infolge Feldverzerrung durch Sättigung der Polschuhkanten. $E_2 E_0 E_1$ stellt Feldverlauf unter dem Pol bei Belastung dar. AS = Ankerstrombelag in A/cm. b_p = Polbogen in cm. E_0 = EMK bei Leerlauf; E' = EMK bei Last; ΔE = Abfall infolge Ankerrückwirkung.

$$\Delta E = \frac{e_2 - e_1}{6}.$$

AW_s = wirksame Schwächung der Feld- AW ; ändert sich zwischen Leerlauf und etwa $\frac{5}{4}$ Last *quadratisch* mit der Last, darüber hinaus etwa linear.

und AS positiv bei Motoren, negativ bei Generatorstrom einsetzt. AS berechnet sich zu:

$$AS = \frac{z \cdot \frac{I}{2a}}{\pi \cdot D_a},$$

mit z = Gesamtzahl aller Ankerleiter und
 $2a$ = Zahl der parallelen Zweige,
 I = Ankerstrom in A, (+) bei Motoren, (−) bei Generatoren.

Die Verschiebung der Bürsten wirkt allgemein ausgedrückt:

bei Verdrehung in Drehrichtung stabilisierend,
 bei Verdrehung dagegen entstabilisierend.

Dies bedeutet, daß Motoren und Generatoren mit vorgeschobenen Bürsten in der Drehzahl bzw. der Spannung abfallen bei zunehmender Last, während sie bei rückwärts verdrehten Kohlen die Drehzahl bzw. Spannung bei steigender Last zu erhöhen suchen. Aus Gründen der Kommutierung werden die Bürsten bei den heutigen Wendepolmaschinen nicht mehr verstellt, aus Gründen der besseren Stabilität dagegen in vielen Fällen. Das Zurückschieben der Bürsten wird möglichst niemals angewendet. Man macht davon nur vorsichtig Gebrauch, wenn ein Generator zu knapp in der Spannung, ein Motor nicht reichlich genug in der Drehzahl ist.

Die *Ankerrückwirkung infolge des Einflusses der Wendepole* besteht in der Verschiebung der Kommutierungszone unter der Bürste gegen die Drehrichtung bei zu *starkem*, in der Drehrichtung bei zu *schwachem* Wendefeld. Sie kann nur abgeschätzt werden und steht in keinem einfachen Zusammenhang mit der Stromstärke. Bei sehr starken Wendefeldern findet die Stromwendung fast schon an der auflaufenden Bürstenkante statt, da sie verfrüht einsetzt. Dies entspricht also äußerstenfalls einer Verschiebung der Bürsten um eine halbe Breite oder um die gleichwertige Anzahl Kommutatorsegmente. Bei sehr schwachen Wendepolen setzt die Stromwendung stark verzögert ein, der Strom wendet erst in unmittelbarer Nähe der Ablaufkante der Kohle. Dies entspricht dem Vorschub der Bürste um halbe Breite in Drehrichtung. Tatsächlich wirken richtig eingestellte Wendepole von Maschinen, welche eine nennenswerte Überlast fahren sollen, bei kleinen Ankerströmen etwas zu stark, bei hohen Ankerströmen dagegen zu schwach. Dies geht auf die ebenfalls durch Sättigungserscheinungen gekrümmte Kennlinie der Wendepole zurück. Die starken Wendepole beeinträchtigen daher zwischen Leerlauf und Vollast unter Umständen die Stabilität von Motor und Generator und müssen in solchen Fällen durch eine entsprechende Vergrößerung ihres Luftspaltes geschwächt werden, wobei die Grenze durch die einsetzende Verschlechterung der Stromwendung gegeben ist. Es gilt:

Zu starke Wendepole wirken wie rückgeschobene Bürsten: entstabilisierend, und:

Zu schwache Wendepole wirken wie vorgeschobene Bürsten: stabilisierend.

Von großem Einfluß ist der Zustand der Lauffläche unter den Bürsten. Wenn nur die Auflaufkante trägt, wirkt die Bürste rückgeschoben, wenn nur die Ablaufkante trägt, vorgeschoben. Die Bürsten müssen daher vor jeder Untersuchung, insbesondere auch bei der Inbetriebnahme, tadellos eingeschliffen werden.

Die durch Sättigungserscheinungen der Polkanten und durch Bürstenverschiebung bewirkte gesamte Ankerrückwirkung, aber mit Ausnahme der durch die Wendepole hervorgerufenen Feldbeeinflussung, errechnet sich zu:

$$AW_r = AW_s + AW_{b\ddot{u}} = -AW_s, \text{ wenn } \left(\frac{I}{I_{\text{nenn}}}\right)^2 + I \cdot k \cdot s \cdot \frac{1}{\pi D_K} \cdot \frac{z}{2a}.$$

Der Verlauf der Anteile AW_s , sowie $AW_{b\ddot{u}}$ über dem Strom ist in Abb. 118 dargestellt. In der Literatur wird auf die quadratische Abhängigkeit der sättigungsbedingten AW_s selten hingewiesen, doch ist sie von besonderer Wichtigkeit für die Stabilität großer, unkompensierter

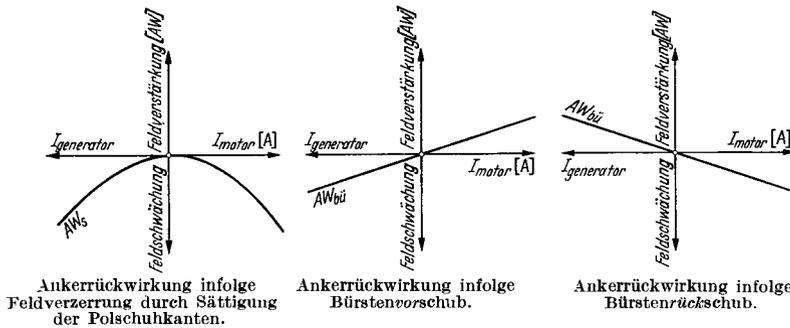


Abb. 118. Verlauf der Ankerrückwirkung infolge Feldverzerrung durch Sättigung der Polschuhkanten bzw. Bürstenverschiebung über dem Motor- bzw. Generatorstrom.

Gleichstrommotoren. Diese können nämlich manchmal wegen dieser Abhängigkeit durch Hauptstromwicklungen nur in einem kleinen Arbeitsbereich bis knapp über Nennlast stabilisiert werden, da die quadratisch ansteigende Feldschwächung darüber hinaus den Sieg über die nur linear zunehmende Feldverstärkung der Hauptstromwicklung davonträgt.

Das Diagramm und die Kennlinien. Die Kennlinien der belasteten Gleichstrommaschinen können in manchen Fällen nicht unmittelbar aufgenommen werden oder müssen während der Prüfung in weitem Maße durch Änderungen im Erregerkreis beeinflußt werden. Man hat daher eine ganze Reihe von zeichnerischen Verfahren entwickelt, die alle darauf hinausgehen, bei Kenntnis der Leerlaufkennlinie $E_0 = f(i)$ bzw. $E_0 = f(AW)$ die Betriebspunkte Punkt für Punkt oder als Kurve zu erhalten, um sie mit der Messung zu vergleichen oder sie unter Umständen an deren Stelle zu setzen. Bei Kenntnis geeigneter Verfahren ist es auch leichter, die richtigen Maßnahmen zu finden, um im Prüffeld den Probemaschinen die verlangten Spannungs-, Drehzahl- oder Regelkennlinien zu verleihen. Die grundlegenden Kennlinien sind folgende:

1. *Regelkennlinie bei Motoren und Generatoren.* Diese zeigt die Abhängigkeit zwischen Ankerstrom und Erregerstrom bei unveränderten Werten der Klemmenspannung und der Drehzahl. Man sieht ihr auch das stabile oder unstabile Verhalten der Maschine an. Im Motorbetrieb darf der Ankerstrom im allgemeinen nur ansteigen, wenn der Feldstrom geschwächt wird, und der Generatorstrom darf nur anwachsen, wenn der Feldstrom verstärkt wird. Sobald zwei verschiedene Ankerströme zu ein und demselben Erregerstrom gehören, liegt fast immer unstabiles Verhalten vor. Abb. 119a zeigt gute und schlechte Regelkennlinien.

2. *Klemmenspannungskennlinie.* Dieses ist die kennzeichnende Kurve für die Generatoren. Sie zeigt die Abhängigkeit der an den Klemmen bei Last abgegebenen Verbraucherspannung in Abhängigkeit des Laststromes bei unveränderter Erregung bzw. Erregerwiderstand. Wenn sie

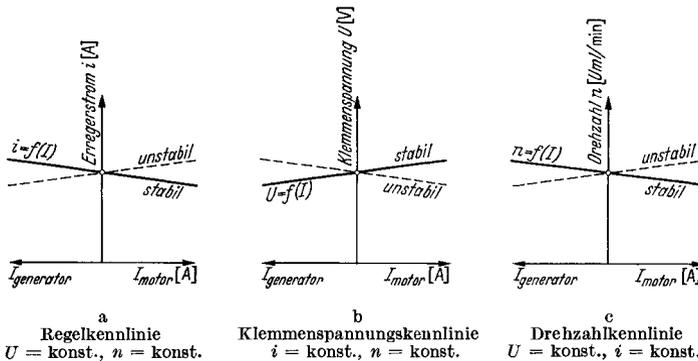


Abb. 119. Stabile und unstabile Regel-, Klemmenspannungs- und Drehzahlkennlinien von Gleichstrommotoren und Generatoren. Harte Maschinen haben schwach fallende, weiche Maschinen stark fallende Kennlinien.

sehr flach abfällt, spricht man von einer harten Maschine, wenn sie stark geneigt ist, nennt man den Generator weich. Weiche Maschinen arbeiten gut parallel miteinander, harte Maschinen weniger gut. Wenn die Klemmenspannungskennlinie mit dem Laststrom ansteigt, ist die Maschine im allgemeinen nicht als stabil zu betrachten, außer sie arbeitet auf eine längere Leitung mit nenennenswertem Spannungsabfall. Die Spannungskennlinie gilt für unveränderte Drehzahl (Abb. 119b).

3. *Drehzahlkennlinie.* Diese Kurve ist kennzeichnend für Motoren, die mit unveränderter Erregung an einem Netz konstanter Spannung arbeiten. Sie zeigt die Motorgeschwindigkeit über dem Ankerstrom oder über der Leistung. Für den Verlauf gilt das gleiche wie bei der Klemmenspannungskennlinie. Motoren mit flach fallender Kennlinie sind hart, solche mit starkem Drehzahlabfall gelten als weich. Sobald die Drehzahl mit zunehmender Last ansteigt, ist der Motor als unstabil zu bezeichnen. Abb. 119c zeigt typische Drehzahlkennlinien für stabile und für unstabile Maschinen.

Nachstehend wird ein *allgemeines Diagramm* der Gleichstrommaschine entwickelt, in dem die Diagramme aller Maschinen normaler

Bauart enthalten sind. Insbesondere können daraus die Diagramme der Nebenschluß-, Hauptschluß-, Doppelschlußmotoren und Generatoren, sowie der Krämermaschine mit ihren drei verschiedenen Feldwicklungen abgeleitet werden. Benötigt wird die Leerlaufkennlinie, der gesamte Ankerkreiswiderstand R , in dem auch der Bürstenübergangswiderstand enthalten sein soll, und die Ankerrückwirkung AW , bei Nennstrom. Als Vereinfachung soll vorerst angenommen werden, daß sich der Spannungsabfall und die Ankerrückwirkung linear mit dem Strom I ändern, obwohl dieses nach obigem nicht genau zutrifft. In den Fällen, wo die Ankerrückwirkung von besonderem Einfluß ist, kann sie Punkt für Punkt in ihrer richtigen Höhe eingeführt werden, wie z. B. in Abb. 142 und 143.

In Abb. 120 ist das Diagramm gezeichnet für eine Maschine, die eine Fremd-, eine Selbst- und eine Hauptstromerregung besitzt. Wenn man sich eine oder zwei dieser Wicklungen wegfallen denkt, erhält man alle bekannten Typen von Maschinen. Die Fremderregung wirkt immer feldverstärkend, die Selbst- oder die Hauptstromerregung kann dagegen feldaufbauend oder feldschwächend sein. Die Stärke der Erregerwicklungen ist durch ihre AW -Zahl wiedergegeben. Nach rechts weisende AW sind feldverstärkend, nach links weisende feldschwächend. Der Ohmsche Spannungsabfall, der von der Nulllinie aus eingetragen ist, wird nach oben bei Generatorbetrieb, nach unten bei Motorbetrieb gezeichnet. Für die Selbsterregung kann man im allgemeinen noch nicht die entsprechenden AW angeben, da sie von der meistens erst zu bestimmenden Klemmenspannung U bei Last abhängen. Kennzeichnend und ausreichend für die Wiedergabe der Stärke des Selbsterregerkreises ist die Neigung der Selbsterregungslinie, die unter dem Winkel α gegen die waagerechte Nulllinie verläuft. Dieser Winkel ist um so kleiner, je kleiner der Widerstand im Erregerkreis ist. Er nimmt zu, wenn der Widerstand erhöht wird. Die Gerade wird zur Senkrechten, wenn der Kreis geöffnet wird oder aber gar nicht vorhanden ist. Wenn die Neigung mit einem Winkel α über 90° verläuft, liegt Selbsterregung vor, d. h. die Selbsterregerwicklung ist gegengeschaltet. Dies kommt praktisch nur vor bei der Selbstmordschaltung, die angewandt wird, um die durch Remanenz erzeugte Maschinenspannung in besonderen Fällen möglichst zu vernichten.

Der *Aufbau des Diagrammes*, das immer nur für die Drehzahl gilt, bei der die Leerlaufkennlinie aufgenommen wurde, ist folgender. Zuerst wird auf der Nulllinie die Strecke AW_f entsprechend den Fremderregungs- AW hingelegt. Diese sind unabhängig von Strom I und Spannung U . Dann wird senkrecht der Spannungsabfall $I \cdot R$ im Spannungsmaßstab angetragen. Nach oben bei Generatoren, nach unten bei Motoren. Nach links kommen die stromabhängigen, feldschwächenden AW der Ankerückwirkung und einer etwa vorhandenen Gegenschlußwicklung, nach rechts die feldverstärkenden AW der Ankerrückwirkung und der etwa vorgesehenen Hauptschlußwicklung. Diese ein bis drei Strecken sind nur vom Strom abhängig. Die resultierende Strecke sei mit „ J -Strecke“ bezeichnet. Sie bildet das wertvollste Hilfsmittel beim Aufbau der speziellen Diagramme. Im Endpunkt wird die Selbsterregungsgerade S

unter dem Winkel α gezeichnet, nach rechts obenweisend bei Selbsterregung, nach links obenweisend bei Entregung. Sie geht genau senkrecht nach oben, wenn überhaupt keine Selbsterregung vorhanden ist. Diese Gerade trifft die Leerlaufkennlinie im Punkte P , der unmittelbar den Wert der Klemmenspannung liefert.

Der Winkel α der Selbsterregungslinie wird gefunden, indem man zu einem beliebigen Wert der an den Selbsterregungskreis angelegten

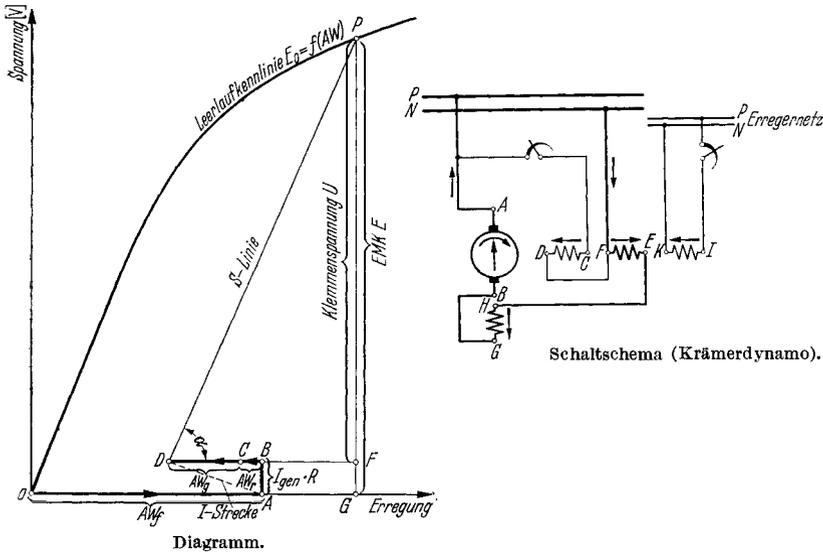


Abb. 120. Diagramm der Gleichstrommaschine. Beispiel einer Kräerdynamo mit Fremderregung IK , Selbsterregung CD und Gegenstromerregung FE . Die Buchstabenfolge im Diagramm entspricht der Konstruktion: $OA = AW_f =$ Fremderregung, $AB = I_{gen} \cdot R =$ Ohmscher Abfall (bei Generatorbetrieb nach oben, bei Motorbetrieb als $I_{mot} \cdot R$ nach unten), $BC = AW_g =$ Ankerückwirkung (nach links bei Feldschwächung, nach rechts bei Feldverstärkung), $CD = AW_g =$ Gegenstromerregung (nach links bei Feldschwächung entspr. Gegenkompondierung, nach rechts bei Feldverstärkung entspr. Kompoundierung), S -Linie = Selbsterregungslinie = Gerade mit Neigungswinkel α ($\alpha = 90^\circ$ bei Selbsterregungswiderstand ∞ oder fehlendem Selbsterregerkreis, $\alpha > 90^\circ$ bei Selbstentregung). $EMK = E =$ senkrechter Abstand des Punktes P von Nulllinie, Klemmenspannung $U =$ senkrechter Abstand von Linie BD , gestrichelte Strecke $AD =$ „I-Strecke“, welche nur vom Strom abhängig ist. Durch Unterteilung derselben entspr. den Teillastströmen $0,75 I, 0,50 I, 0,25 I, 0,0 I$ und Parallelverschieben der S -Linie durch die zugehörigen Teilpunkte wird das Diagramm für diese Lastzustände erweitert. Vgl. Abb. 122–125.

Spannung mittels des Widerstandes den aufgenommenen Strom und zu diesem durch Malnehmen mit der Windungszahl je Pol die AW berechnet. Man trägt dann waagerecht die AW , senkrecht ansetzend die Spannung ab und verbindet Ausgangs- und Endpunkt beider Strecken durch die so gefundene Selbsterregungslinie. Bei Entregungsschaltung sind die AW nach links, also im feldschwächenden Sinn abzutragen. Die tatsächlich auftretenden Selbsterregungs- AW werden erst nach dem Auffinden der Klemmenspannung U bekannt. Man greift sie im Diagramm als die Strecke DF ab, die ein Lot durch den Schnittpunkt P mit der Leerlaufkennlinie auf der Waagrechten durch den unteren Anfangspunkt der Selbsterregungslinie abschneidet. Diese Selbsterregungs- AW sind als einzige von der Spannung U abhängig.

Die Strecken, die vom Nullpunkt O zum Klemmenspannungspunkt P führen, zerfallen: 1. in die von Strom I und Spannung U unabhängigen Fremd- AW , 2. in den vom Strom I abhängigen Spannungsabfall $I \cdot R$, die Ankerrückwirkungen- AW und die Hauptstrom- AW bzw. Gegenstrom- AW , also die „ J -Strecke“, sowie 3. die Selbsterregungsline, deren Neigung nur vom Widerstand des Selbsterregungskreises abhängt.

Man erkennt ohne weiteres die Maßnahmen, die notwendig sind, um zu einer anderen Klemmenspannung U zu kommen. Soll diese höher liegen als die aufgefundene Spannung, so ist entweder die Fremderregung

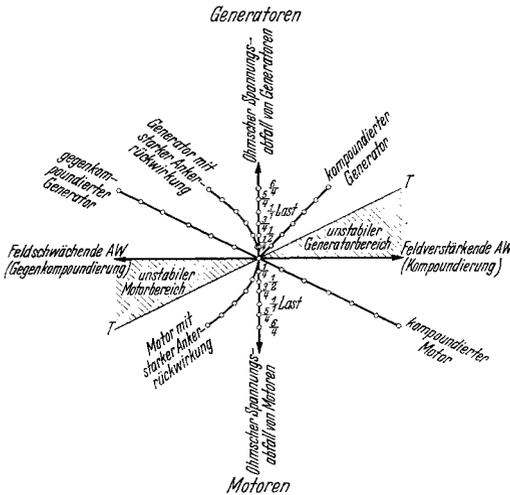


Abb. 121. Die „ J -Strecken“ der Gleichstrommaschinen. Sie verbinden die bei Teillasten oder Vollast zusammengehörigen Werte des Ohmschen Spannungsabfalles im Ankerkreis und die vom Ankerstrom I unmittelbar (Hauptstromwicklungen) oder mittelbar (Ankerrückwirkung) hervorgerufenen Erreger- AW auf dem Hauptpol. Die Maßstäbe sind die gleichen wie die der Leerlaufkennlinie. Generatoren und Motoren sind instabil, wenn die „ J -Strecke“ innerhalb des schraffierten Raumes fällt. TT' ist parallel zur Tangenten an die Leerlaufkennlinie im Leerlaufpunkt P_0 .

oder die Selbsterregung zu verstärken, soll sie tiefer sein, so ist eine der beiden zu schwächen. Maßnahmen am Spannungsabfall $I \cdot R$ sind nur im Sinne einer Vergrößerung desselben möglich, dürfen aber im allgemeinen wegen der Unwirtschaftlichkeit nicht vorgenommen werden. Die Beeinflussung durch Veränderung der Ankerrückwirkungen - AW ist, wenn es sich um geringe Spannungsänderungen handelt, oft durch Bürstenvorschub oder -rückschub möglich. Die Hauptstrom- oder Gegenstrom- AW können meistens nur durch einen parallel zur Wicklung geschalteten Nebenwiderstand geschwächt werden.

Dieser kann aber, auch wenn er als Kurzschluß ausgeführt wird, meistens nur 50 bis 80 % des Stromes übernehmen, da der Widerstand der Hauptstromwicklung selbst recht klein ist.

Als Klemmenspannung ist bei Motor- oder Generatorbetrieb, wie dies in Abb. 120 besonders gekennzeichnet ist, die senkrechte Komponente der Selbsterregungsline zu betrachten. $I \cdot R$ ist dann berücksichtigt. Als EMK dagegen ist die Senkrechte vom Punkt P auf der E_0 -Linie bis zur Nulllinie zu betrachten, die also um $I \cdot R$ größer wird als die Spannung bei Generatoren, um $I \cdot R$ kleiner bei Motoren.

Außer einzelnen Punkten können auf Grund der erläuterten Diagramme die vollständigen Regel-, Spannungs- und Drehzahlkennlinien gewonnen werden. Diese erscheinen zwar in einem schiefen oder krummlinigen Koordinatensystem, lassen aber ohne irgendwelche weitere Arbeit sofort das qualitative Verhalten der Maschine, insbesondere was Stabili-

tät oder Unstabilität, sowie statische Grenzbelastbarkeit, Drehzahl- und Spannungsänderung betrifft, erkennen. Man bestimmt lediglich die sog. „J-Strecke“ der Maschine für den betrachteten Generator- oder Motorbetrieb oder für beide zusammen. Die „J-Strecke“ entsteht nach obigem, indem man zu verschiedenen Ankerstromstärken I die Summe aus Ankerrückwirkung und Hauptstrom- AW bzw. Gegenstrom- AW berechnet und über diesen die zugehörigen Werte von $I \cdot R$ aufträgt. Wenn man die Ankerrückwirkung und den Spannungsabfall unter den Bürsten als linear von I abhängig betrachtet, ist die „J-Strecke“ natürlich eine mehr oder weniger flach verlaufende Gerade. Sie geht nach oben bei Generatoren, nach unten bei Motoren, nach rechts bei Feldverstärkung durch den Strom I , nach links bei Feldschwächung durch denselben. Bei Berücksichtigung der tatsächlich quadratischen Abhängigkeit der Ankerrückwirkung vom Strom verläuft sie gekrümmt. Man sieht, daß die „J-Strecke“ nichts anderes ist als der Ort der Endpunkte der stromabhängigen Strecken im Diagramm. Abb. 121 zeigt die „J-Strecken“ für verschiedene Fälle.

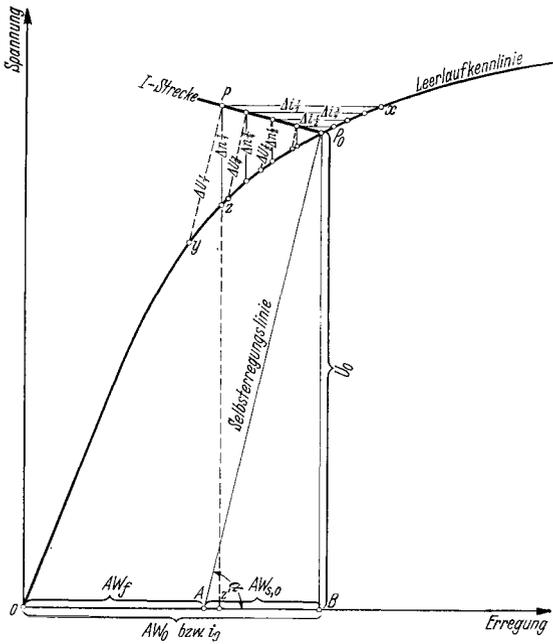


Abb. 122. Die Änderung der Erregung i , der Klemmenspannung U und der Drehzahl n im Diagramm der Gleichstrommaschine. (Beispiel einer Krämerdynamo.)

Erregungsänderung $\Delta i =$ waagerechter ($U = \text{konst.}, n = \text{konst.}$)
 Spannungsänderung $\Delta U =$ schiefer, zur Selbsterrregungslinie paralleler
 Drehzahländerung $\Delta n =$ senkrechter

Abstand zwischen den der jeweiligen Last entsprechenden Punkten der „J-Strecke“ und der Leerlaufkennlinie.

Es ist, wenn „J-Strecke“ oberhalb, unterhalb der Leerlaufkennlinie liegt:

$$\Delta i = + \frac{PX}{OB} \cdot i_0, - \frac{PX}{OB} \cdot i_0$$

$$\Delta U = - \frac{PY}{P_0A} \cdot U_0, + \frac{PY}{P_0A} \cdot U_0$$

$$\Delta n = + \frac{PZ}{ZZ'} \cdot n_0, - \frac{PZ}{ZZ'} \cdot n_0$$

Der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Änderungen des Erregerstromes, der Klemmenspannung oder der Drehzahl ist in Abb. 122 dargestellt. Die „J-Strecke“ ist an den Leerlaufpunkt P_0 angesetzt, der der Leerlaufspannung U_0 bzw. der Leerlauferregung AW_0 entspricht und auf der zur Leerlaufdrehzahl n_0 gehörenden Sättigungskennlinie liegt. Geht man von dem zum betrachteten Strom I auf der „J-Strecke“ liegenden Punkt P aus waagrecht bis zur Sättigungskennlinie, so erhält

man die Änderung der Erregung Δi , die nötig ist, um bei gleichbleibender Klemmenspannung U die Drehzahl $n = n_0$ oder bei gleichbleibender Drehzahl n die Klemmenspannung $U = U_0$ aufrechtzuerhalten.

Hält man die Erregung bzw. den Widerstand im Selbsterregungskreis konstant, dann entspricht der *senkrechte* Abstand von P zur Sättigungskennlinie der sich einstellenden Drehzahländerung Δn , wenn die Klemmenspannung U konstant bleibt.

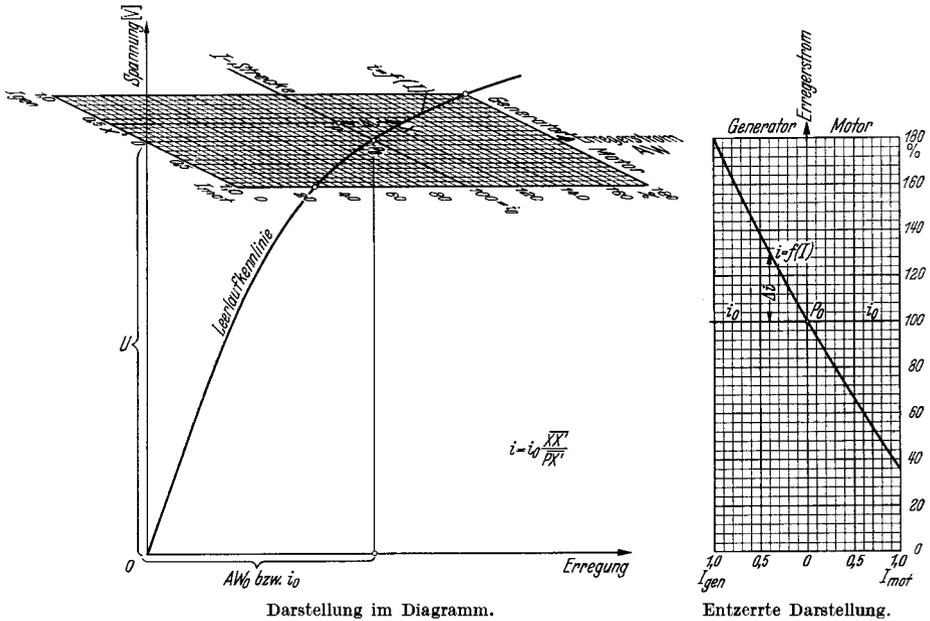
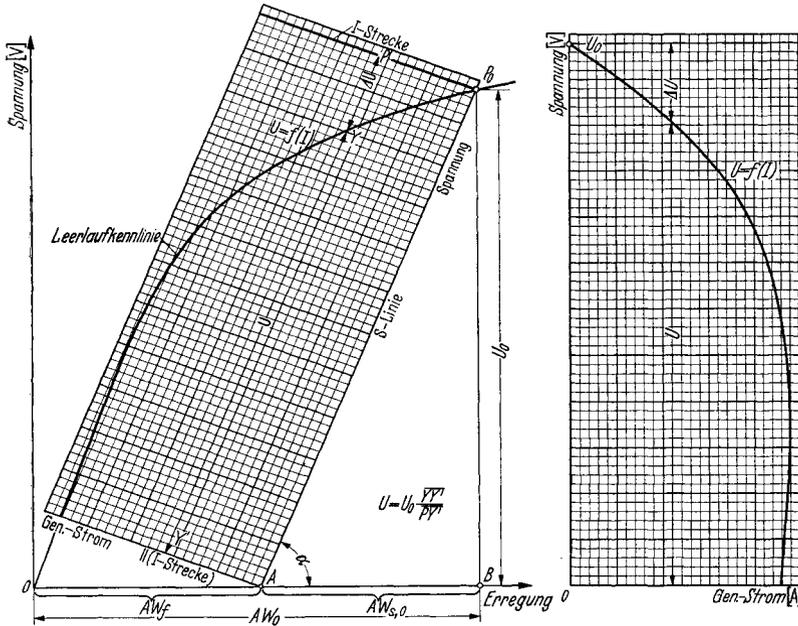


Abb. 123. Ermittlung der Regelkennlinie $i = f(I)$ mittels der Leerlaufkennlinie und der „J-Strecke“. Beispiel eines gegenkompoundierten Generators oder eines komppoundierten Motors. Konstruktion: Auf Nulllinie die gesamte Leerlauferrregung AW_0 , bzw. i_0 abtragen. Auf der Senkrechten $U = U_0$ abmessen. Durch P_0 Leerlaufkennlinie darstellen. An P_0 die „J-Strecke“ ansetzen, deren waagerechte Abstände von der Leerlaufkennlinie die erforderlichen Erregungsänderungen Δi ergeben. In dem eingezeichneten, schiefwinkligen Koordinatensystem stellt die „J-Strecke“ durch P_0 die Werte $i = i_0 = \text{konst.}$ dar, während die Leerlaufkennlinie selbst die gesuchte Regelkennlinie wiedergibt. Der 0-Punkt des Systems liegt auf der Nullpunktordinaten des Diagramms in gleicher Höhe mit P_0 . Der Maßstab für i ist in beiden Systemen der gleiche.

Bleiben die Drehzahl und der Erregerstrom bzw. Widerstand im Selbsterregungskreis konstant, so gibt der zur Selbsterregungsgeraden parallele, *schräge* Abstand von P zur Sättigungskennlinie die Änderung der Klemmenspannung ΔU . Bei Maschinen ohne Selbsterregungskreis ist natürlich der senkrechte Abstand zu nehmen. Man erhält (vgl. auch Abb. 123, 124, 125):

$$\begin{aligned} \Delta i &= \frac{PX}{OB} \cdot i_0 & \text{und} & & i &= \frac{XX'}{PX'} \cdot i_0, \\ \Delta U &= \frac{PY}{P_0A} \cdot U_0 & & & U &= \frac{YY'}{PY'} \cdot U_0, \\ \Delta n &= \frac{PZ}{ZZ'} \cdot n_0 & & & n &= \frac{PZ'}{ZZ'} \cdot n_0. \end{aligned}$$

Positives Δi bedeutet Erhöhung der Erregung, positives ΔU Erhöhung der Spannung und positives Δn Erhöhung der Drehzahl. Das positive oder negative Vorzeichen hängt davon ab, ob die „J-Strecke“ oberhalb oder unterhalb der Sättigungskennlinie verläuft. Und zwar ist:



Darstellung im Diagramm.

Entzerrte Darstellung.

Abb. 124. Ermittlung der Klemmenspannungskennlinie $U = f(I)$ mittels der Leerlaufkennlinie und der „J-Strecke“. Beispiel einer Krämermaschine. Konstruktion: Auf Nulllinie die gesamte Leerlauferrregung AW_0 abtragen. Auf der Senkrechten U_0 abmessen. Durch P_0 die Leerlaufkennlinie darstellen. An P_0 die „J-Strecke“ ansetzen, deren schiefe — zur Selbsterregungslinie parallele — Abstände von der Leerlaufkennlinie die Spannungsänderungen ΔU ergeben. In dem eingezeichneten, schiefwinkligen Koordinatensystem stellt die „J-Strecke“ durch P_0 die Werte $U = U_0 = \text{konst.}$ dar, während die Leerlaufkennlinie selbst die gesuchte Klemmenspannungskennlinie wiedergibt. Der 0-Punkt des Systems liegt um den — auf die Fremderregung entfallenden — Anteil der Leerlauferrregung entfernt vom 0-Punkt des Diagramms auf dessen Abszisse. Der Maßstab für U ist gleich dem Spannungsmaßstab im Diagramm multipliziert mit dem Sinus des Selbsterregungswinkels α .

wenn die „J-Strecke“ oberhalb, unterhalb der Sättigungslinie liegt,

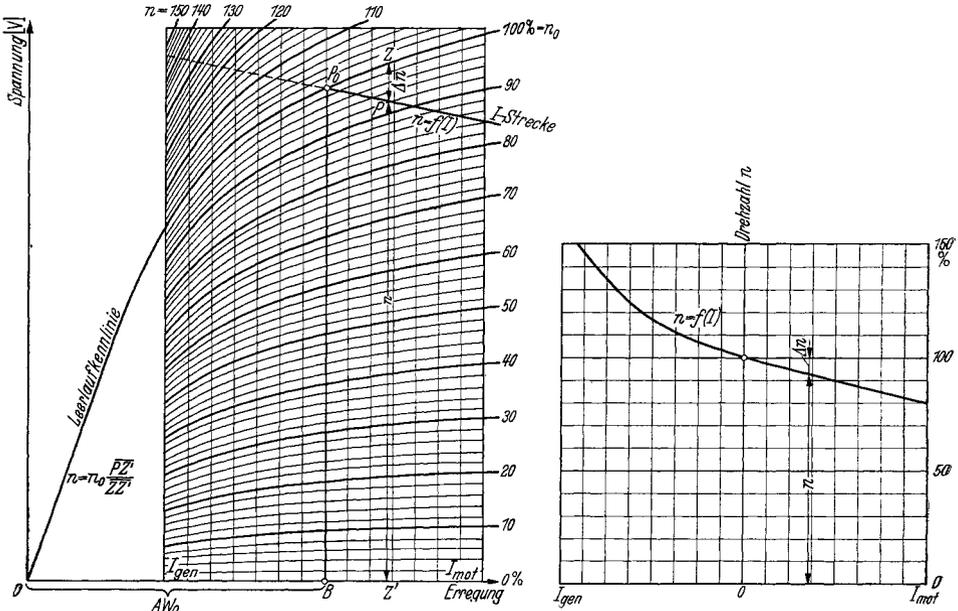
Δi	+	—
ΔU	—	+
Δn	+	—

Die Ermittlung der Regelkennlinie $i = f(I)$ geschieht nach Abb. 123, die der Klemmenspannungskennlinie $U = f(I)$ nach Abb. 124 und die der Drehzahlkennlinie $n = f(I)$ nach Abb. 125. Wegen der Anschaulichkeit ist in diesen Abbildungen ein Koordinatensystem eingetragen, dessen entzerrte Wiedergabe auch dargestellt ist. Man erkennt, daß die beiden ersten Kennlinien ein Stück der Sättigungskennlinie sind, während die letzte durch die „J-Strecke“ wiedergegeben wird. Die wichtigsten Kennlinien sind bei den einzelnen Maschinen nochmals ermittelt und wiedergegeben.

Das Drehmoment. Im allgemeinen wird das von der Gleichstrommaschine aufgenommene oder abgegebene Drehmoment aus der Leistung an der Welle und der Drehzahl wie bei anderen Maschine berechnet zu :

$$Md = \frac{N_{\text{welle}}}{n} \cdot 973,$$

wobei N_{welle} in kW, n die Drehzahl in Uml/min und $973 = \frac{1000 \cdot 60}{2\pi \cdot 9,81}$ ist.



Darstellung im Diagramm.

Entzerrte Darstellung.

Abb. 125. Ermittlung der Drehzahlkennlinie $n = f(I)$ mittels der Leerlaufkennlinie und der „J-Strecke“. Beispiel eines stark kompondierten Motors unter Einschluss des Generatorbereiches. Konstruktion: Auf Nulllinie die gesamte Leerlauferregung AW_0 abtragen. Auf der Senkrechten U_0 abmessen. Durch P_0 die Leerlaufkennlinie mit Drehzahl $n_0 = 100\%$ darstellen. (Bei Motoren ohne Leerlauferregung, also bei Reihenschlußmaschinen, ist U_0 auf der Ordinaten im 0-Punkt abzutragen und eine beliebige Leerlaufkennlinie darzustellen.) An P_0 „J-Strecke“ ansetzen, deren senkrechte Abstände von der Leerlaufkennlinie die Drehzahländerungen Δn ergeben. In dem eingezeichneten Koordinatensystem stellt die Leerlaufkennlinie die Werte $n = n_0 = \text{konst.}$ dar, während die „J-Strecke“ die gesuchte Drehzahlkennlinie wiedergibt. Der 0-Punkt des Systems liegt senkrecht unter P_0 auf der Nulllinie des Diagramms. Der Maßstab für n ist veränderlich, und zwar stellt die jeweilige Ordinate der ursprünglich wiedergegebenen Leerlaufkennlinie die Drehzahl $n_0 = 100\%$ dar.

Häufig ist es aber erwünscht, das von der Maschine erzeugte Motor- oder Generatormoment nur aus dem Erreger- und dem Ankerstrom zu bestimmen; es unterscheidet sich vom Moment an der Welle nur durch das Verlustmoment zur Deckung der Reibungs- und der Eisenverluste. Dieses beträgt meistens nur wenige Prozent des Nennmomentes und kann diesem gegenüber oft vernachlässigt werden, mag aber in bestimmten Fällen seine Berücksichtigung finden. Nachstehend werde nur das innere Moment bestimmt. Man berechnet es zu :

$$Md_i = \frac{E \cdot I}{1000} \cdot \frac{973}{n},$$

$$= \left(\frac{E}{n}\right) \cdot \frac{I}{1,03},$$

wobei E die zur bekannten Erregung und Ankerrückwirkung gehörende EMK bei Drehzahl n ist.

Man bestimmt also zum Ankerstrom I und zu den Erreger- AW die EMK und berechnet das Moment. Schwierig wird dies bei sehr kleinen Drehzahlen, also insbesondere in jenen Fällen, wo die Maschine bei voller

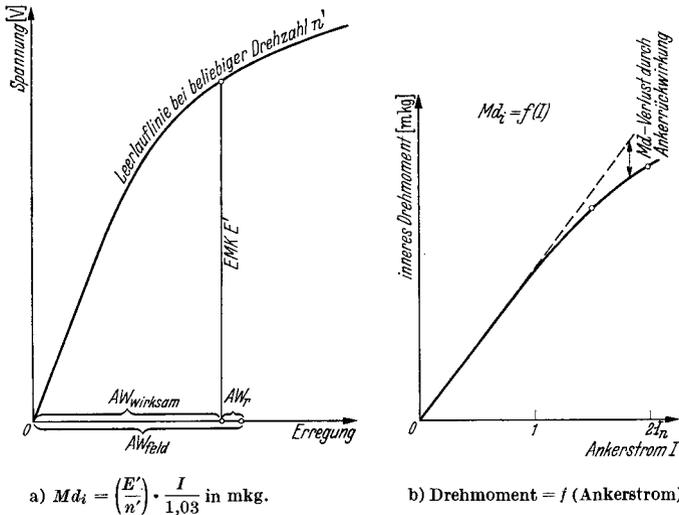


Abb. 126. Bestimmung des inneren Drehmomentes der Gleichstrommaschine mittels einer für beliebige Drehzahl n' gezeichneten Leerlaufkennlinie und der sich aus der tatsächlichen Erregung AW_{feld} und der Ankerrückwirkung AW_r ergebenden wirksamen Erregung AW_{wirksam} (a). Daneben Darstellung der Linie $Md_i = f(I)$ bei $i = \text{konst.}$ (b).

Erregung durch Spannungsregelung weitgehend herunter geregelt wird. Im Stillstand versagt die Formel vollends, da der Quotient $0 : 0$ zu bilden ist. Man macht dann folgenden Kunstgriff. Man bestimmt die EMK nicht für die wahre, also mitunter sehr kleine oder ganz verschwindende Drehzahl, sondern für volle Drehzahl. Abb. 126a erläutert dies. Diese EMK soll E' heißen, die entsprechende Drehzahl n' . Dann ändert man die gegebene Formel ab in:

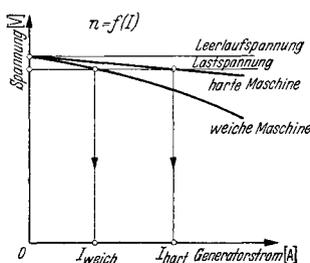
$$Md_i = \frac{E' \cdot I}{1000} \cdot \frac{973}{n} \cdot \frac{n}{n'} = \left(\frac{E'}{n'}\right) \cdot \frac{I}{1,03} \text{ in mkg.}$$

Man rechnet also überhaupt nicht mehr mit der wahren Drehzahl n , sondern mit der willkürlichen Drehzahl n' , setzt aber auch die höhere EMK E' statt der wahren EMK E ein. Von Interesse ist oft der Verlauf des Drehmomentes über dem Ankerstrom I . Für kleine und mittlere Ströme bis etwa zum doppelten Nennstrom verläuft diese Kennlinie als gerade Linie. Darüber hinaus zeigt sich bei Maschinen mit hohem

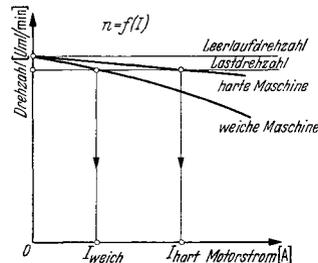
Strombelag, also starker Feldschwächung durch Ankerrückwirkung, ein Abbiegen der Kurve derart, daß zu weiter zunehmenden Ankerströmen nur noch wenig ansteigende Drehmomente gehören. In Abb. 126 b ist der Drehmomentverlauf eines normalen, fremderregten Nebenschlußmotors mit neutral stehenden Bürsten dargestellt. Die Ankerrückwirkung ist nach dem auf S. 194 angegebenen Verfahren aus der Leerlaufkennlinie ermittelt.

Das wahre Moment an der Welle erhält man durch Berücksichtigung der den Eisen- und Reibungsverlusten bei den betrachteten Drehzahlen entsprechenden Momenten, die bei Generatoren zuzufügen, bei Motoren abzusetzen sind.

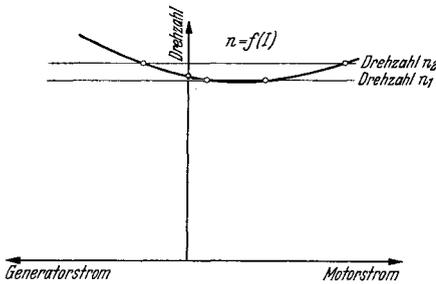
Parallellauf und Lastverteilung. Die Neigung der Kennlinie $U = f(I)$ bei den Generatoren und $n = f(I)$ bei den Motoren ist von ausschlag-



a) Parallellauf eines weichen und eines harten Generators. Letzterer übernimmt die größere Last.



b) Parallellauf eines weichen und eines harten Motors. Letzterer übernimmt die größere Last.



c) Parallellauf zweier gleichartiger Motoren mit unstabilem Ast der Kennlinie. Zu jeder Drehzahl gehören zwei verschiedene Ströme, von denen einer sogar generatorisch werden kann. (Rückarbeit!)

Abb. 127 a—c. Verteilung der Last bei parallel-laufenden Gleichstrommaschinen.

gebendem Einfluß auf die Fähigkeit der Gleichstrommaschine, stabil mit anderen Maschinen parallel zu arbeiten. Bei Generatoren ist unter $U = f(I)$ die tatsächliche, betriebsmäßige Kennlinie zu verstehen, die nicht nur vom Verhalten der Maschine selbst, sondern auch von der Drehzahlcharakteristik ihres Antriebes abhängt. Eine bei Last in der Drehzahl nachgebende Antriebsmaschine macht den Stromerzeuger in der Spannungs-kennlinie weich.

Generatoren oder Motoren können im allgemeinen nur dann parallel arbeiten, wenn ihre Kennlinien fallend verlaufen. Die Verteilung der gemeinsamen Last geschieht, wie in Abb. 127 a, b gezeigt wird, nach Maßgabe der Härte der Maschinen. Die härtere der beiden Maschinen, deren Kennlinie also die schwächere Neigung besitzt, übernimmt den größeren Anteil; die weichere Maschine wird nur schwach belastet. Gleiche — auf die Nennleitung der einzelnen Maschine bezogene — Leistung wird nur

dann übernommen, wenn die prozentualen Kennlinien übereinstimmen, d. h. wenn bei gleicher prozentualer Last der Abfall der Spannung oder der Drehzahl derselbe ist. Wenn ein einzelner Generator auf ein großes Netz arbeitet, so kann dieses als ein zweiter Generator mit starrer Spannungskennlinie betrachtet werden. Die Maschine wird sich daher, wenn sie im Leerlauf auf das Netz geschaltet wurde, überhaupt nicht an der Speisung neu hinzutretender Verbraucher beteiligen. Dies tut sie erst, wenn ihre Spannungskennlinie durch Erhöhen des Erregerstromes parallel nach oben verschoben wurde. Der Grad der Verlagerung entspricht dem Grad der Belastung. Motoren, welche auf einen Verbraucher mechanischer Arbeit belastet werden, dessen Drehzahl konstant ist, verhalten sich, als ob sie mechanisch parallel mit einer unendlich großen Maschine liefen. Dieser Fall ist beim Antrieb von Synchrongeneratoren gegeben. Der Gleichstrommotor wird erst dann zum Antrieb herangezogen, wenn seine Drehzahlkennlinie nach oben verlagert wird, indem man seine Erregung schwächt. Dem Grad der Verschiebung entspricht der Grad der übernommenen motorischen Leistung.

Bei Maschinen mit einer erst fallenden und dann ansteigenden Kennlinie, wie diese vor allen Dingen bei Motoren beobachtet werden kann, ist eine eindeutige Lastverteilung nicht mehr zu erwarten. Abb. 127 c zeigt, daß zwei Motoren mit völlig gleicher Kennlinie sich doch, wenn sie durch Kupplung auf gleiche Drehzahl gebracht werden, verschieden stark belasten können. Bei einer solchen Kennlinie besteht sogar die große Gefahr, daß die eine Maschine zum Generator, die zweite zum Motor werden kann, so daß sich beide mit starken Strömen in Rückarbeit aufeinander belasten. Diese Neigung besteht mitunter bei durch Feldschwächung geregelten Motoren für Umkehrbetrieb, bei denen eine natürliche Veranlagung zur Unstabilität besteht und die Bürsten nicht vorgeschoben werden dürfen, da sie in der anderen Drehrichtung dann zurückgeschoben wären. Hier hilft dann oft eine Schwächung des Wendefeldes.

Doppelschlußgeneratoren mit durch Hauptstromwicklung bewirkter steigender Spannungskennlinie können nicht ohne weiteres parallel auf ein gemeinsames Netz arbeiten. (Allein können sie auf ein vorhandenes Netz, das von großen Maschinen gebildet wird, überhaupt nicht arbeiten, da sie sich immer überlasten würden.) Sie müssen durch eine Ausgleichsleitung untereinander parallel geschaltet werden. Diese wirkt aber nur dann, wenn die Maschinen bis zum Punkt, wo die Ausgleichsleitung ansetzt, an sich fallende Kennlinien haben. Diese sind notfalls durch Bürstenvorschub zu erzwingen. Dasselbe gilt für Motoren mit einer Gegenstromwicklung auf den Polen, die einen gewissen Drehzahlanstieg bei Last bewirken soll. Auch diese können durch eine Ausgleichsleitung zur einwandfreien Parallelarbeit gebracht werden, wenn ihre Kennlinie ohne die Gegenstromwicklung fallend ist. Sehr sicher wird der Parallellauf, wenn man zwischen Anker und Beginn der Gegenstromwicklung eine schwächere Hauptstromwicklung einschaltet. Diese verleiht den beiden Motoren eine sicher abfallende „innere“ Kennlinie, die den Parallellauf ermöglicht, während nach außen hin durch die lastabhängige

Verlagerung der Kennlinie die steigende, wirkliche Charakteristik wirksam wird. Bedeutung haben diese Überlegungen bei den auf S. 244 geschilderten parallellaufenden Ausgleichsaggregaten, wo kompondierte Generatoren und gegenkompondierte Motoren starr zusammenlaufen müssen.

Die Stromwendung. Unter Kommutierung oder Stromwendung versteht man den eigentlichen Vorgang der Stromwendung in der durch die Bürste kurzgeschlossenen Spule und auch alle Begleiterscheinungen, also insbesondere die Funkenbildung zwischen Kohle und Stromwender. Der Zweigstrom in der Ankerspule beträgt, bevor sie die Bürste erreicht, $+I_z$, und nachdem sie die Bürste verlassen hat, $-I_z$, wobei $I_z = I/2a$ ist. In der Kommutierungszeit T_k , die zwischen Erreichen und Verlassen der Bürste verfließt, führt die kommutierende Spule den Kurzschlußstrom i_k , der sich also zwischen $+I_z$ und $-I_z$ verändern muß. Wenn im wesentlichen nur der Übergangswiderstand zwischen Bürste und Stromwender den Vorgang beeinflussen würde, wie es etwa bei außerordentlich langsamem Lauf der Maschine zutrifft, so würde der zeitliche Verlauf des Kurzschlußstromes i_k praktisch geradlinig sein. Die Abnahme des Stromes, also seine Änderung, wäre dann konstant. In Wirklichkeit ist aber die Stromänderung vom Auftreten einer induktiven Spannung e_r begleitet, welche ihrem Charakter entsprechend die Änderung zu verzögern sucht. Sie heißt die Reaktanzspannung. Bezeichnet man mit L_s die resultierende Streuinduktivität der gesamten während der Stromwendung sich gegenseitig beeinflussenden Ankerleiter, so beträgt die induktive Spannung:

$$e_r = -L_s \frac{di_k}{dt},$$

worin das (—)-Zeichen auf die die Stromwendung hemmende Wirkung der Reaktanzspannung hinweist. Die an sich erstrebte, mit der Zeit geradlinig verlaufende Stromwendung nach Abb. 128c wird so beeinflusst, daß der Kurzschlußstrom i_k erst nur langsam abnimmt, gegen Ende der Kurzschlußzeit dagegen beschleunigt dem Endwert $-I_z$ zustrebt. Die Folge hiervon ist eine ungünstige Verteilung des Stromes auf den Bürstenquerschnitt, die sich in geringer Stromdichte unter der auflaufenden und in erhöhter Stromdichte unter der ablaufenden Bürstenkante äußert. Nun bedeutet aber gerade die erhöhte Belastung der Ablaufkante eine besonders schwere Bedingung für einwandfreie Kommutierung. Man versucht daher durch eine von einem äußeren Magnetfeld durch Drehung innerhalb der kommutierenden Spule induzierte Spannung e_w möglichst die schädliche Reaktanzspannung e_r aufzuheben. Diese Spannung erhält sogar vorteilhafterweise einen etwas höheren Wert als die Reaktanzspannung e_r , damit die Stromwendung nach Abb. 128d zu Beginn etwas beschleunigt verläuft. Man erhält auf diese Weise eine Entlastung der Ablaufkante. Der Betrag der Reaktanzspannung e_r ist zeitlich nicht konstant, stimmt aber um so besser mit seinem zeitlichen Mittelwert überein, je geradliniger der Verlauf von i_k ist. Dieser Mittelwert kann angegeben werden, da er, wenn man einen konstanten Wert der Streuinduktivität L_s voraussetzt, nur von der Gesamtänderung des Stromes i_k in der Kurzschlußzeit T_k abhängt. Die Gesamt-

stromänderung ist aber nach obigem $+I_z - (-)I_z = 2I_z$. Der Absolutwert der mittleren Reaktanzspannung ist daher:

$$\text{Mittlere Reaktanzspannung } e_r = L_s \cdot \frac{2I_z}{T_k}.$$

Sie beträgt einige Volt. Durch einige Umformungen gelangt man zu der praktisch wichtigen PICHELMAYERSchen Formel¹:

$$e_r = H \cdot 2 \cdot l_e \cdot w_s \cdot v_a \cdot AS \cdot 10^{-6},$$

worin bedeuten: H die HOBARTSche Streuziffer, die die Streuleitwerte berücksichtigt, l_e die reine Eisenlänge in cm, w_s die Windungszahl je Segment, v_a die Ankerumfangsgeschwindigkeit in m/sec und AS den Strombelag in A/cm. H liegt in weiten Bereichen der Leistung und der Drehzahl zwischen 4 und 8 und kann, wie nachstehend erläutert, bei der normalen Prüfung bestimmt werden.

Das äußere Feld, welches in der kurzgeschlossenen Spule die Wendespannung e_w induziert, heißt das *Wendefeld* der Maschine. Es wird vom Wendepol aufgebracht. Die Größe der Wendespannung berechnet sich zu:

$$\text{Wendespannung } e_w = 2 \cdot l_e \cdot w_s \cdot v_a \cdot B_w \cdot 10^{-6},$$

wobei B_w die Kraftliniendichte unter dem Wendepol ist.

Damit die beiden Spannungen e_r und e_w einander aufheben, muß unabhängig von der jeweiligen Ankereschwindigkeit die grundlegende Beziehung gelten:

$$B_w = H \cdot AS,$$

wie ohne weiteres aus beiden vorher genannten Formeln hervorgeht. Die Kraftliniendichte des Wendefeldes steht also über die HOBARTSche Streuziffer H in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Strombelag des Ankers, ist aber von allen anderen Größen unabhängig. Hieraus folgt, daß die Erregung des Wendefeldes bei steigender Last im gleichen Maße wie der Ankerstrom selbst erhöht werden muß. Dies geschieht bei den *Maschinen mit Wendepolen* automatisch durch Speisung ihrer Erregerwicklungen mit dem Ankerstrom selbst. Die erforderliche Windungszahl der Wendepolwicklung ergibt sich aus folgender Überlegung: Zuerst muß sie mindestens so groß sein wie die auf einen Pol bezogene wirksame Windungszahl des Ankers w_a , damit das Ankerfeld gelöscht wird und keine Spannung in der kurzgeschlossenen Ankerspule induziert. Zweitens muß sie so viel zusätzliche Windungen erhalten, daß durch deren Wirkung die benötigte Kraftliniendichte B_w unter dem Wendepol erzeugt wird. Man bezeichnet das Verhältnis der Wendepolwindungszahl zur wirksamen Ankerwindungszahl je Pol mit relativer Kompensation k . Sie beträgt meistens zwischen 1,2 und 1,35, kann aber in Sonderfällen bis 1,8 ansteigen. k steht in einem Zusammenhang mit der HOBARTSchen Streuziffer H , der Polpaarzahl p , dem Wendepolluftspalt δ_w und dem Maschinendurchmesser D durch die Beziehung:

$$k = \frac{\text{Wendepol-Windungszahl}}{\text{Wirksame Ankerwindungszahl je Pol}} = 1 + \frac{H \cdot \delta_w \cdot p}{D}.$$

¹ RZIHA u. SEIDENER: Starkstromtechnik. 7. Auflage.

Aus dieser Gleichung läßt sich H bei einer einwandfrei kommutierenden Maschine ermitteln zu:

$$H = (k - 1) \cdot \frac{D}{\delta_w \cdot p}.$$

In die Wendepolwindungszahl ist die Windungszahl einer etwa vorhandenen Kompensationswicklung einzurechnen. Die wirksame Ankerwindungszahl w_a je Pol ist gleich:

$$z : (2 \cdot 2a \cdot 2p).$$

Da die Wendefelder dem Ankerfeld entgegenwirken müssen, ergibt sich Polfolge der Maschinen zu:

————— Ankerdrehrichtung —————→

Nordhauptpol-Südwendepol-Südhauptpol-Nordwendepol	(Generator)
Nordhauptpol-Nordwendepol-Südhauptpol-Südwendepol	(Motor)

Bei den heute nur noch für kleinste Leistungen gebauten *wendepollosen Maschinen* steht als Wendefeld nur das aus Haupt- und Ankerfeld gebildete Gesamtfeld der Maschine zur Verfügung. Es besitzt natürlich keinen proportionalen Zusammenhang mit dem jeweiligen Ankerstrom, und die Bürsten müssen, um in das Gebiet der erforderlichen Kraftliniendichte zu kommen, aus der neutralen Stellung verschoben werden. Bei Motoren erfolgt die Verschiebung mit steigender Last in zunehmendem Maße entgegen der Drehrichtung des Ankers, bei Generatoren dagegen in Drehrichtung.

Der Verlauf des Kurzschlußstromes i_k in der kurzgeschlossenen Spule läßt sich experimentell nur sehr schwer, und zwar durch oszillographische Aufnahme des Spannungsabfalles an einem Ankerleiter, unmittelbar ermitteln. Die Fehler durch unvollkommene Meßstromabnahme über die hierbei benötigten Schleifringe können bedeutend sein. Indirekt kann man auf den Stromverlauf durch Messung der sog. *Bürstenspannungskurve* schließen oder zumindest seinen Charakter qualitativ beurteilen. Wie oben erwähnt, besitzt die Bürste bei verzögerter Stromwendung, die als Unterkommutierung bezeichnet wird, eine nach der Ablaufkante zu ansteigende Stromdichte. Der der Stromdichte entsprechende Spannungsabfall zwischen Bürste und Stromwender muß also ebenfalls nach der Ablaufkante zu ansteigen (Abb. 128 b).

Die linear verlaufende Stromwendung hat eine gleichmäßige Verteilung des Bürstenstromes zur Folge. Der Bürstenabfall längs der Kohle ist daher konstant (Abb. 128 c).

Bei beschleunigter Kommutierung, die man Überkommutierung nennt, ist die Stromdichte an der Auflaufkante am größten. Dort ist daher auch der Spannungsabfall am höchsten, der nach der Ablaufkante zu abnimmt (Abb. 128 d).

In Fällen sehr starker Unterkommutierung überschreitet der Kurzschlußstrom i_k zu Beginn des Kurzschlusses sogar den Wert des Zweigstromes $+I_z$. Dies bewirkt eine Umkehr des Stromes in der Auflaufkante der Bürste und eine wesentlich verstärkte Dichte des Stromes an der Ablaufkante. Das Gegenstück hierzu liefert eine Maschine mit über-

mäßig starken Wendepolen. Der Kurzschlußstrom i_k fällt gleich zu Anfang sehr jäh ab, schießt über den zu erreichenden Endwert $-I_z$ hinaus und muß daher zu Ende der Stromwendung nochmals abnehmen. Dies hat sehr hohe Stromdichte an der auflaufenden Bürste und umgekehrte Stromrichtung in der ablaufenden Bürste zur Folge. Der Spannungsabfall hat infolgedessen im ersten Fall an der Auflaufkante, im zweiten Fall an der Ablaufkante falsche Polarität.

Als Bürstenspannungskurve bezeichnet man jene Kurve, die die räumliche Verteilung des Spannungsabfalles Bürste : Stromwender längs der Breite der Bürste in Drehrichtung wiedergibt. Sie wird bei der elektrischen Untersuchung der Stromwendung aufgenommen und erlaubt auf die Stromdichte in der Bürste und somit rückwärts auf die Kurve

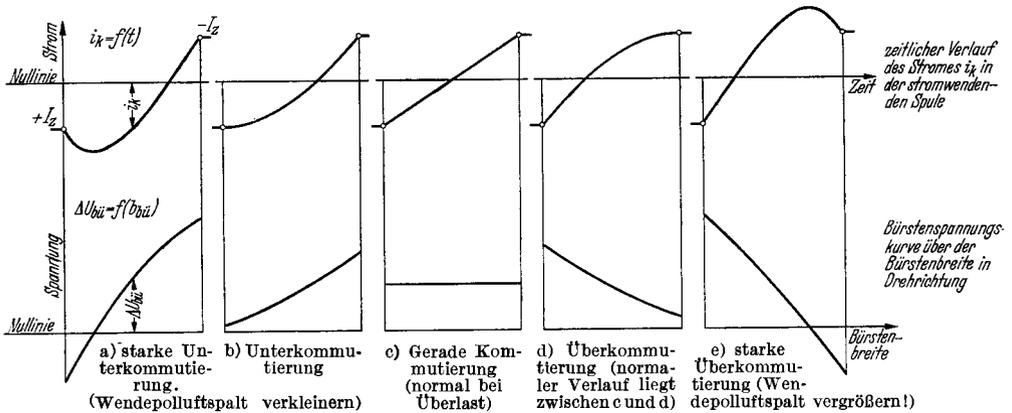


Abb. 128. Verlauf des Stromes i_k in der stromwendenden Spule über der Zeit und der Bürstenspannung über der Bürstenbreite in Drehrichtung gemessen.

des Kurzschlußstromes i_k zu schließen. Wegen der Veränderlichkeit des Übergangswiderstandes zwischen Kohle und Kommutator besteht kein einfacher Zusammenhang zwischen Spannungsabfall und Stromdichte nach Art des Ohmschen Gesetzes. Aber zum steigenden Abfall gehört eine ebenfalls ansteigende Stromdichte und zum Spannungsabfall Null auch die Dichte Null. Hohe, geringe und umgekehrtgerichtete Stromdichten, sowie die Zone einer etwaigen Stromlosigkeit können daher mit Sicherheit erkannt werden. In einer gewissen Annäherung an die tatsächlichen, recht verwickelten Stromwenderverhältnisse kann gesagt werden, daß sich i_k als Funktion der Zeit ergibt, wenn man die Bürstenspannungskurve integriert und auf der Abszisse statt der Bürstenbreite die Kurzschlußzeit T_k einträgt. Umgekehrt gewinnt man die Spannungskurve der Bürste durch Differentiation der i_k -Kurve über der Zeit, wobei man statt T_k die Bürstenbreite einführt. Die Abb. 128a—c enthalten in einer anschaulichen Zusammenstellung die typischen Kurven für die drei erwähnten Fälle der Unter-, der geradlinigen und der Überkommutierung, sowie ergänzend die für die beiden Sonderfälle extremer Über- und extremer Unterkommutierung. Man beachte stets, daß die

Kurven in Drehrichtung des Stromwenders aufzutragen und zu messen sind. Man trägt sie immer so auf, daß der Mittelwert, der sich aus den Einzelmessungen ergibt, nach oben zu liegen kommt. Zeigt sich insbesondere, daß der Abfall der Auflauf- und der Ablaufkante verschiedenes Vorzeichen haben, so ist als positiv der absolut größere der beiden Abfälle zu betrachten (vgl. auch Abb. 129).

Die praktische Untersuchung der Stromwendung. Die Stromwendung der Gleichstrommaschine wird bei Nennzahl und bei Nennstrom untersucht. Außerdem wird sie oft bei Überstrom beobachtet. Bei kleineren und mittleren Maschinen wird die Prüfung bei Nennspannung vorgenommen. Bei größeren Maschinen, wo die Prüffeldeinrichtungen leistungsmäßig nicht immer ausreichen, führt man die Versuche im Kurzschluß durch. Insbesondere können die verlangten Spitzenströme bei Walzwerks- und Fördermaschinen nur selten unter den normalen Bedingungen gefahren werden. Die Kurzschlußuntersuchung ist bei Maschinen mit Wendepolen der Prüfung bei voller Spannung gleichwertig. Die Drehzahl muß natürlich gleich der Nennzahl sein.

Der Augenschein belehrt unmittelbar, ob einwandfreie oder zu beanstandende Stromwendung vorliegt. Wenn weder an der auflaufenden noch an der ablaufenden Kante irgendwelche Funken zu beobachten sind, so kommutiert die Maschine gut. Treten nur bei der Überstromprobe kleine Funken auf, die keinerlei dauernde Schädigung des Stromwenders hervorrufen können, so ist auch im Bereich der Überlast die Kommutierung einwandfrei.

Zeigen sich dagegen bei Nennstrom und bei Überstrom dauernd Funken, insbesondere solche von knallendem Geräusch, so müssen geeignete Gegenmaßnahmen getroffen werden. Die Ursachen können rein mechanischer und rein elektrischer Natur sein. Zu ersteren gehören unrunder Kommutator, schlechte Bürstenhalter mit zu lockerem oder zu strammem Sitz der Kohle, zu hoher oder zu kleiner Bürstendruck, ungleiche Bürstenteilung, schlecht eingelaufene oder überhaupt ungeeignete Kohlen, vorstehender Glimmer zwischen den Segmenten und nicht zuletzt ungleiche Lötstellen der Ausgleichverbindungen. Zu den elektrischen Ursachen rechnet vor allem falscher Wickelsinn der Wendepolspulen oder ein zu starkes oder ein zu schwaches Wendefeld.

Die mechanische Untersuchung der Stromwendung. Die Feststellung der wahren Ursache schlechter Kommutierung gehört zu den zeitraubenden Prüfungen an der Gleichstrommaschine. Zuerst sind, besonders wenn bereits gute Erfahrungen mit einer Maschine gleicher Type vorliegen, die groben mechanischen Gründe zu untersuchen und abzustellen. Da ungleiche Bürstenteilung starke Störungen verursacht, ist sie am ersten nachzuprüfen. Dies geschieht mit einem Streifen schmalen Papiers, das um den ganzen Kommutator unter den Bürsten liegend herumgeführt wird. Mit einem scharf zugespitzten Bleistift wird eine der Bürstenkanten jeder Spindel angezeichnet und der Abstand der einzelnen Striche nach Herausnahme des Streifens nachgemessen. Unterschiede von mehr als 1 mm in der Bürstenteilung gelten bereits nicht mehr als zulässig und sind zu beseitigen.

Die weitere Untersuchung gilt dem Sitz der Kohle im Halter, wobei das Spiel zwischen beiden nicht größer oder kleiner als 0,2 bis 0,4 mm sein soll. Durch starke Wärmeentwicklung infolge schlechter Kommutierung kann die Kohle quellen und sich bei zu kleinem Spiel festsetzen. Hierdurch wird die Stromwendung weiter verschlechtert.

Der vorgeschriebene Druck, mit dem die Kohle auf dem Kommutator aufsitzt und der etwa 150 bis 250 g/cm² betragen muß, kann grob mit der Hand und genau mit einer kleinen Federwaage, mit deren Haken man die Kohle soeben zum Abheben bringt, nachgeprüft und daraufhin berichtigt werden. Dies ist bei vielen Haltern mit einstellbarer Feder besonders leicht möglich. Ebenfalls ist der Lauffläche der Kohle Aufmerksamkeit zu schenken, für deren einwandfreie Beschaffenheit notfalls durch besonderes Einschleifen Sorge zu tragen ist. Auch längeres Einlaufenlassen mit geringer Stromstärke führt zum Ziel. Die Bürstenbolzen müssen stabil gebaut sein und sind gegen Schwingungen evtl. durch Verbinden der freien Enden mittels kreisringsförmiger Scheiben aus Isolierstoff zu schützen. Schiefstehende Bolzen erkennt man am schiefen Schnitt der Kommutatorsegmentkante und der Bürstenkante; sie sind genau geradezurichten.

Die Kommutatoroberfläche darf nicht rauh sein. Aufräuhung derselben verbessert zwar augenblicklich die Kommutierung, jedoch tritt das Übel später verstärkt auf. Am besten wird der Kommutator vor der Prüfung gut geschliffen. Der unrunde Kommutator verursacht durch schlechten Lauf der Kohlen besondere Schwierigkeiten. Beobachten der Kohlen und Berühren derselben mit einem kleinen Stäbchen aus Isolierstoff zeigt an, ob sie vibrieren. Das Maß der Unrundung wird durch eine an den Stromwender herangeführte Meßuhr mit $\frac{1}{100}$ mm Skalenteilen an mehreren Stellen nachgemessen. Bei merklichen Abweichungen wird der Kommutator erneut überdreht, wobei zu beachten ist, daß die Zentrierung an beiden Wellenenden nicht immer mit der Lage der Laufachse in den Lagerstellen übereinstimmt. Es ist allerdings oft nicht möglich, die Abdehning in den eigenen Lagern vorzunehmen.

Auch vorstehende Glimmerreste, die nur bei genauem Zusehen zu erkennen sind, beeinträchtigen stark den ruhigen Lauf der Bürsten. Der Glimmer ist $\frac{1}{2}$ bis 1 mm tief auszukratzen und die Segmentkante sanft zu brechen.

Der Kommutator kann in kaltem Zustand rund sein und sich erst bei Erwärmung werfen. Er wird zwar schon bei der sorgfältigen Herstellung mehrmals erwärmt und nachgespannt, muß allerdings gegebenenfalls dieser Behandlung noch einmal, besonders wenn nach längerer Betriebszeit Anstände auftreten, unterzogen werden.

Schmierung des Stromwenders führt auf die Dauer nur selten zum einwandfreien Arbeiten. Nur bis sich die erste gute Politur bläulicher Färbung einstellt, kann gelegentlich etwas Paraffin zur Fettung in kleinen Mengen über den warmen Kommutator gestrichen werden. Metallhaltige Pasten werden vermieden.

Sehr schwer sind ungleiche Lötstellen oder sonstige Fehler in den Ausgleichverbindungen oder in den Verbindungsfahnen zwischen Wicklung

und Stromwender als Ursache schlechter Stromwendung zu erkennen. Dagegen zeichnen sich Unterbrechungen in der Ankerwicklung selbst schnell durch starke Schwärzung der betreffenden Segmente ab. Die Unsymmetrie der Ausgleichsringwiderstände kann manchmal an der leichten Dunkelfärbung von einzelnen Segmenten in regelmäßigem Abstand auf dem Kommutatorumfang festgestellt werden. Durch sorgfältiges Kontrollieren aller Lötverbindungen und Nachlöten derselben wird Abhilfe geschaffen.

Die Wahl der geeigneten Bürstensorten ist ausschließlich Sache der Erfahrung. Oft müssen die Vorteile besserer Kommutierung gegen die Nachteile des erhöhten Verschleißes der Bürsten oder des Kommutators sowie der größeren Erwärmung desselben abgewogen werden. Normalerweise wird sich aber immer die geeignete Sorte finden lassen, die auch auf die Dauer einen einwandfreien Betrieb der sonst fehlerfreien Gleichstrommaschine gewährleistet.

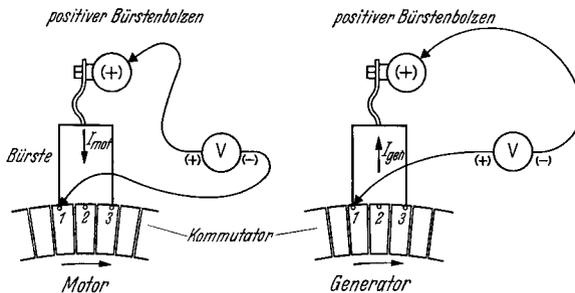


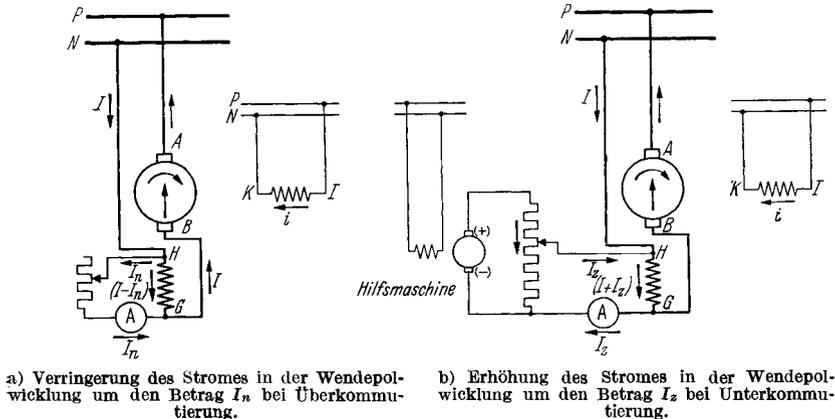
Abb. 129. Messung der Bürstenspannungskurve. (Beim Motor sind gleichpolige Bolzen und Geräteklemmen, beim Generator ungleichpolige miteinander zu verbinden. Meßpunkte stets in Drehrichtung aufnehmen.)

Es versteht sich von selbst, daß der mit Kohlenstaub verschmutzte Stromwender unter erschwerten Bedingungen zu arbeiten hat. Durch leichtes Abwischen während des Laufes in axialer Richtung weg von der Wicklung wird der trockene Staub, der besonders durch Abschmirgeln des Kommutators und nach dem Einlaufen der Kohlen erzeugt wird, aus den Ritzen zu entfernen sein.

Die elektrische Untersuchung der Stromwendung. Die mechanischen Ursachen schlechter Kommutierung werden am besten vor der elektrischen Untersuchung ausgemerzt, da auch bei günstigster Einstellung des Wendepollluftspaltes dennoch Anstände beobachtet werden können.

Die elektrische Untersuchung besteht zuerst in der *Messung der Bürstenspannungskurve*, die nach Abb. 129 vorzunehmen ist. Ein Drehspulgerät für etwa 3 V beidseitigen Ausschlag wird mit der einen Klemme an die Bürstenspindel und mit der anderen Klemme über eine Hilfsbürste oder meist über eine Kupferspitze längs der Kohle an den Stromwender geführt. Man hält die Spitze zuerst dicht an die auflaufende Kante, dann an die Mitte der Kohle und zuletzt an die ablaufende

Kante, ohne allerdings die Kohle selbst zu berühren. Am Spannungsmesser werden die drei Spannungen abgelesen, aus deren Größe auch ohne Aufzeichnung der Verlauf der Potentialkurve beurteilt werden kann. Haben alle drei Spannungen gleiches Vorzeichen und fallen sie nicht allzu stark nach der ablaufenden Kante (in Drehrichtung also) ab, so liegt etwas Überkommutierung vor. Diese ist bei Vollast erwünscht, da dann bei Überlast infolge der einsetzenden Sättigung des Wendepoles gerade Kommutierung zu erwarten ist. Fallen die Spannungen stark ab und ist insbesondere der letzte Betrag negativ, so ist die Maschine stark unterkompensiert. Der Wendepolluftspalt ist zu klein. Verläuft die Potentialkurve steigend, so liegt Unterkommutierung vor und der Wendepolluftspalt muß verkleinert werden. Abb. 128 a—e



a) Verringerung des Stromes in der Wendepolwicklung um den Betrag I_n bei Überkommutierung. b) Erhöhung des Stromes in der Wendepolwicklung um den Betrag I_z bei Unterkommutierung.

Abb. 130. Verringerung und Erhöhung des Stromes in der Wendepolrichtung bei der Untersuchung der Stromwendung.

zeigten bereits den typischen Verlauf dieser Kurven und die zu ergreifenden Gegenmaßnahmen an.

Die *Änderung des Luftspaltes* wird gelegentlich nach Schätzung, besser aber auf Grund einer weiteren Messung vorgenommen. Bei Maschinen mit Überkommutierung wird nach Abb. 130 a durch Parallelschalten eines geeigneten, niedrigohmigen Widerstandes ein Teil des Ankerstromes von der Wendepolwicklung abgezweigt. Der Zweigstrom I_n kann praktisch 1 bis 10% des Ankerstromes betragen, d. h. der Nebenwiderstand ist für den 10- bis 100fachen Eigenwiderstand der Hilfswicklung zu bemessen. Durch systematisches Versuchen wird der Betrag des Abzweigstromes bestimmt, bei dem die Funken und auch praktisch jedes Perlflecken unter den Bürsten verschwindet. Man ermittelt den Geringstwert dieses Stromes, bei dem soeben bessere Kommutierung einsetzt, und den Höchstwert, bei dem sie wieder verschwindet. Der Mittelwert wird bei der Bestimmung des neuen Wendepolluftspaltes zugrunde gelegt.

Die Größe der Luftspaltänderung ergibt sich aus der Überlegung, daß sich die während des Versuches wirksamen Wendepol- AW zum

vorhandenen Luftspalt verhalten müssen wie die ohne Nebenwiderstand vorhandenen AW zum neuen Luftspalt. Es gilt daher:

$$\begin{array}{ccc} \text{vor der Änderung:} & & \text{nach der Änderung:} \\ \frac{(I - I_n) \cdot w_w - I \cdot w_a}{\delta_{\text{vorh}}} & = & \frac{I \cdot (w_w - w_a)}{\delta_{\text{neu}}} \end{array}$$

Hieraus ergibt sich die endgültige Berechnung zu:

$$\delta_{\text{neu}} = \delta_{\text{vorh}} \frac{1}{1 - \frac{I_n}{I} \left(\frac{k}{k-1} \right)} \quad \text{mit} \quad k = \frac{w_w}{w_a} = \text{relative Kompensation.}$$

In guter Annäherung an praktische Fälle kann gesagt werden, daß je 1% abgezweigten Strom der Luftspalt um 4% vergrößert werden muß. Dies gilt genau für eine relative Kompensation von 1,33.

Wenn die Maschine unterkommutiert, muß man versuchsweise der Wendepolwicklung einen höheren als den Ankerstrom zuführen. Abb.130b gibt die vorzunehmende Schaltung wieder. Man belastet eine Hilfsdynamo, oder das Netz, auf einen Widerstand. Dann bestimmt man den Spannungsabfall und die Polarität der Wendepolwicklung. Am Widerstand greift man einen gleich großen Abfall ab und verbindet die Punkte gleicher Polarität miteinander. Ein eingeschalteter Strommesser zeigt zuerst keinen Strom, also den Zusatzstrom Null an. Dann verschiebt man den einen Abgriff am Widerstand im Sinne höheren Spannungsabfalles und führt so der Wendepolwicklung einen zusätzlichen Strom I_z zu. Diesen steigert man, bis gute Kommutierung einsetzt. Außerdem bestimmt man den höchsten Zusatzstrom, bei dem sie wieder schlecht wird. Den mittleren Wert legt man der Luftspaltänderung zugrunde. Es gelten die gleichen Überlegungen wie oben, nur ist an Stelle von I_n jetzt $-I_z$ einzuführen, so daß also der neue Luftspalt wird:

$$\delta_{\text{neu}} = \delta_{\text{vorh}} \frac{1}{1 + \frac{I_z}{I} \left(\frac{k}{k-1} \right)}$$

Der Luftspalt muß also verkleinert werden, und zwar im Mittel um 4% für je 1% zugeführten Strom. Bei der Versuchsvornahme ist darauf zu achten, daß durch die Verbindungen zwischen Maschine und Widerstand keine Teile der Netzspannung kurzgeschlossen werden. Man vermeidet dies durch die Benutzung einer eigenen Hilfsmaschine.

Bei großen Gleichstrommaschinen für besonders hohe Stromstärke und verhältnismäßig kleine Spannung läßt sich durch Veränderung des Wendefeldes gelegentlich noch nicht die erwünschte einwandfreie Stromwendung erreichen. Die Schwierigkeit kann unter Umständen in der geringen Überdeckung der Bürsten liegen. Aus mechanischen Gründen können diese nicht beliebig breit gewählt werden. Praktisch gilt als obere Grenze eine Breite in Umfangsrichtung von etwa 25 mm. Andererseits ist infolge der geringen Leiterzahl des Ankers die Teilung des Stromwenders grob und die Segmente erreichen eine Stärke bis zu 25 mm. Die Überdeckung der Bürste sinkt also in solchen Fällen auf 1,0. Da aber erfahrungsgemäß zur guten Stromwendung eine Bürstenüber-

deckung von 1,3 bis 1,8 Segmenten gehört, so muß eine wirksame Verbreiterung der Bürstenauflage durch Staffellung der Kohlen vorgenommen werden. Diese darf aber andererseits nicht so weit getrieben werden, daß die kommutierenden Leiter in den Bereich der Hauptpolkraftlinien geraten. Durch versuchsweise Änderung im Grad der Staffellung kann der beste Wert gefunden werden. Man beachte, daß jede Verbreiterung der Stromwendezone zu einer Verringerung der mittleren Reaktanzspannung führt und somit die Wendepole stärker wirksam werden läßt.

Auch zu große Bürstenüberdeckung bringt mitunter eine ungünstige Stromwendung mit sich, wenn nämlich hierdurch die Leiter der kurzgeschlossenen Spulen in das Hauptfeld geraten. Hier helfen schmalere Kohlen.

Ebenfalls hilft eine Bürstenverschmälerung, wenn die Wendepolschuhe zu schmal sind und die kommutierenden Leiter zwar nicht mehr im Hauptfeldbereich liegen, aber sich auch nicht vollständig innerhalb des Wendefeldes befinden.

Eine Überdeckung der Bürsten von einem genauen ganzzahligen Vielfachen, also z. B. von 2,0 oder 3,0 Segmenten, ist nachteilig, und zwar deshalb, weil die geringsten Fehler in der Bürstenteilung bewirken, daß eine Bürste zur selben Zeit eine andere Zahl Segmente bedeckt als die benachbarte. In diesen Fällen wird mit der Bestückung der Maschine mit der nächstbreiteren oder schmälere Sorte oft eine wesentliche Verbesserung erreicht. Der gute Sitz der schmalen Kohlen im zu weiten Halter wird durch Füllstücke gewährleistet.

Zur Verbesserung des mechanischen Laufes der Kohlen greift man gelegentlich zur nachträglichen Schrägstellung der Halter. Man beachte hierbei die daraus resultierende Verbreiterung der Auflagefläche, die bei 15° Schrägung etwa 4% und bei 30° Schrägung rund 15% ausmacht.

Eine seltene, aber recht nachteilige Fehlerquelle besteht in der Verwendung magnetischer Kernbandagen auf dem Anker statt solcher aus unmagnetischem Werkstoff. Dies hat eine wesentliche Vergrößerung der Reaktanzspannung zur Folge, die außerdem wegen der sich zeigenden Sättigungserscheinungen nicht mehr proportional dem Strom ist. Die Kontrolle des verwendeten Werkstoffes kann mit einem kleinen Dauermagneten erfolgen. Magnetische Wickelkopfbandagen haben an sich keine nachteiligen Folgen auf die Stromwendung. Sie bedingen, genau wie Wickelkopfräger aus Eisen, ein stärkeres Wendefeld.

Bei Maschinen mit Doppelkommutatoren, die zu je einer Ankerwicklung geführt sind, erzielt man verbesserte Stromwendung unter Umständen durch eine kleine gegenseitige Versetzung der beiden Joche. Auf diese Weise vermeidet man, daß die Spulen der gleichen Nut zur gleichen Zeit den Strom wenden müssen. Man verschlechtert aber unter Umständen die gleichmäßige Stromverteilung auf die beiden Ankerwickelungen, wenn dieselben parallel geschaltet sind.

Der Austausch weicher Kohlen gegen harte oder die Verwendung graphithaltiger Sorten statt normaler Qualitäten kann in manchen Fällen die Stromwendung recht günstig beeinflussen, doch kann hier nur der Versuch und vor allem die Erfahrung entscheiden.

Der Leerlaufversuch. Nach der Messung des Anker- und des Feldwiderstandes erfolgt die Aufnahme der *Sättigungslinie* $E_0 = f(i)$ bei Nenndrehzahl der Maschine. Man treibt die Probemaschine an und erregt sie fremd. Dies gilt insbesondere auch bei Hauptstrommaschinen und solchen mit mehreren Erregerwicklungen. Wegen des verhältnismäßig geringen Einflusses der Polstreuung ist es ohne Belang, welche der vorhandenen Feldwicklungen benutzt wird. Man wählt zweckmäßigerweise eine der dünnadrätigen Wicklungen. Der Erregerstrom wird von Null ausgehend stetig gesteigert und bis auf den durch Erregerennspannung und kalten Erregerwiderstand gegebenen Höchstwert geregelt. Zurückregeln während des Versuches vermeidet man, da man sonst Meßpunkte erhält, die nicht nur auf dem aufsteigenden Ast der Sättigungslinie liegen. Nur bei besonderen Prüfungen nimmt man auch noch anschließend den fallenden Ast der Kennlinie auf.

Wenn keine Antriebsmaschine zur Verfügung steht, muß man den Leerlaufversuch im Motorbetrieb bei verschiedenen Spannungen durchführen. Hauptstrommaschinen können natürlich nur mit Fremderregung gefahren werden, die man aber auch am besten bei den übrigen Maschinen anwendet. Erregerstrom und Ankerstrom erhält man auf diese Weise getrennt voneinander. Man erhält auch Punkte der Sättigungslinie, indem man bei konstanter Spannung U den Erregerstrom i ändert und die sich einstellende Drehzahl abliest. Die Verluste werden nur bei Nenndrehzahl abgelesen, da ihre Umrechnung bei anderen Sättigungen wegen der geänderten Geschwindigkeit nicht ohne weiteres möglich ist. Man betrachtet unter berechtigter Vernachlässigung des geringen Ohmschen Spannungsabfalles im Anker und der Ankerrückwirkung die um den Betrag von 2 V für den Bürstenspannungsabfall verringerte Netzspannung als die EMK des Motors. Die zu den einzelnen Erregerströmen $i_1, i_2, i_3 \dots$ zur Nenndrehzahl n_{nenn} gehörenden Leerlaufspannungen $E_{0_1}, E_{0_2}, E_{0_3} \dots$ werden errechnet zu:

$$E_{0_1} = n_{\text{nenn}} \cdot \frac{U - 2}{n_1},$$

$$E_{0_2} = n_{\text{nenn}} \cdot \frac{U - 2}{n_2} \text{ usw.},$$

wobei n_1, n_2, n_3 die sich bei den Erregerströmen $i_1, i_2, i_3 \dots$ einstellenden Drehzahlen sind und 2 den Abfall unter den Bürsten bedeutet. Wegen der mechanischen Beanspruchungen darf man im allgemeinen die Drehzahl nur 25 bis 30% über die Nenndrehzahl hinaustreiben. Infolge der einsetzenden Sättigung gelingt es andererseits nur, die Geschwindigkeit bis auf 80% der Nenndrehzahl herabzuregeln. Die Genauigkeit, die mit diesem Versuch zu erreichen ist, liegt unter der bei Generatorbetrieb. Man kann den Versuch aber im allgemeinen ohne Aufwand vornehmen und führt ihn daher gern bei Messungen außerhalb durch.

Die *Verluste im Leerlauf* setzen sich zusammen aus den Eisen- und den Reibungsverlusten, also den sog. Leerverlusten, die zur Bestimmung des Wirkungsgrades benutzt werden und aus den sehr kleinen Anker-

kupferverlusten beim Motorverfahren, die immer vernachlässigt werden dürfen. Zu letzteren treten noch die Übergangsverluste der Bürsten, die zu $2 \cdot I_0$ eingesetzt werden können. Bei kleinen Spannungen machen sie sich bereits bemerkbar, da sie bei der Spannung U_0 den Betrag von $200\% / U_0$ der Leerlaufverluste ausmachen. $2,0$ ist der Wert des Bürstenspannungsabfalles auch bei kleinen Ankerströmen. Die Aufteilung der Verluste in Eisen- und Reibungswärme erfolgt nach den auf S. 15 angegebenen zeichnerischen Verfahren oder nach der auf S. 37 geschilderten Auslaufmethode, die allerdings in der Prüffeldpraxis nur sehr selten angewandt wird.

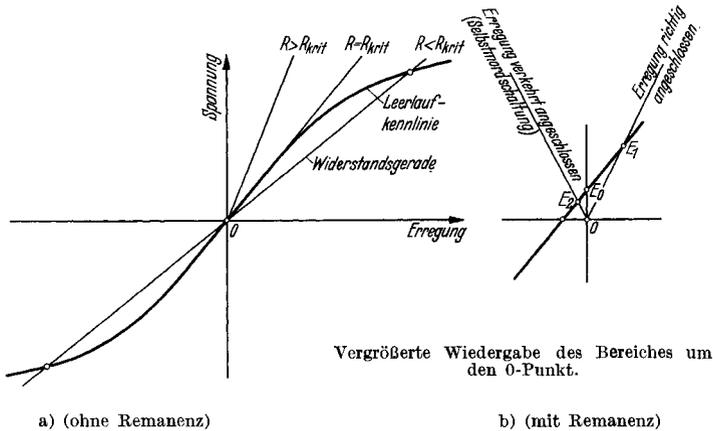


Abb. 131. Selbsterregung. Sie setzt nur ein, wenn Widerstand des Erregerkreises R kleiner als der kritische Wert R_{krit} ist (a). Polarität gegeben durch die Richtung der Remanenzspannung E_0 . E_0 sinkt bei verkehrtem Erregeranschluß auf E_2 , steigt bei richtigem Anschluß auf E_1 , auch wenn $R > R_{krit}$ ist (b).

Maschinen mit Selbsterregung werden anschließend in ihrer richtigen Schaltung mit zugehörndem Feldregler geprüft. Die Prüfung erstreckt sich darauf, ob die Maschine sich überhaupt selbst erregt, ob die gewünschte Polarität der Bürsten auftritt und ob der verlangte Spannungsbereich eingehalten wird.

Die Bedingung der Selbsterregung wird nur erfüllt, wenn der Widerstand des Erregerkreises kleiner als der sog. *kritische Widerstand* ist. Als solchen bezeichnet man jenen Wert, bei dem die zugehörige Widerstandsgerade, die oben auch mit Selbsterregungsgerade bezeichnet wurde, die Sättigungslinie in ihrem geraden, ungesättigten Teil berührt. Bei größeren Widerständen findet überhaupt keine Selbsterregung statt, bei kleineren Werten erregt sich die Maschine jedoch bis zu dem durch den Schnittpunkt zwischen Sättigungslinie und Widerstandsgeraden gegebenen Wert. Abb. 131 a veranschaulicht dies. Die Sättigungslinie ist über den Nullpunkt hinaus auch für den dritten Quadranten aufgetragen. Man erkennt, daß im allgemeinen die Polarität bei der Selbsterregung sich beliebig einstellen kann. Sie ist keinesfalls durch die Schaltung eindeutig bestimmt, sondern hängt nur von der Remanenz ab. Ohne diese setzt

die Selbsterregung überhaupt nicht ein. Erst wenn, wie dies in Abb. 131 b, die eine vergrößerte Darstellung der unmittelbaren Umgebung des Nullpunktes darstellt, gezeigt wird, die Sättigungslinie durch eine geringe Remanenz nach links oder rechts verschoben wurde, tritt an den Klemmen des Ankers eine kleine Spannung auf, auch wenn der Erregerstrom im ersten Augenblick noch Null ist. Diese Spannung bringt einen kleinen Strom im Feld zum Fließen, der seinerseits das Feld und somit die Ankerspannung verstärkt. Die Erregerwicklung darf keinesfalls verkehrt herum angeschlossen werden, also derart, daß die Remanenzspannung des Ankers in ihr einen Erregerstrom erzeugt, der dem remanenten Fluß entgegenwirkt. Diese Schaltung heißt sinngemäß Selbstmordschaltung und wird ausschließlich dort angewandt, wo die remanente Spannung und jegliche Selbsterregung verringert bzw. verhindert werden soll. In der Selbstmordschaltung hat die Widerstandsgerade den in Abb. 131 b gezeigten Verlauf. Die Prüfung auf richtigen Anschluß geht folgendermaßen vor sich. Man legt an die Ankerklemmen der laufenden Maschine, deren Erregerkreis noch offen ist, einen empfindlichen Spannungsmesser an. Dieser zeigt durch einen kleinen Ausschlag die Remanenzspannung an. Man nimmt am besten ein Drehspulgerät, mit dessen Hilfe gleichzeitig festgestellt werden kann, ob die Remanenzspannung die gewünschte Polarität besitzt. Wenn dies nicht zutrifft, schickt man durch die Erregerwicklung einen Fremdstrom in der gleichen Richtung, in der der betriebsmäßige Strom später fließen wird. Man prüft, daß die an den Klemmen des Ankers nunmehr auftretende Spannung richtige Polarität zeigt. Man unterbricht den Strom und mißt den Wert der umgepolten Remanenzspannung. Dann schaltet man den Feldwiderstand ein. Wenn die Ankerspannung ansteigt, ist alles in Ordnung. Wenn die Remanenzspannung dagegen kleiner wird, ist dies ein Zeichen für verkehrten Anschluß der Erregerwicklung, deren Anfang und Ende zu vertauschen sind. Gegebenenfalls müssen die Bezeichnungen geändert werden. Bei Verringerung des vorgeschalteten Regelwiderstandes muß nunmehr die Ankerspannung stark ansteigen. Normale Maschinen lassen sich durch einen richtig gestuften Regler zwischen 80 % der Nennspannung bei Leerlauf und 100 % der Nennspannung bei Vollast bzw. der entsprechenden Überlast regeln. Falls dies nicht möglich ist, wird der Regler neu gestuft. Voraussetzung ist eine entsprechende Regelfähigkeit der Maschine selbst. Normalerweise kann eine Maschine nicht auf Spannungen eingeregelt werden, die noch auf dem geraden Teil der Sättigungslinie liegen, da sich dort keine stabilen Schnittpunkte mit der Widerstandsgeraden ergeben. Die Betrachtung der Kennlinie lehrt also, ob der Wert 80 % der Nennspannung bereits auf dem krummen Teil der Linie liegt. Dies trifft in den meisten Fällen zu.

Besonders bei *Erregermaschinen* wird ein wesentlich größerer Regelbereich für die Spannung gefordert. So gibt es Maschinen, die bei reiner Selbsterregung zwischen 60 und 100 %, 30 und 100 % oder gar 10 und 100 % der vollen Spannung regelbar sein müssen. Diesen Bereich erzielt man auf zweierlei Weise. Man verwendet einen *magnetischen Engpaß* im Kern des Poles oder eine Vormagnetisierung durch Einbau *permanent*

magnetischer Stahlplatten, die in den Polkern eingebaut werden. Den Engpaß erhält man entweder durch eine teilweise Schwächung des Polquerschnittes bis zu 50%, oder man legt statt der üblichen vollen Bleche zwischen Polschenkel und Joch einen 2 bis 6 mm dicken Blechrahmen oder Leisten ein. In beiden Fällen wirkt bei ganz kleinen Feldern der Engpaß wie ungesättigtes Eisen, beeinflusst daher die Sättigungslinie im untersten Bereich überhaupt nicht. Bei merklicher Kraftliniendichte beginnt sich der Engpaß als allererster zu sättigen. Dies bewirkt eine frühzeitige Krümmung der Sättigungslinie gegenüber der normalen Maschine. Bei ganz hoher Sättigung wirken die Engpässe wie ein zusätzlicher Luftspalt. Im ersten Fall ist dieser Zusatzluftspalt sehr groß, im zweiten Fall fällt er weniger ins Gewicht, da er verhältnismäßig klein ist. Die Schwächung des Schenkels wird daher nur dann verwendet, wenn man aus irgendwelchen Gründen die Leerlaufspannung der Maschine nur wenig über die Betriebsspannung ansteigen lassen will (z. B. gelegentlich bei Krämermaschinen). Den Rahmen verwendet man häufig in jenen Fällen, wo es nur auf den vergrößerten Regelbereich ankommt. In Abb. 132 a, b sieht man die charakteristische Leerlaufkennlinie einer Maschine mit untergelegtem Rahmen im Vergleich mit derjenigen einer normalen Maschine. Die früh gekrümmte Kurve besitzt schon ganz unten stabil einstellbare Schnittpunkte mit der Widerstandsgeraden.

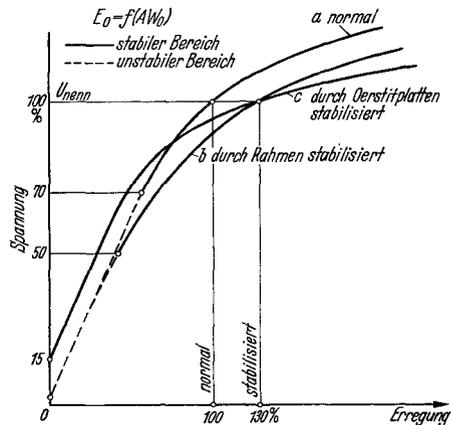


Abb. 132. Sättigungskurven normaler (a) und durch Engpaß (b) bzw. dauermagnetische Oerstitplatten (c) stabilisierter Gleichstrommaschinen.

Maschinen mit kleiner Nennspannung unter 100 V werden statt mit Engpässen im magnetischen Kreis mit sog. *Oerstitplatten* ausgerüstet. Diese hochmagnetischen Platten von 1 cm Dicke verleihen der Maschine eine Remanenzspannung von 5 bis 7,5%, wenn jeder zweite Pol mit ihnen versehen ist, und eine Spannung von 10 bis 15%, wenn jeder Pol eine Platte erhält. Von diesem Wert ab kann die Spannung der selbsterregten Maschine bis zu 100% geregelt werden. Dies geht ohne weiteres aus Abb. 132c hervor, wo die Sättigungslinie einer mit Oerstitplatten ausgerüsteten Maschine wiedergegeben ist. Da die Platten polarisiert sind, kann die Polarität der Maschine nicht mehr geändert werden. Wenn die Remanenzspannung nur klein ist, deutet dies auf die verkehrte Lage einer oder mehrerer Oerstitplatten hin, deren Wirkung dadurch zum Teil oder gänzlich aufgehoben wird. In diesem Fall sind die Pole auszubauen und die Lage der Platten zu kontrollieren. Dies ist leicht möglich, da Nord- und Südpolseite bezeichnet sind.

Alle Maschinen mit vergrößertem Regelbereich der Spannung benötigen mehr Erreger- AW als normale Maschinen und müssen daher im allgemeinen in der Leistung etwas zurückgesetzt werden. Die Prüfung ist im übrigen die gleiche wie bei anderen Maschinen.

Die normalen Kohle- oder Graphitbürsten erhöhen bei ganz kleinen Erregerströmen wegen ihres dann sehr hohen Übergangswiderstandes den gesamten Widerstand des Erregerkreises unter Umständen derart, daß der kritische Wert überschritten wird. Man kann im allgemeinen sagen, daß die Bürsten 1 bis 2 V Abfall haben, also eine Remanenzspannung von geringerem Betrag sozusagen absperrern. Wenn man bei Maschinen geringer Nennspannung Schwierigkeiten bezüglich einer sicher einsetzenden Selbsterregung hat, kann man die Erregerwicklung an besondere metallhaltige Bürsten anschließen, die isoliert

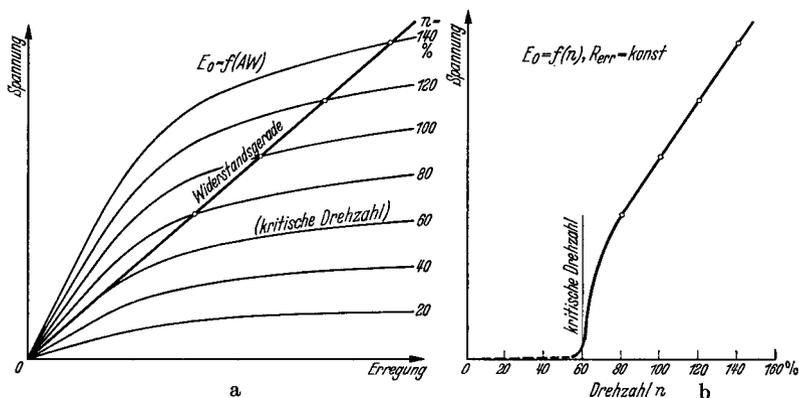


Abb. 133. Selbsterregung bei veränderlicher Drehzahl. Bestimmung der Spannung E_0 für die verschiedenen Drehzahlen und Darstellung über der Drehzahl (b).

auf den gleichen Bolzen wie die übrigen Kohlen sitzen, aber nur den kleinen Erregerstrom zu führen haben. Wegen des sehr kleinen Abfalls metallhaltiger Bürsten erreicht man in diesen Fällen sichere Erregung.

Außer dem kritischen Widerstand gibt es auch eine *kritische Drehzahl*, unterhalb derer bei gegebenem Feldkreiswiderstand keine Selbsterregung möglich ist. Dies geht aus Abb. 133a hervor, wo eine ganze Reihe von Sättigungslinien für gleichmäßig abgestufte Drehzahlen zusammen mit der Widerstandsgeraden aufgetragen sind. Schnittpunkte ergeben sich erst ab jener Drehzahl, bei der die Sättigungskennlinie die Widerstandsgerade berührt. Man kann die kritische Drehzahl durch Verkleinerung des Hauptluftspaltes herabsetzen oder sie durch Vergrößerung desselben noch weiter erhöhen. Die kritische Drehzahl spielt eine Rolle bei allen Erregermaschinen, die mit veränderlicher Drehzahl angetrieben werden. Abb. 133b zeigt den Verlauf der Leerlaufspannung über der Drehzahl einer selbsterregten Maschine. Der linear ansteigende Teil unterhalb der kritischen Geschwindigkeit ist auf den remanenten Magnetismus zurückzuführen.

Der Kurzschlußversuch. Während der Kurzschlußversuch an den meisten elektrischen Maschinen, also besonders bei den Synchron- und Asynchronmaschinen und Transformatoren vorgenommen wird, wird er bei der Gleichstrommaschine nur selten durchgeführt. Bei den sog. Konstantstrommaschinen nimmt man den Kurzschlußpunkt der voll erregten, mit Nenndrehzahl fahrenden Maschine als letzten Punkt der Belastungskennlinie auf. Zu diesen zählen die Stromerzeuger für Scheinwerfer, Schweißzwecke und Sonderanlagen nach dem System von ROSENBERG, KRÄMER, PESTARINI, AUSTIN u. a. Der hierbei auftretende Kurzschlußstrom heißt der stationäre, zur Unterscheidung des wesentlich höheren dynamischen Kurzschlußstromes, der bei plötzlichem Klemmenkurzschluß auftritt und nur oszillographisch gemessen werden kann. Häufig geht er erst nach mehreren Schwingungen in den stationären Strom über. Der plötzliche Kurzschluß ist bei vielen Gleichstrommaschinen von außerordentlicher Höhe und gefährdet die Maschine in starkem Maße. Man vermeidet ihn unter Umständen durch Schnellschalter, die auslösen, ehe er seinen Höchstwert erreicht hat.

Einen eigentlichen Kurzschlußversuch führt man an den Nebenschlußgeneratoren durch. Man schließt die unerregte, mit Nenndrehzahl laufende Maschine satt kurz, wobei man eine etwa vorhandene Hauptstromerregwicklung aus dem Kurzschlußkreis entfernt. An einem eingebauten Strommesser beobachtet man den sich einstellenden Kurzschlußstrom, der nur 10% des Nennstromes erreichen darf. Der Strom wird eingeleitet durch die Remanenzspannung. Er kann wesentlich verstärkt werden durch zu starke Wendepole oder durch aus der neutralen Stellung rückwärts verschobene Bürsten. In diesem Falle wächst er nach dem Schließen des Kreises stetig an und erreicht unter Umständen Werte, die weit über dem Nennstrom liegen können. Dies ist immer unzulässig. Man schiebt nun entweder die Bürsten entsprechend weit vor oder schwächt das Wendefeld durch Vergrößerung des Wendepollluftspaltes, bis der Kurzschlußstrom unter 10% des Nennstromes gesunken ist. Welche der beiden Maßnahmen zu treffen ist, hängt von der Kommutierung der Maschine ab, da die Wendepole nur so weit geschwächt werden dürfen, als die Forderung nach einwandfreier Stromwendung bei Nenn- und Überlast zuläßt. Die Maschine zeigt gutes Verhalten im Kurzschluß, wenn sich der Strom durch mäßiges Erregen eindeutig erhöhen und wieder verringern läßt. Kurzschlußstrom I_k und Erregerstrom i_k stehen in linearem Zusammenhang.

Die Kurzschlußverluste werden nicht gemessen, da sie nicht auf einfache und eindeutige Weise in ihre einzelnen Anteile aufgeteilt werden können. Insbesondere werden die Zusatzverluste der Gleichstrommaschine nicht auf diese Weise gemessen, sondern ausschließlich durch den von den REM gegebenen Prozentsatz der Nennleistung berücksichtigt.

Die Untersuchung der Stromwendung und die Vornahme des Dauerlaufes im Kurzschluß stellen keine eigentlichen Kurzschlußversuche dar.

Die Belastungsversuche. Die Belastungsversuche werden nach Möglichkeit an jeder Maschine vorgenommen. Sie dienen der Aufnahme der

Regel-, Spannungs- und Drehzahlkennlinien. Sie können erst begonnen werden, wenn die Bürsten tadellos eingeschliffen sind und die Stromwendung einwandfrei verläuft. Die Bürsten müssen in ihrer endgültigen Stellung stehen. Dies ist erforderlich, da infolge der Ankerrückwirkung ein starker Einfluß auf das Verhalten der belasteten Maschine besteht. Die allerersten Belastungspunkte fährt man vorsichtigerweise bei Motoren oder Generatoren mit etwas vorgeschobenen Bürsten, besonders, wenn man mit der Probe- und mit der Prüffeldmaschine je an einem Netz arbeitet. Zeigt die Maschine dann stabiles Verhalten, so geht man möglichst in die Neutralstellung zurück. Maschinen für Umkehrbetrieb, also z. B. Motoren für Hebezeuge, dürfen nur mit neutral stehenden Bürsten belastet werden. Wenn man auch schon nach den auf S. 9 beschriebenen Verfahren die Nullstellung der Bürstenbrücke recht genau ermitteln kann, so gibt der Belastungsversuch, sofern die Kohlen genügend lange in beiden Drehrichtungen einlaufen konnten, noch eine weitere Gelegenheit, die Stellung zu kontrollieren. Man belastet die Maschine, besonders Motoren oder Maschinen für Ausgleichsaggregate, in beiden Drehrichtungen und mißt die sich ergebende Drehzahl bzw. Klemmenspannung. Stimmen diese in beiden Richtungen überein, so stimmt auch die Neutralstellung der Brücke. Weichen sie voneinander ab, so bestimmt man den Mittelwert beider Messungen und verdreht die Brücke vorsichtig unter Last, bis dieser Mittelwert sich einstellt. Die Probe in der andern Richtung bestätigt die Richtigkeit der neuen Einstellung.

Maschinensätze prüft man erst dann, wenn die Prüfung der einzelnen Maschinen, aus denen sie aufgebaut sind, beendet sind. Erst wenn die Charakteristik jeder einzelnen bekannt ist, kann bei etwaigen Abweichungen im Verhalten des Aggregates auf die Ursache geschlossen werden. Wenn man dagegen gleich mit der Gesamtprüfung beginnt, ist ein unter Umständen langwieriges Probieren kaum zu vermeiden. Dies gilt bereits bei im Aufbau einfachen Sätzen, wie sie z. B. von Ausgleichsaggregaten gebildet werden.

Unten werden die wichtigsten Maschinen mit Rücksicht auf die Aufnahme und die graphische Bestimmung ihrer Kennlinien behandelt. Sie unterscheiden sich alle nur durch die Zahl und Schaltung ihrer Erregerwicklungen.

Die Korrektur der Leerlauf- oder der Lastdrehzahl von Gleichstrommaschinen durch Änderung des Hauptluftspaltes. Häufig stimmt die Drehzahl der leerlaufenden oder der belasteten Gleichstrommaschine nicht mit dem Sollwert überein. Wenn die Abweichung innerhalb der Toleranz nach REM liegt (S. 231), kann im allgemeinen von einer Korrektur abgesehen werden. Liegt die Abweichung dagegen außerhalb der Toleranz oder aber sollen mehrere Maschinen auf völlig gleiche Drehzahl bei gleichem Erregerstrom abgestimmt werden, so ändert man die Drehzahl durch Vergrößerung oder Verkleinerung des Hauptluftspaltes ab. Einer Vergrößerung entspricht eine Drehzahlerhöhung, einer Verkleinerung eine Drehzahlerniedrigung. Die notwendige Änderung des Luftspaltes kann sehr genau auf Grund der Leerlauf- und der Belastungs-

messung vorausberechnet werden. Das angegebene Verfahren stimmt für alle Arten von Motoren und Generatoren. Die Aufgabe lautet also folgendermaßen: Beim Ankerstrom $I = 0$ oder $I = I_{\text{nenn}}$ wurde die Drehzahl n beobachtet, wenn an den Klemmen der Maschine die Netzspannung U lag. Diese Drehzahl soll geändert werden auf den Wert n' . Die Sättigungslinie der Maschine bei einer beliebigen Drehzahl n_0 , die natürlich aus irgendwelchen Gründen mit n oder n' übereinstimmen kann, ist bekannt. Der Ankerkreiswiderstand sei R . Man bestimmt zuerst die beiden EMKK E und E' nach folgenden Formeln:

$$E = (U - I \cdot R) \cdot \frac{n_0}{n} \quad \text{und} \quad E' = (U - I \cdot R) \cdot \frac{n_0}{n'} \quad \text{bei Motoren bzw.}$$

$$E = (U + I \cdot R) \cdot \frac{n_0}{n} \quad \text{und} \quad E' = (U + I \cdot R) \cdot \frac{n_0}{n'} \quad \text{bei Generatoren,}$$

und sucht zu diesen mittels der Leerlaufkennlinie $E_0 = f(i)$ bei Drehzahl n_0 die zugehörigen Werte des Erregerstromes i und i' . Außerdem liest man den auf den Luftspalt entfallenden Betrag i'_L von i' ab. Dann ergibt sich der neue Luftspalt zu:

$$\delta_{\text{neu}} = \delta_{\text{alt}} \cdot \frac{i'_L + (i - i')}{i'_L}.$$

Der Luftspalt ist also zu vergrößern, wenn i größer als i' ist, und zu verkleinern, wenn i' größer als i ist. In Abb. 134 ist die Aufgabe durchgeführt für den Fall einer erwünschten Drehzahlerhöhung um 10%. Bei Änderung der Leerlaufdrehzahl ist für I natürlich 0 einzusetzen.

Der Dauerlauf. Für die Vornahme des Dauerlaufes der Gleichstrommaschine gelten die auf S. 17 gegebenen allgemeinen Richtlinien. Meistens ist es möglich, die kleinen und mittleren Maschinen mit Nenn Drehzahl, Nennspannung und Nennstrom zu fahren. Nur bei großen Maschinen muß man mit Rücksicht auf die Größe des zur Verfügung stehenden Gleichstromnetzes zu Läufen mit reduzierter Spannung oder gar zum reinen Kurzschlußlauf greifen. Im letzteren Fall macht man einen zweiten Dauerlauf mit voll erregter, leerlaufender Maschine und addiert die Temperaturen beider Läufe. Die sich ergebenden Temperaturen sind etwas zu hoch, bergen also eine gewisse Sicherheit in sich. Außer Wicklungen, Eisen und Kommutator ist auch den Bandagen Aufmerksamkeit zu schenken, da unter Umständen durch die Streukraftlinien des Hauptfeldes oder durch die magnetisierende Wirkung nahe vorbeigeführter Ankerstromleitungen (Kompensationswicklung) in diesen starke Wirbelströme induziert werden können, die zum Auslöten führen. Eine geeignete

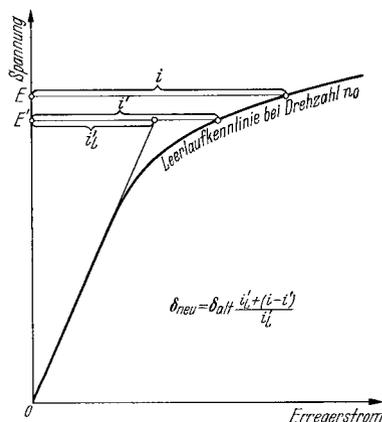


Abb. 134. Drehzahländerung durch Änderung des Luftspaltes.

Gegenmaßnahme besteht z. B. im Isolieren der einzelnen Bandlagen oder im Entfernen der zu nahen Stromführungen.

Die Aufnahme der Feldkurve. An Maschinen ohne Kompensationswicklung zeigt sich bei Belastung infolge der magnetisierenden Wirkung des Ankers eine Verzerrung des Feldes, die sich in einer starken Verschiedenheit der Kraftliniendichte unter den beiden Polschuhkanten äußert. Beim Generator erscheint die ablaufende Kante, beim Motor die auflaufende Kante wesentlich stärker gesättigt. Die Feldkurve der leerlaufenden Maschine, Motor oder Generator zeigt symmetrische Flußverteilung zu beiden Seiten der Polschuhmitte.

Die Feldkurve der leerlaufenden oder der belasteten Gleichstrommaschine kann auf verschiedene Weise genau oder angenähert bestimmt werden. Die genaueste Bestimmung der Feldkurve gelingt mittels einer Probspule von Durchmesser s , also von einer Weite von 180° el, die möglichst nahe der Ankeroberfläche aufgebracht ist. Die oszillographische Aufnahme der in ihr bei Lauf induzierten Spannung gibt mit allen Feinheiten, die durch die Nutung hineinkommen, die wahre Feldkurve wieder. Man erhält den Maßstab für die Kraftliniendichte B , indem man die zur höchsten induzierten Gesamtspannung gehörende höchste Kraftliniendichte B_{\max} bestimmt nach der Formel:

$$B_{\max} = \frac{e_{\max}}{2w} \cdot \frac{100}{l} \cdot \frac{100}{v} \cdot 10000$$

in Gauß, worin w die Windungszahl der Probspule, l die Eisenlänge des Ankers in cm, v die Ankerumfangsgeschwindigkeit in cm/sec und e_{\max} die höchste induzierte Spannung des Oszillogrammes in Volt bedeutet.

Praktisch leichter durchzuführen ist die Aufnahme der Feldkurven mittels zweier Kupferhilfsbürsten, die man auf dem Kommutator schleifen läßt und von der (+)-Bürste zur (-)-Bürste bewegt. Die beiden Bürsten erhalten einen Abstand von k Kommutatorsegmenten voneinander, wobei $k = 1$ bei eingängigen Schleifen- und Wellenwicklungen zu machen ist. Bei m -facher Schleifen- oder Wellenwicklung wählt man k gleich m . Man mißt den Verschiebungswinkel α , liest jeweils die zwischen den Bürsten auftretende Spannung e ab und trägt dann bei Schleifenwicklungen $e/2$ und bei Wellenwicklungen $e/2p$ über dem Verstellwinkel α auf, erhält also bei Einwindungsankern die in einem Leiter induzierte Spannung über dem Polbogen. Diese Spannung gibt aber den Mittelwert der Kraftliniendichte an jedem Punkt zwischen den Hauptbürsten wieder. Die Feinheiten fehlen bis zu einem gewissen Grade. Den Maßstab für die Induktion erhält man wie oben, indem man aber statt $2w$ die Zahl 1 entsprechend einer halben Windung einsetzt. Nur wenn der Anker mehr als eine Windung je Segment besitzt, muß die Spannung noch durch die entsprechende Zahl geteilt werden.

Läßt man die eine Hilfsbürste dauernd mit einer der Maschinenbürsten verbunden und bewegt nur die zweite Hilfsbürste, bis sie schließlich die Maschinenbürste der anderen Polarität erreicht, so erhält man durch Auftragen der gemessenen Spannung über dem Verstellwinkel die

sog. Kommutatorspannungskurve, deren Höchstwert gleich der Maschinenspannung ist. Durch zeichnerische Differentiation derselben gewinnt man die Feldkurve der Maschine, und zwar im gleichen Maßstabe wie beim vorigen Versuch, wenn man die Differenz solcher Ordinaten bildet, die einem Abstand von k Segmenten entsprechen.

Die Eigenschaft des Wismuts, durch seine Widerstandsänderung auf die Kraftliniendichte eines Magnetfeldes anzusprechen, kann ebenfalls zur Ermittlung der Feldkurve benutzt werden.

Die Messung der Welligkeit der Gleichspannung. Die von der Gleichstrommaschine abgegebene Spannung erhält eine Anzahl von Wellen, die zum Flimmern angeschlossener Lampen und zu Störungen der Fernsprechleitungen oder des drahtlosen Empfanges führen können. Durch Schrägstellen der Nuten, Anschluß von Störschutzkondensatoren und ähnliche Mittel versucht man die Welligkeit so klein wie möglich zu halten. Die Messung des noch bestehenden Anteiles erfolgt durch oszillographische Aufnahme. Die Aufnahme der vollen Gleichspannung nützt im allgemeinen wenig, da die Wellen nur rund 1% der vollen Spannung betragen und daher im Oszillogramm kaum zu erkennen sind. Man bevorzugt daher Schaltungen, in denen der vollen Spannung oder einem Teil derselben eine fast gleich große Spannung, die von einem Akkumulator geliefert wird, entgegengeschaltet ist. Man oszillographiert dann nur die Differenz, die man so einstellt, daß einem Grundbetrag von etwa 2 V die Wellen in voller Größe, bzw. dem der Teilspannung entsprechenden Wert überlagert sind. Man beachte, daß die geringste Änderung der Maschinen- oder der Gegenspannung die Differenzspannung prozentual sehr stark verändert, so daß eine gewisse Gefährdung der Schleifen besteht.

Die Flimmerprobe mit Glühlampen. In sehr einfacher Weise kann die Welligkeit der Gleichspannung durch einen subjektiven Versuch begutachtet werden. Man legt je nach Höhe der Spannung eine oder mehrere in Reihe geschaltete Glühlampen, die sich in einem verdunkelten Raume befinden, an die Klemmen der zu untersuchenden Maschine. Das Licht der Lampen fällt auf einen Zeitungsausschnitt, der ungefähr eine Minute lang betrachtet wird. Erscheint das Bild der Buchstaben ruhig, so ist die Spannung in Ordnung, da das Auge sehr scharf auf geringste Spannungsschwankungen nicht allzu hoher Frequenz reagiert. Die hohen Oberwellen, die zu Störungen der Fernsprechanlagen führen, können allerdings nicht festgestellt werden. Hierzu bedient man sich eigens geschaffener Störmeßgeräte.

Die Bestimmung des Wirkungsgrades. Der Wirkungsgrad der Gleichstrommaschinen wird in der Praxis fast ausschließlich nach dem Einzelverlustverfahren bestimmt. Die auf S. 39 angegebenen andern Methoden finden nur selten Anwendung. Die Gesamtverluste setzen sich zusammen aus den Leerverlusten, den Erregerverlusten und den Lastverlusten, in denen die Zusatzverluste enthalten sind.

Die *Leerverluste* bestehen aus den Reibungsverlusten, die nur von der Drehzahl n abhängen, und den Eisenverlusten, die von der Drehzahl n und von der EMK, also von $U + I \cdot R$ bei Generatoren und $U - I \cdot R$

bei Motoren abhängen. Sie werden aus den Ergebnissen des Leerlaufversuches bestimmt.

Die *Erregerverluste* berechnet man aus dem Produkt Nennererregerspannung mal Erregerstrom, also unter Einschluß der Verluste im Feldregler oder aus dem Produkt Klemmenspannung der Erregermaschine mal Erregerstrom geteilt durch den Wirkungsgrad der Erregermaschine, der auch die Verluste etwaiger weiterer Erreger berücksichtigt. Bei Regelung im Feldkreis der Erregermaschine ändert sich natürlich deren Klemmenspannung mit dem Erregerstrom der Hauptmaschine. Übergangsverluste treten bei Gleichstrommaschinen im Erregerkreis nicht auf.

Die Verluste einer fremdangetriebenen Erregermaschine werden nicht in die Erregerverluste der Hauptmaschine einbezogen.

Die *Lastverluste* bestehen aus den Stromwärmeverlusten in den Wicklungen des Ankerkreises, den Übergangsverlusten der Bürsten und den Zusatzverlusten. Die Stromwärmeverluste werden berechnet zu: (Ankerstrom zum Quadrat) mal (Ankerwiderstand + Wendepolwiderstand + Kompensationswicklungswiderstand + Hauptstromerregewicklungswiderstand), wobei die warmen Widerstandswerte aus dem Dauerlauf oder, wenn diese nicht bestimmt worden sind, die auf 75° bezogenen Widerstände einzusetzen sind. Die Übergangsverluste werden nach den REM bestimmt zu Ankerstrom mal 2. Tatsächlich kann der Spannungsabfall der Bürsten zwischen 1,8 und 2,3 für beide Bürsten gerechnet schwanken. Er wird üblicherweise nicht durch Messung bestimmt. Die Zusatzverluste nichtkompensierter Maschinen werden zu 1,0%, die der kompensierten Maschinen zu 0,5% der bei Nennlast umgesetzten elektrischen Leistung eingesetzt. Man errechnet sie also bei Generatoren aus der Abgabe, bei Motoren aus der Aufnahme der vollbelasteten Maschine. Für Teillasten setzt man die im Quadrat des Ankerstromes reduzierten Beträge ein. Allgemein gilt also:

$$\text{Zusatzverluste} = \frac{\text{Ankerstrom}^2}{\text{Nennstrom}^2} \cdot \frac{\text{Nennspannung} \cdot \text{Nennstrom}}{100}$$

bei unkompensierter Maschine und:

$$\text{Zusatzverluste} = \frac{\text{Ankerstrom}^2}{\text{Nennstrom}^2} \cdot \frac{\text{Nennspannung} \cdot \text{Nennstrom}}{200}$$

bei kompensierten Maschinen. Grundsätzlich entsprechen also die Zusatzverluste der Stromwärme in einem zusätzlichen Ohmschen Widerstand des Ankerkreises, dessen Ohmwert gleich $U_{\text{nenn}}/100 I_{\text{nenn}}$ bzw. $U_{\text{nenn}}/200 I_{\text{nenn}}$ zu setzen wäre.

Bei Maschinen mit Selbsterregung ist immer genau zwischen dem Netzstrom und dem Ankerstrom zu unterscheiden, der bei Generatoren um den Betrag des Erregerstromes größer, bei Motoren dagegen kleiner als ersterer ist. Bei großen Maschinen ist der Unterschied allerdings sehr klein, er liegt in der Größe von etwa 1,5 bis 0,5%.

Die Summe der Verluste ergibt die Gesamtverluste, die bei Generatoren der abgegebenen Leistung zuzuschlagen sind, um die aufgenommene Leistung zu erhalten. Bei Motoren zieht man sie von der dem Netz

entnommenen Leistung ab und erhält die abgegebene mechanische Leistung. Es kann auf die Ausführungen bei der Synchronmaschine auf S. 190 verwiesen werden.

Der Wirkungsgrad η in Prozent wird errechnet zu:

$$\eta \% = 100 - \frac{\sum V \cdot 100}{N_{ab} + \sum V}$$

bei Generatoren und zu:

$$\eta \% = 100 - \frac{\sum V \cdot 100}{N_{auf}}$$

bei Motoren. Hierbei bedeutet $\sum V$ die Summe aller Verluste, N_{ab} die elektrische Abgabeleistung der Generatoren und N_{auf} die elektrische Aufnahmeleistung der Motoren.

Es ist üblich, die Wirkungsgrade der Teillasten bei der Nennzahl zu bestimmen, auch wenn die Drehzahl hierbei in Wirklichkeit geringe Änderungen erleidet. Bei Maschinen mit großem Drehzahlabfall, also besonders bei Hauptstrommotoren, wird der Wirkungsgrad dagegen für die wahre Drehzahl bestimmt. Es ist dann erforderlich, die Eisen- und Reibungsverluste auch bei diesen Geschwindigkeiten in besonderen Leerlaufversuchen aufzunehmen. Man fährt aber keine ganze Kurve, sondern begnügt sich mit der Aufnahme eines Punktes, entsprechend der bei Last auftretenden EMK. Die Aufteilung in Eisen- und Reibungsverlusten kann und braucht dann nicht vorgenommen zu werden.

Die Eichung von Belastungs- und Antriebsmaschinen. Die Prüffeldmaschinen werden meistens innerhalb eines weiten Drehzahl- und Spannungsbereiches als Generatoren und Motoren benutzt. Da bei vielen Versuchen die Kenntnis der von ihnen an der Welle abgegebenen oder aufgenommenen Leistung benötigt wird, ist es zweckmäßig, für die häufiger zur Verwendung kommenden Maschinen Kurvenblätter anzulegen, aus denen schnell die Verluste des jeweiligen Belastungszustandes entnommen werden können. Die Erregerverluste schaltet man immer durch Wahl der Fremderregung aus. Man braucht also nur die Eisen- plus Reibungsverluste entsprechend der Drehzahl n und dem durch den Erregerstrom i gegebenen Sättigungszustand der Maschine sowie die Stromwärmeverluste durch den Ankerstrom I zu kennen. Am zweckmäßigsten trägt man die in einer Reihe von Leerlaufversuchen ermittelten Eisen- plus Reibungsverluste über der Drehzahl n für eine Anzahl gleichmäßig gestufter Erregerströme i als Parameter im Kurvenblatt *A* auf (Abb. 135). In einem zweiten Blatt *B* werden die vom Strom I abhängigen Verluste, also die Summe aus $I^2 \cdot R + I \cdot 2 + I^2 \cdot R_{zus}$ über I aufgetragen. R ist der gesamte Widerstand des Ankerkreises bei betriebswarmer Maschine und R_{zus} der den Zusatzverlusten entsprechende — gedachte — Zusatzwiderstand, der nach der Gleichung

$$R_{zus} = \frac{U_{nenn}}{100 \cdot I_{nenn}}$$

bei der meist gebrauchten, unkompenzierten Maschine zu berechnen ist. Bei den selten verwendeten kompenzierten Prüffeldmaschinen ist statt 100 die Zahl 200 zu setzen.

Diese beiden Kurvenblätter genügen. Bei Betrieb als Motor bestimmt man die Leistung an der Welle zu:

Motorleistungsabgabe = Klemmenspannung · Ankerstrom — (Verluste aus Blatt *A* zu Drehzahl *n* und Erregerstrom *i*) — (Verluste aus Kurvenblatt *B* zu Strom *I*).

Bei Betrieb der Maschine als Generator bestimmt man die an der Welle aufgenommene Leistung zu:

Generatorleistungsaufnahme = Klemmenspannung · Ankerstrom + (Verluste aus Kurvenblatt *A* zu Drehzahl *n* und Erregerstrom *i*) + (Verluste aus Kurvenblatt *B* zu Ankerstrom *I*).

In Wirklichkeit hängen die Zusatzverluste von der Drehzahl *n* der Maschine ab. Da sie aber durch Messungen nicht eindeutig bestimmt

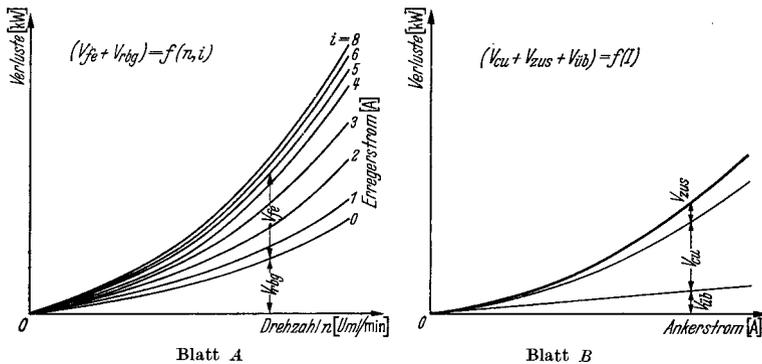


Abb. 135. Eichung einer fremderregten Gleichstrommaschine. Blatt *A* ergibt Eisen-plus Reibungsverluste zu Drehzahl *n* und Erregerstrom *i*, Blatt *B* Lastverluste zu Strom *I*.

werden können, mag die oben zugrunde gelegte reine Stromabhängigkeit als richtig gelten. Auch die Eisenverluste sind mit einem kleinen Fehler behaftet, da die feldverändernde Wirkung des Ankerstromes nicht berücksichtigt wird. Gemessen an der Genauigkeit des Gesamtergebnisses spielt dies nur eine untergeordnete Rolle, da ein Fehler von 5 bis 10% in den Eisenverlusten nur zu einem Gesamtfehler von etwa 0,1 bis 0,2% führt, wenn man etwa 2% Eisenverluste zugrunde legt. Dem steht die größere Zuverlässigkeit einer solchen einfachen Methode gegenüber den komplizierteren Verfahren entgegen.

Die Aufnahme der Kurven für Blatt *A* geschieht am besten mittels einer zweiten, bereits geeichten Prüffeldmaschine im Generatorverfahren. Man stellt die einzelnen Werte des Erregerstromes *i* ein und mißt die Verluste zwischen kleinster und höchster Drehzahl.

Steht keine Hilfsmaschine zur Verfügung, so muß man die Verluste im Motorverfahren bestimmen. Man legt die Maschine an ein Netz konstanter Spannung und stellt, unter Berücksichtigung der höchstzulässigen Drehzahl, die einzelnen Erregerströme ein. Man liest ab: die Netzspannung *U*, den Ankerstrom *I*, den Erregerstrom *i* und die

Drehzahl n . Die Leerverluste berechnet man genügend genau zu: $V_{fe} + V_{rbg} = (U - 2,0) \cdot I$. Diese Versuche werden für eine Reihe anderer Netzspannungen wiederholt. Dann trägt man die Verluste über der Drehzahl n auf und verbindet die Punkte gleicher Erregerströme i . Man beachte also von vorneherein bei der Aufnahme, daß immer genau die gleichen Erregerströme i eingestellt werden, damit eine nachherige Interpolation der Ergebnisse vermieden wird.

Unmittelbar kann man die gewünschten Kurven $V_{fe} + V_{rbg} = f(n, \text{ bei } i = \text{konst.})$ gewinnen, wenn man Auslaufversuche für jeden einzelnen Erregerstrom durchführt. Auf diese Weise kann man besonders auch die Kurvenäste für kleine Geschwindigkeiten ergänzen. Es empfiehlt sich, wegen der geringeren Genauigkeit dieser Verlustmessung einzelne Punkte im Leerlauf zu kontrollieren.

Es ist zweckmäßig, in die Kurvenblätter A und B auch den Wert des Ankerwiderstandes R und vor allem das genaue Schwungmoment GD^2 der Maschine miteinzutragen, da diese beiden Werte immer wieder benötigt werden.

Toleranzen. Für den Wirkungsgrad, die Spannung und die Drehzahl der Gleichstrommaschinen gelten folgende Toleranzen nach REM:

Gewährleistung für:	Zulässige Abweichungen:
Wirkungsgrad $\eta\%$	$\pm \frac{100 - \eta\%}{10}$ aufgerundet auf 0,1%, mindestens aber 0,5%. (Dies bedeutet 10% Toleranz der Gesamtverluste bei Wirkungsgraden unter 95%.)
Drehzahl	bei Nennleistung
	bis 1,1 kW 1,1 . . . 11 kW über 11 kW
1. Motor mit Nebenschlußwicklung	$\pm 10\%$ $\pm 7,5\%$ $\pm 5\%$
2. Motor mit Doppelschlußwicklung	$\pm 12\%$ $\pm 8,5\%$ $\pm 6\%$
3. Motor mit Reihenschlußwicklung	$\pm 15\%$ $\pm 10\%$ $\pm 7\%$
Drehzahländerung	$\pm 10\%$ des gewährleisteten Wertes bei allen Motoren und Leistungen.
Spannungsänderung	$\pm 20\%$ der gewährleisteten Spannungsänderung, aber mindestens 2% bei Doppelschlußgeneratoren.

b) Generatoren.

Der selbsterregte Nebenschlußgenerator. Der selbsterregte Generator wird mit seinem zugehörigen, feinstufigen Nebenschlußregler entweder auf das Netz oder auf Widerstände belastet. Beim Arbeiten auf das Netz konstanter Spannung kann man nur die Regelkennlinie $i = f(I)$ aufnehmen. Bei Belastung auf Widerstände erhält man auch die Spannungskennlinie $U = f(I)$, wenn man den Nebenschlußregler nicht betätigt. Beide Kurven können mit Hilfe der Leerlaufkennlinie $E_0 = f(i)$ ineinander umgewertet werden. Abb. 136 zeigt die Schaltung der Maschine und die graphische Ermittlung der Spannungskennlinie sowie ihre entzerrte Darstellung. Typisch für die selbsterregte Dynamo ist der kritische Wert des Ankerstromes, bei dem die Klemmspannung jäh absinkt, und außerdem der sehr kleine Wert des Dauerkurzschlußstromes, der im wesentlichen nur durch die Remanenzspannung be-

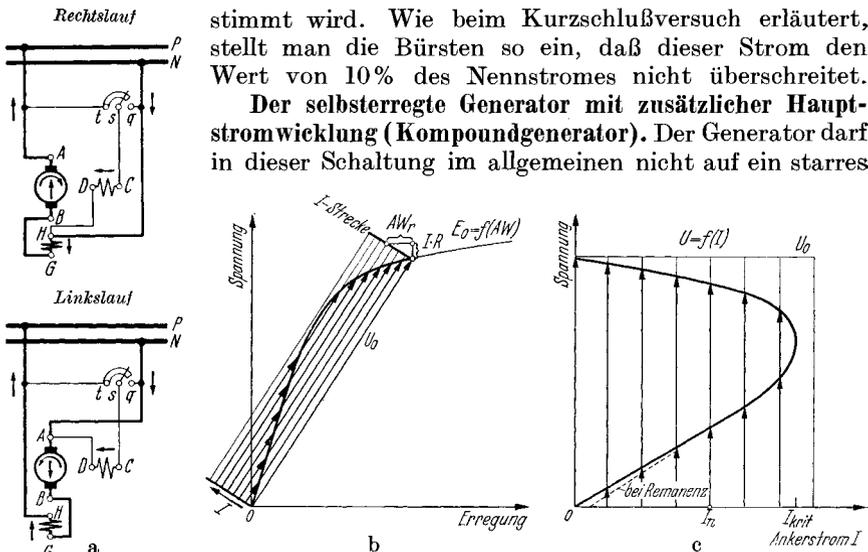


Abb. 136. Selbsterregter Gleichstromgenerator. Schaltung (a) und Spannungskennlinie $U = f(I)$ (b) und (c).

Prüffeldnetz gefahren werden, da die zusätzliche Hauptstromwicklung die Spannungskennlinie im Bereich zwischen Leerlauf und ungefähr Halb- last meist ansteigen läßt. Die Belastung auf Widerstände ist dagegen ohne weiteres möglich. Will man dennoch auf das Netz fahren, so nimmt man die Hauptstromwicklung aus dem Ankerstromkreis heraus und speist sie von einer fremden Stromquelle aus mit einem Strom, der stets gleich dem jeweiligen Ankerstrom ist und natürlich gleiche Richtung mit ihm haben muß. Auf diese Weise erzielt man ein weicheres

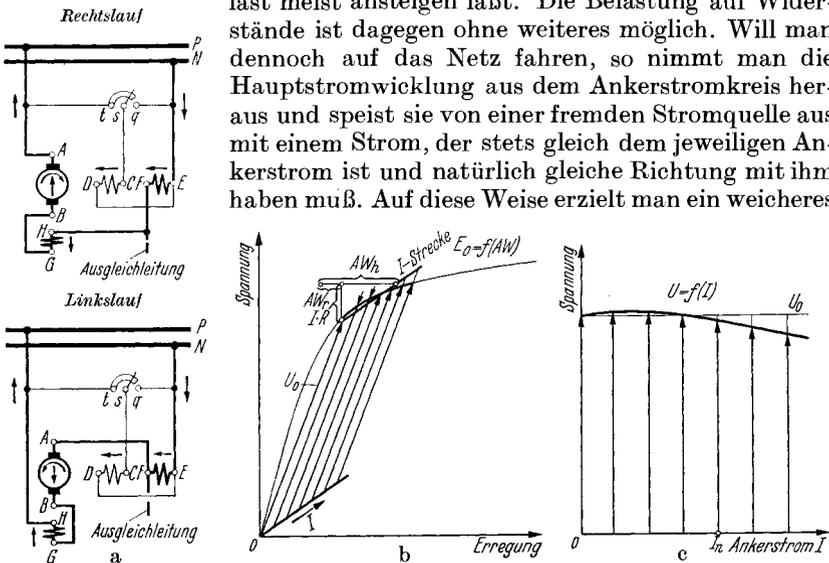


Abb. 137. Selbsterregter Gleichstromgenerator mit zusätzlicher Hauptstromerregung. Schaltung (a) und Spannungskennlinie $U = f(I)$ (b) und (c).

Arbeiten des Generators. Abb. 137 zeigt die Schaltung und die graphische Ermittlung der Klemmenspannungskennlinie der Maschine.

Der fremderregte Generator. Dies ist die übliche Schaltung der größeren Gleichstromdynamos. Die Fremderregung wird meistens von einer angekuppelten Erregermaschine geliefert. In diesem Falle spricht man von *Eigen*erregung. Selten wird sie einem getrennt aufgestellten Erregerumformer entnommen. Die Prüfung im belasteten Zustand kann wahlweise auf das Netz oder

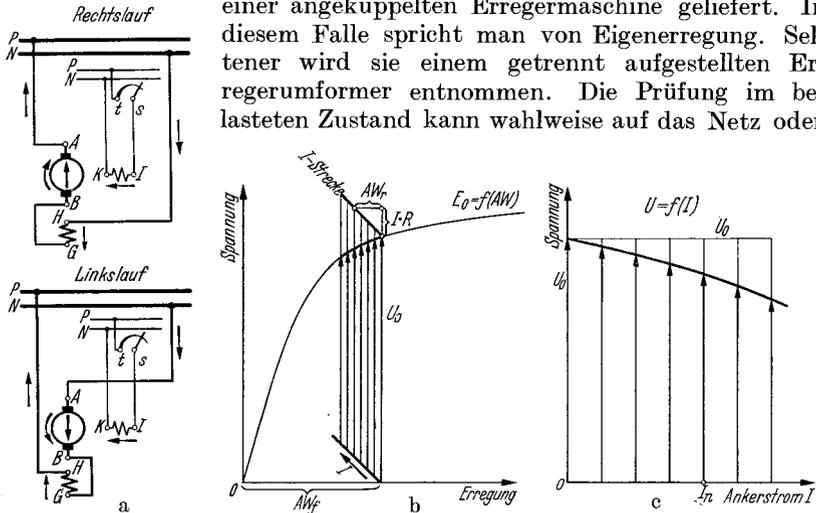


Abb. 138. Fremderregter Gleichstromgenerator. Schaltung (a) und Spannungskennlinie $U = f(I)$ (b) und (c). ($I \cdot R$ ist stark übertrieben!)

auf Widerstände erfolgen, da die Spannungskennlinie abfallend verläuft. Der Unterschied zur selbsterregten Maschine besteht darin, daß der Spannungsabfall bei Last nicht auf die Erregung selbst zurückwirken kann, weshalb die fremderregte Maschine wesentlich härter als jene ist. Abb. 138 zeigt ihre Schaltung und die zeichnerische Ermittlung der Spannungskennlinie.

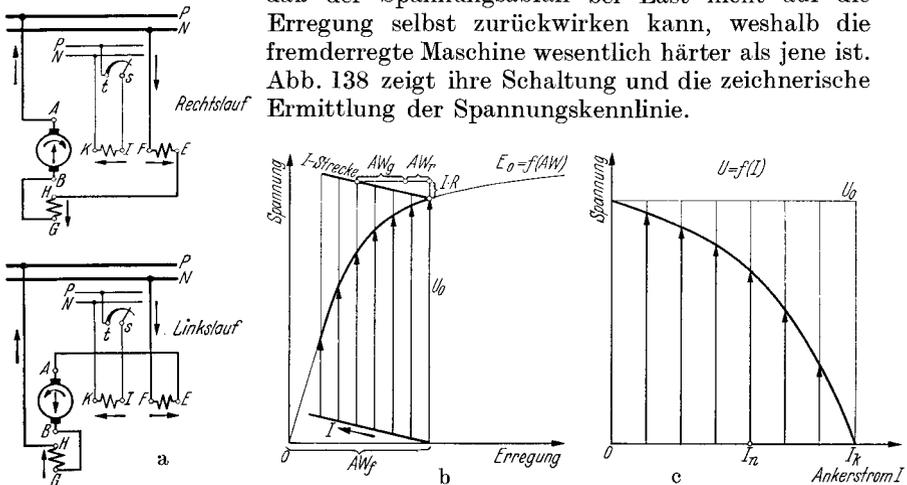


Abb. 139. Fremderregter Gleichstromgenerator mit zusätzlicher Gegenstromwicklung. Schaltung (a) und Spannungskennlinie $U = f(I)$ (b) und (c).

Der fremderregte Generator mit zusätzlicher Gegenstromwicklung (Gegenkompondgenerator). Die natürliche Spannungssteifigkeit der fremderregten Maschine ist in manchen Fällen mit Rücksicht auf das

Verhalten der von ihr gespeisten Motoren nicht erwünscht. Dies trifft z. B. bei den Anlaßdynamos von Umkehrmotoren aller Art zu. Man bringt eine zusätzliche, feldschwächende Gegenstromwicklung von wenigen Windungen auf. Wegen der nunmehr stärker fallenden Spannungskennlinie können diese Maschinen ohne weiteres auch auf ein Netz belastet werden. Bemerkenswert ist der wesentlich kleinere Kurzschlußstrom der Maschine, der nicht größer werden kann, als der Wert, der sich aus Fremderregerstrom mal Fremderreger-Windungszahl geteilt durch die Windungszahl der Gegenstromwicklung ergibt. Abb. 139 zeigt die Schaltung und erläutert die graphische Ermittlung der Kennlinien.

Fremderregte Maschinen mit feldverstärkender Hauptstromwicklung werden fast nie ausgeführt.

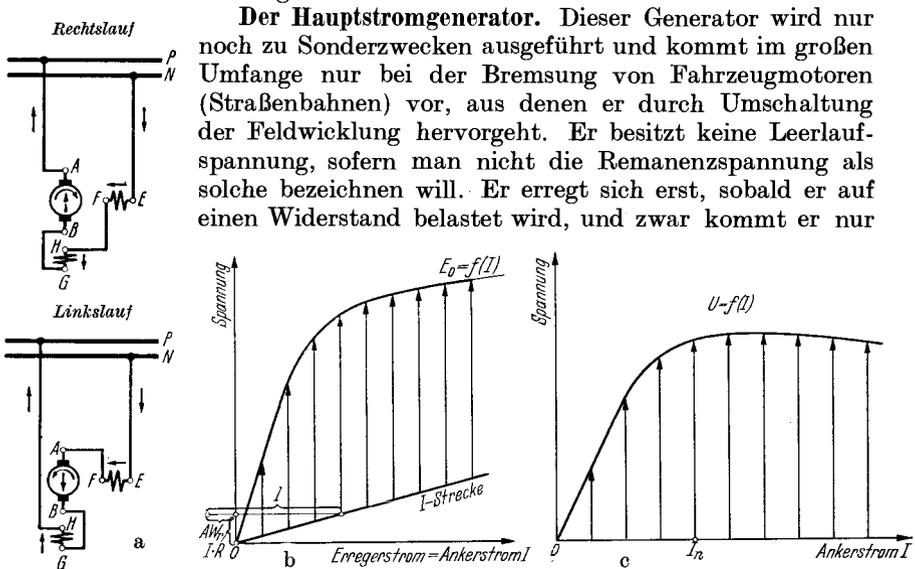


Abb. 140. Hauptstromgenerator. Schaltung (a) und Spannungskennlinie $U = f(I)$ (b) und (c).

dann auf Spannung, wenn dieser Widerstand kleiner als der durch die Neigung der Leerlaufkennlinie gegebene kritische Widerstand ist. Die Spannung nimmt mit steigendem Belastungsstrom stark zu, bleibt bei höheren Werten etwa konstant, um ab einem gewissen Betrage wieder langsam abzusinken. Infolge dieses Verhaltens kommt eine Belastung in normaler Schaltung nur auf Widerstände in Betracht. Soll die Maschine bei der Probe auf das Netz gefahren werden, so schaltet man sie auf Fremderregung um. Sie verhält sich dann wie eine fremderregte Maschine mit schwach fallender Kennlinie.

Abb. 140 zeigt die Schaltung der Maschine und die zeichnerische Ermittlung ihrer Spannungskennlinie.

Durch eine selten angewandte zusätzliche Selbst- oder Fremderregerwicklung kann man die Hauptstromdynamo auch leerlaufend auf Spannung bringen.

Die Krämermaschine (Dreifeldmaschine). Als Krämermaschine bezeichnet man eine für viele Verwendungszwecke vorzüglich geeignete Maschine, die mit einer Fremderregung, einer sie unterstützenden Selbsterregung und außerdem einer feldschwächenden Gegenstromwicklung versehen ist. Sie trägt daher auch den Namen Dreifeldmaschine. Man benutzt sie zur Speisung normaler, fremderregter Motoren, die unter erschwerenden Bedingungen zu arbeiten haben und z. B. beim Antrieb von Baggern und ähnlichen Maschinen öfters durch zu große Drehmomente stillgesetzt werden können. Die Prüfung der Krämermaschine erfolgt durchweg mit dem zugehörigen Motor in gemeinsamer Probe, kann aber auch mit Belastungswiderständen vorgenommen werden. Die Spannung ändert sich betriebsmäßig zwischen dem Höchstwert bei Leerlauf bis auf Null bei Kurzschluß, weshalb von einer Prüfung auf ein Netz abgesehen werden muß. Die Windungszahl der Gegenstromwicklung bestimmt die Höhe des Kurzschlußstromes, wenn die AW der Fremderregung festliegen. Fremderregung und Selbsterregung bestimmen gemeinsam den Wert der Leerlaufspannung. Alle drei Wicklungen zusammen lassen sich so abstimmen, daß ein gewünschtes Wertepaar Klemmenspannung U und zugehöriger Laststrom I erhalten wird.

Abb. 120 zeigte die Schaltung der Krämermaschine, deren Spannungskennlinie leicht auf Grund der Darstellung in Abb. 124 für alle vorkommenden Fälle erhalten werden kann. Insbesondere läßt sich der Einfluß der Stärke der einzelnen Wicklungen ohne weiteres übersehen.

Die Querfeldmaschine nach ROSENBERG. Diese Maschine wird zur Zugbeleuchtung und für Scheinwerfer, Schweißmaschinen sowie ähnliche Zwecke verwendet. Aus der schematischen Darstellung in Abb. 141 a ist der konstruktive Aufbau dieser interessanten Maschine zu erkennen. Die Pole besitzen schwach ausgebildete Schenkel, an denen besonders starke Schuhe befestigt sind. Auf dem Kommutator schleifen je Polpaar statt des üblichen einzigen Bürstensatzes zwei Sätze, die in Richtung der Polachse bzw. senkrecht zu ihr stehen. Die Bürsten quer zu den Polen sind in sich kurzgeschlossen, die beiden anderen werden zum Verbraucher geführt. In der Schaltung nach Abb. 141 b, die für Zugbeleuchtungszwecke dient, wird die Fremderregungswicklung mit der Windungszahl w_F vom Strome i_F gespeist. Das Feld der Hauptpole ruft in dem Kurzschlußkreis einen Kurzschlußstrom I_q hervor, der zur Ausbildung des durch die stark ausgebildeten Polschuhe begünstigten Ankerquerfeldes Φ_q führt. Dies ist der eigentliche Nutzfluß der Maschine. Er induziert zwischen den Arbeitsklemmen A, B die dem Verbraucher zugehende Spannung U . Der bei Belastung zum Fließen kommende Verbraucherstrom I schwächt das Längsfeld in Richtung der Hauptpole, da er den magnetisierenden $AW_F = i_F \cdot w_F$ der Fremderregewicklung mit den feldschwächenden $AW = I \cdot w'_a$ entgegenwirkt. Hierbei ist unter w'_a die Windungszahl einer der magnetisierenden Wirkung der Ankerwicklung gleichwertigen Wicklung zu verstehen. Man erkennt, daß der Kurzschlußstrom I_q fallen muß, wenn I aus irgendeinem Grund ansteigt. Wenn aber I_q fällt, sinkt auch der davon abhängige Querfluß Φ_q und mit diesem die Nutzspannung U und somit endgültig I . Um-

gekehrt wird I_q größer, wenn I zu fallen versucht. Dies hat eine Verstärkung von Φ_q , von U und letzten Endes wieder von I zur Folge. Bis auf kleine Abweichungen bleibt also der Wert des Nutzstromes I konstant, sofern der Fremderregerstrom i_F nicht verändert wird. Dies gilt ganz besonders mit Rücksicht auf die Drehzahl der Maschine, die daher in weiten Grenzen verändert werden kann, ohne daß der von der Rosenbergmaschine erzeugte Verbraucherstrom sich wesentlich ändert. Hierauf beruht die Anwendung der Maschine als Zugbeleuchtungsdynamo. Nachstehende Formeln geben einen tieferen Einblick in das Verhalten der Maschine:

$$\text{Klemmenspannung } A - B = I \cdot R' = C \cdot n \cdot \Phi_q - I \cdot R,$$

$$\text{Klemmenspannung } a - b = 0 = C \cdot n \cdot \Phi_l - I_q \cdot R,$$

$$\text{Fluß in Längsachse } \Phi_l = L_l \cdot (i_F \cdot w_F - I \cdot w'_a),$$

$$\text{Fluß in Querachse } \Phi_q = L_q \cdot (w'_a \cdot I_q),$$

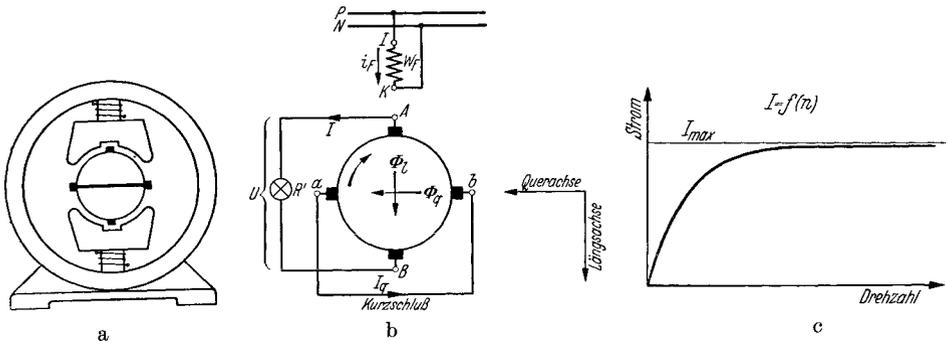


Abb. 141. Rosenbergmaschine. Aufbau (a), Schaltung als Lichtmaschine (b), Strom-Drehzahlkennlinie (c). (Bei der Schweißmaschine liegt Feldwicklung in Reihe mit dem Anker. Spannungskennlinie $U = f(I)$ verläuft dann nach anfänglichem Anstieg stark fallend.)

wobei bedeuten: R den Ankerwiderstand, R' den Belastungswiderstand, L_l den magnetischen Leitwert in Längsachse, also in Richtung der Hauptpole, L_q den magnetischen Leitwert in Querachse und w'_a wie oben die auf die Hauptpolwicklung bezogene Ankerwindungszahl. C ist die Maschinenkonstante und n die minutliche Drehzahl. Durch Umformung und Umstellung kommt man zu den Gleichungen:

$$\begin{aligned} I \cdot (R + R') &= C \cdot n \cdot L_q \cdot w'_a \cdot \frac{C \cdot n \cdot \Phi_l}{R}, \\ &= C^2 \cdot n^2 \cdot L_q \cdot L_l \cdot \frac{w'_a}{R} \cdot (i_F \cdot w_F - I \cdot w'_a), \end{aligned}$$

woraus endgültig folgt:

$$I = i_F \cdot \frac{w_F}{w'_a} \cdot \frac{C^2 \cdot n^2 \cdot L_q \cdot L_l}{C^2 \cdot n^2 \cdot L_q \cdot L_l + \frac{R}{w'_a} \cdot \frac{R + R'}{w'_a}}.$$

Man sieht also, daß auch bei Veränderung des magnetischen Leitwertes infolge von Sättigungserscheinungen der Strom doch von der Drehzahl

unabhängig bleibt, sofern der Ankerwiderstand R vernachlässigt werden kann. In diesem Fall wird der Wert des Bruches gleich 1. Da R aber doch einen endlichen Wert besitzt, so wird der Strom I bei kleinen Drehzahlen, wenn n^2 kleiner wird, abfallen und natürlich bei Stillstand zu Null werden. Abb. 141c zeigt den Strom über der Drehzahl an. Sehr häufig wird die Rosenbergmaschine als Schweißmaschine verwendet. In diesem Fall besitzt sie Reihenschlußerregung und wird mit konstanter Drehzahl betrieben. Die Klemmenspannungskennlinie verläuft nach einem anfänglichen Anstieg stark fallend und kann durch verschiedenartige Maßnahmen den jeweiligen Bedürfnissen angepaßt werden.

e) Motoren.

Der Nebenschlußmotor. Wenn der Gleichstromnebenschlußmotor (Schaltung Abb. 142a) an einem Netz konstanter Spannung U arbeitet, besteht kein Unterschied im Verhalten des fremd- oder des selbst-erregten Motors, da in beiden Fällen der Erregerstrom i unabhängig vom Ankerstrom I ist. Die Prüfung des Motors bei Belastung ist daher auch die gleiche. Man speist ihn vom Netz her und belastet ihn auf eine Prüffeldgleichstrommaschine. Wegen des feldschwächenden Einflusses, den sowohl die Ankerrückwirkung infolge der Polschuh-sättigung wie auch die Rückwirkung der Wendepole ausüben, ist bei größeren Maschinen mit neutral stehenden Bürsten fast immer mit einer gewissen Unstabilität zu rechnen, die sich im Drehzahlanstieg bei Belastung äußert. Vorsichtigerweise schiebt man daher die Bürstenbrücke zu Beginn der Messungen etwas vor, um sie später, wenn der Motor doch stabiles Verhalten zeigt, möglichst wieder in die Neutralstellung zurückzuschieben. Motoren mit Kompensationswicklung sind stabil. Man beachte, daß ein an sich unstabiler Nebenschlußmotor sich durchaus im Prüffeld stabil fahren läßt, wenn die Spannungsquelle ihrerseits fallende Kennlinie hat. An Ort und Stelle kann er aber, wenn das dortige Netz sehr steif ist (Gleichrichter), versagen. Der Motor gilt als stabil, wenn seine Drehzahl bei steigender Last und unregelmäßigem Feld dauernd abnimmt oder wenn der Erregerstrom bei gleichzuhaltender Drehzahl mit zunehmender Last dauernd geschwächt werden muß. Steigt dagegen die Drehzahl bereits bei Teillast an, so ist der Motor im allgemeinen als unstabil zu beanstanden. Dasselbe gilt, wenn der Erregerstrom bei konstanter Geschwindigkeit verstärkt werden muß, sobald die Lastübernahme erhöht werden soll. Die Unstabilität kann meistens mit einem Bürstenvorschub oder, bei Umkehrmotoren, durch Schwächung des Wendefeldes gemildert oder beseitigt werden. Größeren Erfolg erzielt man mit einer Hauptstromwicklung von einigen Windungen, grundlegenden Erfolg mit einer Kompensationswicklung, die unter Umständen nicht den ganzen Strombelag des Ankers, sondern nur etwa die Hälfte hiervon zu besitzen braucht. Unwirtschaftlich, aber mit einfachen Mitteln möglich, ist die Stabilisierung durch vorgeschaltete Ankerwiderstände.

Die grundlegende Gleichung für die Lastdrehzahl eines Motors ist folgende:

$$n(I) = n_0 \cdot \frac{U - I \cdot R}{E_{(n_0, I)}},$$

in der bedeutet: U die angelegte, konstante Netzspannung, I den Ankerstrom, R den gesamten Ankerkreiswiderstand, n_0 die Leerlaufdrehzahl und schließlich $E_{(n_0, I)}$ die EMK, welche unter Berücksichtigung der tatsächlichen Erregung und der Ankerrückwirkung durch den Strom I bei der Leerlaufdrehzahl n_0 in der Maschine induziert werden würde. Man erkennt, daß beim Fehlen jeglicher Ankerrückwirkung $E_{(n_0, I)}$ offenbar konstant bleiben muß und die Lastdrehzahl daher nur vom Ohmschen Spannungsabfall des Ankers abhängt. Sobald aber das Feld der Maschine beim Auftreten von Motorstrom durch die Ankerrückwirkung geschwächt

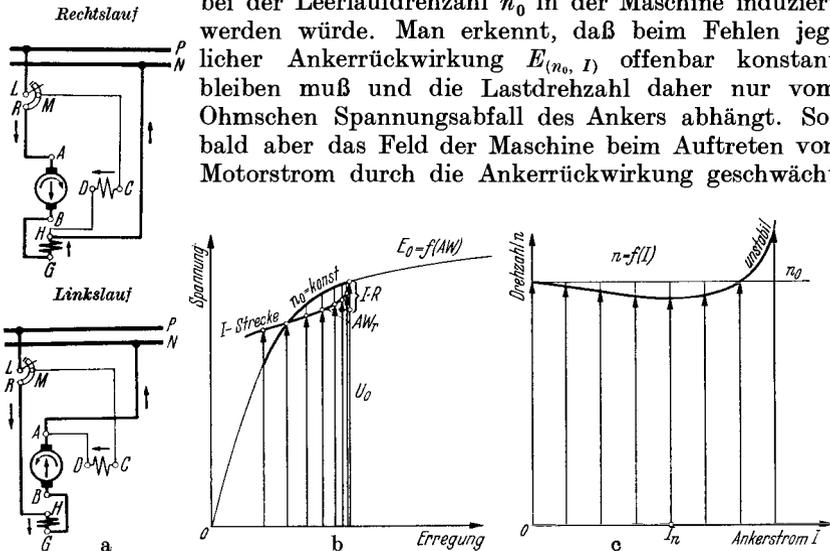


Abb. 142. Nebenschlußmotor. Schaltung (a) und Drehzahlkennlinie $n = f(I)$ (b) und (c) unter Berücksichtigung der wirklich auftretenden, quadratisch veränderlichen Ankerrückwirkung.

wird, sinkt $E_{(n_0, I)}$ mit wachsender Stromstärke ab. Wenn dieser Abfall im gleichen Maße erfolgt, wie die Schwächung der Netzspannung durch die Ohmschen Widerstände, ändert sich der Bruch in obiger Gleichung nicht und die Drehzahl des Motors erleidet keinen Abfall. Fällt $(U - I \cdot R)$ schneller als die EMK, wie dies bei kleinen Motoren unter 10 kW der Fall ist, so sinkt die Drehzahl ab. Überwiegt dagegen die Feldschwächung durch Ankerrückwirkung, so nimmt die EMK schneller ab als $(U - I \cdot R)$, und die Drehzahl steigt an. Wegen der eingangs erwähnten quadratischen Abhängigkeit der Ankerrückwirkung vom Strom I ist bei kleinen Strömen etwa bis Halblast bei vielen Motoren der Einfluß des ohmschen Spannungsabfalles der stärkere, d. h. die Motordrehzahl sinkt zwischen Leerlauf und Halblast ab. Darüber hinaus überwiegt die Ankerrückwirkung. Dies bewirkt anschließenden Drehzahlanstieg bis Vollast und darüber. Die graphische Behandlung in Abb. 142 b, c läßt dies erkennen. Wenn durch Bürstenvorschub die Ankerrückwirkung bei Vollast kompensiert wird, resultiert hieraus naturgemäß ein verstärkter Drehzahlabfall bei kleiner Last.

Die Drehzahlregelung des Nebenschlußmotors. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten der Drehzahlregelung der Gleichstrommotoren, die Regelung durch Veränderung der Ankerspannung und die Regelung durch Feldschwächung. Erstere setzt natürlich eine fremderregte Maschine voraus, letztere ist bei der fremd- und bei der selbsterregten Maschine möglich.

Die *Drehzahlregelung durch Verändern der Ankerspannung* findet meistens in der Leonard- oder weniger häufig in der Zu- und Gegen-schaltung statt. Bei der Leonardschaltung treibt ein beliebiger Motor (Gleichstrom-, Synchron-, Asynchron- oder Dieselmotor) eine Gleichstromdynamo an, deren Erregerstrom durch einen Magnetregler oder durch Spannungsregelung der Erregermaschine zwischen Null, bzw. einem Kleinstwert, und dem vollen Wert einstellbar ist. Die Spannung ist also in weiten Grenzen veränderlich. Sie wird dem zu steuernden Motor zugeführt. Dessen Erregerstrom wird von einer Fremdquelle geliefert und konstant gehalten. Die Motorleerlaufdrehzahl und nahezu auch die Lastdrehzahl ändert sich proportional der zugeführten Spannung. Man beachte, daß der geregelte Motor unabhängig von der zugeführten Spannung stets mit vollem Fluß arbeitet. Die Ankerrückwirkung ist daher im ganzen Bereich die gleiche. Zum Zwecke der Stabilisierung des Motors wird die Leonarddynamo oft mit einer feldschwächenden, zusätzlichen Hauptstromwicklung versehen.

Die *Drehzahlregelung durch Feldschwächung* kann nur in einem wesentlich kleineren Bereiche erfolgen, wobei man sich meistens auf 1:3, seltener auf 1:4 beschränkt. Der Kraftfluß wird mit zunehmender Geschwindigkeit immer stärker geschwächt. Man arbeitet also bei den hohen Drehzahlen immer mehr im ungesättigten Teil der magnetischen Kennlinie. Daher ändert sich die Ankerrückwirkung auch beträchtlich, und zwar nimmt sie im allgemeinen noch zu. Dies bedeutet aber wachsende Gefahr der Unstabilität des feldgeschwächten Motors, der auch manchmal zum Durchgehen neigt. Eine grundsätzliche, weitere Gefahr wird durch die wachsende *maximale Segmentspannung* gegeben, die bei Feldschwächung stark zunimmt und deretwegen die Stromstärke meistens ganz beträchtlich bei der hohen Drehzahl reduziert werden muß. Unter maximaler Segmentspannung versteht man die höchste Spannung, die zwischen zwei Segmenten auftreten kann. Wegen der Feldverzerrung bei Last ist die Segmentspannung unter der auflaufenden Polkante des Motors, die hochgesättigt ist, wesentlich höher als die mittlere Spannung unter dem Polbogen.

Bei der Drehzahlregelung durch Spannungsänderung bleibt der Kraftfluß und der zulässige Strom des Ankers der gleiche. Dies bedeutet aber, daß die Leistung der Maschine mit wachsender Geschwindigkeit im gleichen Maße ansteigt oder aber, daß das Drehmoment unabhängig von der Regelung einen konstanten Wert besitzt. Der Motor wird also unten und oben gleichmäßig gut ausgenutzt.

Bei der Drehzahlregelung durch Feldschwächung wird der Kraftfluß geschwächt. Bei gleichbleibender Stromstärke würde also die Leistung konstant bleiben, das Drehmoment also mit steigender Drehzahl ab-

sinken. Tatsächlich muß aber meistens der Strom verringert werden, wodurch auch die Leistung des Motors bei steigender Geschwindigkeit zurückgeht, das Drehmoment mithin noch stärker fällt. Die Ausnützung dieses Motors ist mithin um so schlechter, je weiter die Drehzahl durch die Feldschwächung getrieben wird. Dies bedeutet, daß der Motor, wenn eine gewisse Leistung bei hoher Drehzahl verlangt wird, ganz bedeutend überdimensioniert werden muß. Drehzahlregelung durch

Feldschwächung ist also besonders dort am Platze, wo wohl die hohe Geschwindigkeit, diese aber bei stark verringertem Drehmoment verlangt wird.

Der Nebenschlußmotor mit zusätzlicher Hauptstromwicklung (Kom poundmotor). Zum Zwecke der Stabilisierung erhalten größere Motoren, die aus wirtschaftlichen Gründen noch nicht mit einer Kompen-

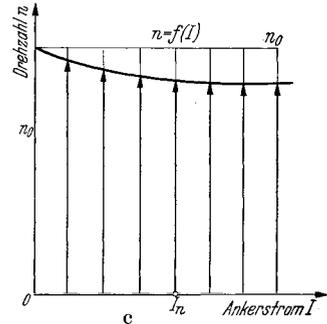
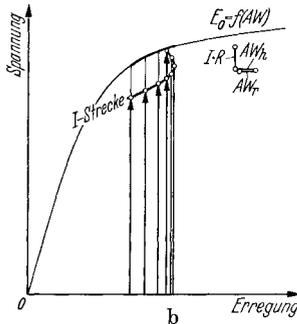
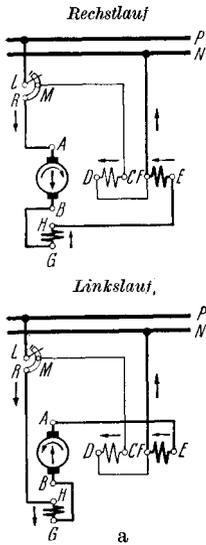


Abb. 143. Nebenschlußmotor mit zusätzlicher Hauptstromwicklung. Schaltung (a) und Drehzahlkennlinie $n = f(I)$ (b) und (c), unter Berücksichtigung der wirklich auftretenden, quadratisch veränderlichen Ankerrückwirkung.

sationswicklung ausgerüstet werden, recht häufig eine zusätzliche Hauptstromwicklung von wenig Windungen. Ihre Schaltung ist in Abb. 143 a dargestellt. Da diese Wicklung feldverstärkend wirkt, sinkt die Drehzahl des belasteten Motors mit der Last ab. Die Prüfung kann also in jeder beliebigen Prüfanordnung erfolgen. Zuvor muß natürlich der richtige Sinn der Hauptstromwicklung geprüft werden, sei es nach der induktiven Methode nach S. 8 oder durch vorsichtiges Belasten des Motors unter sorgfältiger Beobachtung der Motordrehzahl. Bleibt diese konstant oder steigt sie mit der Last an, so wirkt die Hauptstromwicklung falsch. Fällt sie dagegen merklich ab, so wirkt sie richtig. Die zeichnerische Ermittlung der Drehzahlkennlinie ist sehr genau und schnell nach der Anleitung in Abb. 143 b, c durchzuführen.

Bei großen Motoren mit normalem Luftspalt kann die Ankerrückwirkung ab $\frac{3}{4}$ Last bereits so stark werden, daß auch durch eine Hauptstromzusatzwicklung beliebiger Stärke der Motor nicht mehr stabilisiert werden kann. Die anfänglich recht stark fallende Drehzahlkennlinie kehrt bei $\frac{3}{4}$ bis $\frac{1}{1}$ Last um und steigt bei höheren Lasten an. Eine solche Maschine verhält sich dann am starren Netz unbrauchbar, kann

aber zusammen mit einer Leonarddynamo, die fallende Spannungs-kennlinie hat, durchaus stabil arbeiten. Stellt sich bei der Prüfung also eine Unstabilität heraus, so sind, bevor grundlegende Änderungen am Motor getroffen werden (Kompensationswicklung!), doch noch die tatsächlichen Betriebsverhältnisse zu überprüfen.

Zu erwähnen ist, daß bei Drehrichtungswechsel des Motors, die durch Umkehr der Ankerpolarität erfolgt, die Hauptstromwicklung umgeschaltet werden muß, damit sie ihre feldverstärkende Wirkung beibehält.

Der Hauptschlußmotor. Der Hauptschlußmotor, dessen Schaltung Abb. 144a wiedergibt, besitzt nur eine vom Ankerstrom I durchflossene Erregerwicklung. Der Kraftfluß des Motors hängt also von der Belastung ab, und deshalb sinkt die Drehzahl mit steigendem Ankerstrom stark ab. Man spricht all-

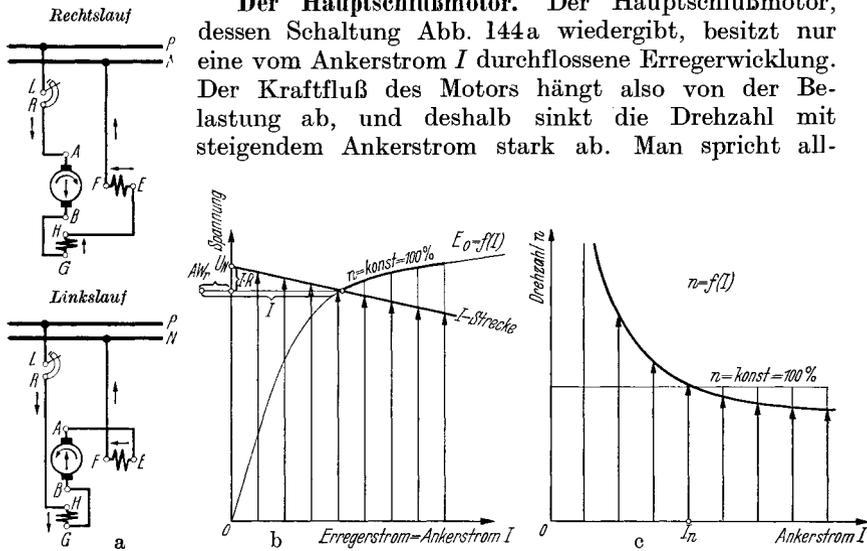


Abb. 144. Hauptstrommotor, Schaltung (a) und Drehzahlkennlinie $n = f(I)$ (b) und (c).

gemein vom Hauptstromverhalten. Ein Leerlauf des Hauptstrommotors ist unmöglich, da der entlastete Motor theoretisch der Drehzahl unendlich, praktisch einer aus mechanischen Gründen unzulässigen Durchgangsdrehzahl zustrebt. Die Prüfung muß daher mit der notwendigen Sorgfalt durchgeführt werden, die jede ungewollte Entlastung vermeidet. Am besten fährt man den Motor fremderregt, indem man die Erregerwicklung aus dem Ankerstromkreis entfernt und über regelbare Widerstände fremd speist. Stellt man den Erregerstrom dann jeweils auf den gleichen Wert wie den Ankerstrom ein, so erhält man dieselben Lastpunkte wie bei Nennbetrieb, aber mit einer Maschine, die sich wie eine Nebenschlußmaschine verhält. Da die hohe Erregerstromstärke mitunter schwierig zu beschaffen und zu regeln ist, ist man doch manchmal gezwungen, die Prüfung in der normalen Schaltung durchzuführen. Man belastet dann am besten auf einen Prüffeldgenerator, der seinerseits auf Widerstände arbeitet. Diese justiert man von vornherein so ein, daß die Belastungsmaschine bei Nennerregung mit etwa der Nennleistung des Probemotors belastet wird. Bevor der Hauptstrommotor angelassen wird, schaltet man die

Erregung der Belastungsmaschine ein. Der hochfahrende Motor wird also sofort belastet und läuft nach Kurzschließen des Anlassers etwa mit Nenndrehzahl um. Durch Regeln des Belastungswiderstandes und des Erregerstromes des Generators können vorsichtig weitere Lastpunkte eingestellt und abgelesen werden. Meistens ist die höchste Entlastungsdrehzahl vorgeschrieben, die man durch weiteres Entlasten einstellt. Bei der vorgeschriebenen Schleuderprobe, die noch 20% über der höchsten Betriebsdrehzahl liegt, ist mit besonderer Sorgfalt zu verfahren, da der Hauptstrommotor bei allzu schroffer Entlastung gern zu Überschlügen des Stromwenders neigt. Gegen das Durchgehen bei völliger Entlastung kann der Motor durch Zentrifugalschalter geschützt werden, die ebenfalls im Prüffeld auf die vorgesehene Auslösegeschwindigkeit eingestellt werden.

Eine Drehzahlregelung der vollbelasteten Maschine ist in gewissem Umfange nach oben durch Abzweigung von Feldstrom möglich. Hierzu ist ein niedrigohmiger Widerstand parallel zur Feldwicklung nötig, der in ein oder mehreren Stufen einstellbar ist. Man macht von dieser Art der Feldschwächung nur selten Gebrauch.

Motoren für Fahrzeuge und Hebezeuge können auch zusammen mit den Schaltgeräten geprüft werden, indem man sie auf hochzufahrende Schwungmassen belastet. Auf diese Weise kommt man zu einer dem tatsächlichen Betriebszustande gleichwertigen Prüfung.

Die zeichnerische Ermittlung der Drehzahlkennlinie ist aus Abb. 144 b zu entnehmen. Die entzerrte Drehzahlkennlinie ist in Abb. 144 c über dem Strom aufgetragen. Häufig wird die Drehzahl über dem Drehmoment wiedergegeben. Zu diesem Zwecke errechnet man nach den Angaben der S. 204 zu jedem Strom I und der zugehörigen EMK E' bei n' Uml/min das Drehmoment zu: $Md = (E'/n') \cdot (I/1,03)$ und trägt die wirkliche Drehzahl n darüber auf.

d) Spannungsteilung.

Dreileiternetze, die zwischen den Außenleitern die volle und zwischen jedem Außenleiter und dem Mittelleiter die halbe Spannung besitzen, werden entweder durch eine einzige Maschine mit Spannungsteilung oder durch sog. Ausgleichsätze gespeist. Durch geeignete Verteilung der Verbraucher wird eine gleichmäßige Belastung beider Netzhälften angestrebt, wodurch der Mittelleiter möglichst entlastet wird. Es gelingt hierdurch, dessen Strom auf etwa 15 bis 25% des Außenleiterstromes zu begrenzen. Für diesen Strom sind dann die Maschinen auszulegen.

Die Gleichstrommaschine mit Spannungsteilung. In Abb. 145 ist die Schaltung eines Gleichstromgenerators für Spannungsteilung wiedergegeben. Die Ankerwicklung ist an zwei um genau 180° versetzten Punkten angezapft und mit zwei Schleifringen verbunden. Maschinen mit mehreren Punkten gleichen Potentials (Schleifenwicklung!) erhalten entsprechend viele Verbindungen zu den Ringen. An die Ringe ist außen eine Drosselspule angeschlossen, deren Mittelanzapfung den Anschlußpunkt für den Mittelleiter darstellt. Der Mittelleiterstrom verteilt sich auf die beiden Drosselhälften und fließt über die Schleifringe der Ankerwicklung zu.

Die Prüfung wird wie bei jeder normalen Maschine durchgeführt und nur durch die Messung der an den Schleifringen auftretenden Leerlaufspannung ergänzt. Diese beträgt bei Maschinen mit zwei Ringen theoretisch bei sinusförmigem Feld $0,5 \cdot \sqrt{2}$, in Wirklichkeit aber etwa 0,75 der Gleichspannung. Wenn die Ankerwicklung keine Anschlußpunkte von genau 180° Versetzung besitzt, wie es z. B. bei der Reihenwicklung der Fall ist, so wählt man drei um 120° versetzte Punkte, die zu drei Schleifringen geführt sind. Zur Spannungsteilung dient dann eine dreiphasige Drossel. Die Spannung zwischen den Ringen beträgt theoretisch $0,5 \sqrt{2} \cdot 0,5 \sqrt{3} = 0,61$, in Wirklichkeit aber etwa 0,65 der Gleichspannung. Bei falschem Anschluß der Schleifringe ist dem Null-

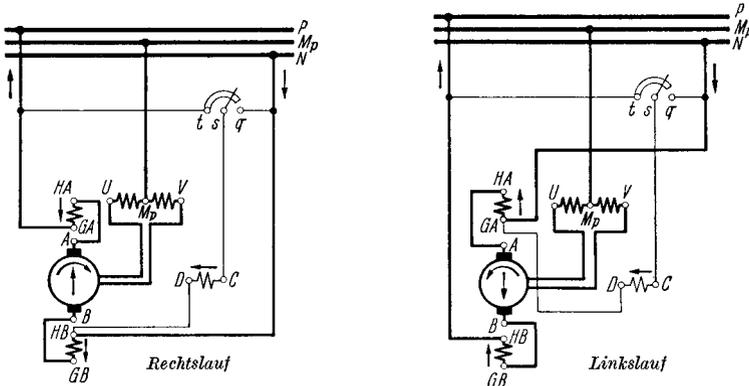


Abb. 145. Dreileiter-Nebenschlußgenerator mit zweiphasigem Spannungsteiler (Drosselspule).

punkt eine kleine Wechselfspannung überlagert, die bei nicht zu hoher Frequenz zum Flimmern der zwischen Außen- und Mittelleiter angeschlossenen Lampen führt. Man nimmt daher auch die auf S. 227 beschriebene Flimmerprobe mit Lampen an der Spannungsteilermaschine vor.

Ausgleichsätze. Die Ausgleichsätze dienen der Spannungsteilung eines bereits vorhandenen Netzes, welches häufig von einem drehstromgespeisten Gleichrichter gespeist wird. Sie bestehen aus zwei völlig gleichen, miteinander gekuppelten Gleichstromnebenschlußmaschinen, die oft mit einer oder zwei zusätzlichen Hauptstromerregewicklungen versehen sind. Abb. 146a zeigt die einfachste Schaltung ohne Doppelschlußerregung. Bei unbelastetem Mittelleiter laufen beide Maschinen als leerlaufende Motoren. Die volle Netzspannung liegt je zur Hälfte an den Klemmen der Maschinen. Wird die eine Netzhälfte stärker belastet, so geht die dort angeschlossene Ausgleichmaschine in den Generatorbetrieb über, während die andere zum Motor wird. Motorstrom I_{mot} und Generatorstrom I_{gen} ergeben zusammen den Mittelleiterstrom I_M . Wegen der unvermeidlichen Verluste ist I_{mot} größer als I_{gen} . Es gilt genau:

$$I_{\text{mot}} + I_{\text{gen}} = I_M,$$

$$I_{\text{mot}} \cdot \eta_{\text{mot}} = \frac{I_{\text{gen}}}{\eta_{\text{gen}}},$$

sofern die Spannungen beider Netzhälften einander gleich sind.

Die Netzspannungen werden sich infolge der einseitigen Mehrbelastung etwas ändern, und zwar sinkt die Spannung der stärker belasteten Seite etwas ab, während die Spannung in der anderen Netzhälfte ansteigt. Aus diesem Grunde werden die Erregerwicklungen gekreuzt angeschlossen. Der Generator erhält also verstärkten Erregerstrom und seine Spannung steigt wieder etwas an. Der Motor erhält schwächeren Erregerstrom, seine Drehzahl steigt. Beides wirkt im Sinne einer besseren Spannungs Konstanz.

Diese kann durch eine Kompoundierung der Maschinen noch wesentlich gesteigert werden. Abb. 146 b gibt eine recht gute Schaltung wieder. Jede Maschine besitzt eine kleinere Hauptstromwicklung, die vom eigenen und eine größere Hauptstromwicklung, die vom anderen Ankerstrom durchflossen wird. Resultierend verbleibt eine Feldverstärkung des Generators, während das Motorfeld wegen der Verschiedenheit der Windungszahl und der Ankerströme praktisch unverändert bleibt. Die Spannungen der beiden Netzhälften ändern sich zwischen unbelastetem und vollbelastetem Mittelleiter nur um 1 bis 2%. Der

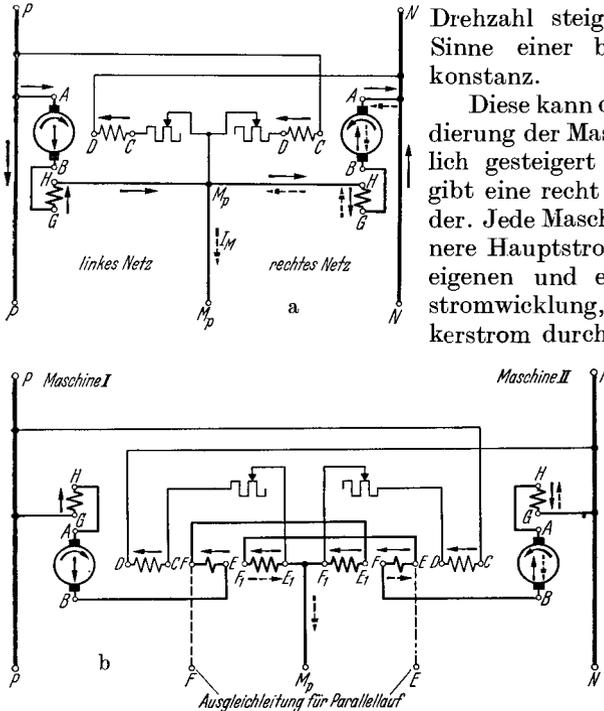


Abb. 146. Ausgleichsaggregat. Maschinensatz mit kreuzweise erregter Nebenschlußwicklung (a) und Satz mit doppelter Kompoundierung zum Anlauf ohne Anlasser (b). (Wicklung $E_1 F_1$ ist stärker als Wicklung $B F$.) Ausgezogene Pfeile = motorischer Strom, beim Anlauf und beim Leerlauf, wenn $I_M = 0$. Gestrichelte Pfeile = generatorischer Strom, wenn rechtes Netz stärker belastet ist.

Vorzug der doppelt vorgesehenen Hauptstromwicklungen liegt in der Möglichkeit, das Aggregat ohne Anlasser anzufahren. Während des Hochlaufes fließt der gleiche motorische Strom I_{mot} durch beide Maschinen und alle vier Hauptstromwicklungen. Wie man sieht, wirken sie alle feldverstärkend und daher drehmomentbildend. Die Stromaufnahme wird dadurch auf einen erträglichen Wert begrenzt, da der Hochlauf selbst auf Bruchteile einer Sekunde verkürzt wird.

Die Prüfung der Ausgleichsätze erfolgt im Prüffeld. Zuerst wird an beiden Maschinen bei peinlich konstant gehaltener Drehzahl die Leerlaufkennlinie bei steigenden Werten des Erregerstromes bestimmt.

Beide Kurven müssen völlig miteinander übereinstimmen. Weichen sie etwas voneinander ab, so werden sie durch Luftspaltänderung genau abgestimmt. Dann erfolgt die Belastungsaufnahme als Motor und als Generator in der endgültigen Drehrichtung der einzelnen Maschine. Man beachte, daß die eine rechts, die andere links umläuft. Auch die Belastungskennlinien müssen genau übereinstimmen. Etwaige, wenn auch geringe Abweichungen werden durch Bürstenverschiebung an einer der beiden Maschinen beseitigt. Da Ausgleichsaggregate zum Durchgehen neigen, schiebt man die Bürsten beider Maschinen in der Regel von vorneherein um etwa $1/2$ bis 1 Segment vor.

Wenn beide Maschinen auf diese Weise durchgeprüft und abgestimmt sind, erfolgt die endgültige Zusammenschaltung, nachdem man vorher den richtigen Wickelsinn der Kompoundwicklungen nach der induktiven Methode bestimmt hat. Die Belastung erfolgt zweckmäßig auf einen Widerstand, der für den vollen Mittelleiterstrom gleich der Summe aus Nennmotor- und Nenngeneratorstrom und die Spannung einer Maschine bestimmt ist. Dieser Widerstand wird durch einen Umschalter von der einen auf die andere Maschine umgeschaltet. Man kann so die Betriebsverhältnisse des leer laufenden Satzes und des wahlweise links oder rechts belasteten Netzes nachahmen. Man beachte, daß sich beim Umlegen des Widerstandes die Stromrichtungen in beiden Ankern und im Widerstand umkehren. Gemessen werden die Spannungen beider Anker, die Gesamtspannung, welche man möglichst konstant hält, und die drei Ströme I_{mot} , I_{gen} und I_M . Das Ergebnis wird nach Art der Abb. 147 dargestellt. Die Kurvenäste müssen rechts und links miteinander übereinstimmen. Durch Änderung der Drehzahl des Aggregates kann man die Sättigungsverhältnisse beeinflussen und unter Umständen zu einer noch besseren Spannungsteilung zwischen Leerlauf und Vollast des Mittelleiters kommen.

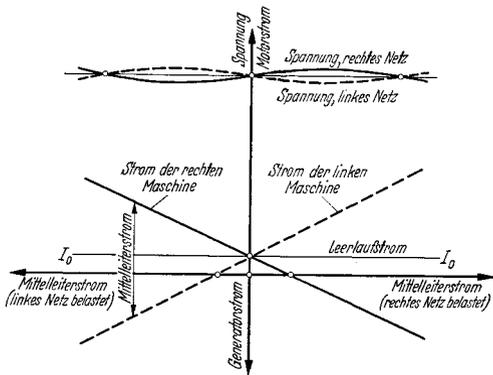


Abb. 147.
Kennlinien eines komponentierten Ausgleichsaggregates.

E. Der Einankerumformer.

Aufbau. Der Einankerumformer stellt die Vereinigung einer Synchron- und einer Gleichstrommaschine dar. Der Ständer besitzt ausgeprägte Pole, die meistens nur eine Nebenschlußwicklung für Selbst-, seltener für Fremderregung tragen. Mitunter wird eine schwache Hauptstromwicklung vorgesehen. In den Polschuhen liegen Dämpferstäbe, die durch Brücken oder Ringe zu einem geschlossenen Käfig verbunden werden.

Die Wendepole zeichnen sich durch einen besonders großen Luftspalt aus, der durchweg in einen inneren Spalt am Anker und einen äußeren Spalt am Joch unterteilt ist. Ihre Windungszahl ist etwas geringer als die der Gleichstrommaschine, da die Anker-*AW* in der Pol-lücke sich zum großen Teil aufheben. Man rechnet mit etwa 14% Ankerrestfeld bei Drehstrom-Gleichstrombetrieb und etwa 20% bei umgekehrtem Betrieb.

Der Anker besitzt den normalen Aufbau des Gleichstromankers. Die Wicklung ist zu einem Kommutator geführt. Regelmäßig verteilte Anzapfungen führen zu Schleifringen. Am Kommutator tritt bei Synchronlauf Gleichspannung und an den Schleifringen Wechselspannung auf.

Durch seinen Aufbau ist der Einankerumformer befähigt, als Synchron-generator, als Synchronmotor, als Gleichstrom-generator, als

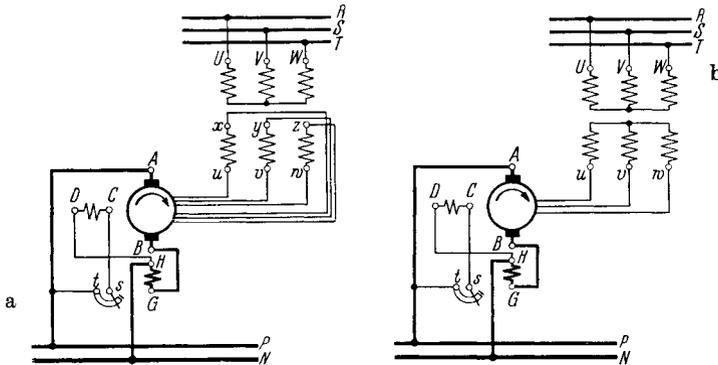


Abb. 148. Schaltung des sechsphasigen (a) und des dreiphasigen (b) Einankerumformers.

Gleichstrommotor oder aber gleichzeitig als Synchron- und Gleichstrommaschine zu arbeiten.

Fast ausschließlich wird er als Umformer ankommender Wechselstromleistung in Gleichstromleistung verwandt. Er läuft dann gleichzeitig als Synchronmotor und als Gleichstromgenerator. Diese Betriebsart unter Verwendung von Drehstrom auf der Wechselstromseite sei im folgenden vorausgesetzt. Seltener wird er zur Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom benutzt. Man spricht dann von Rückarbeit.

Die Anwendung als Doppelstromgenerator, wobei er Wechselstrom und Gleichstrom liefert und eines Antriebes bedarf, gehört zu den Ausnahmen ohne praktische Bedeutung.

Die Schaltung des Umformers zeigt Abb. 148.

Das Übersetzungsverhältnis. Das Verhältnis der schleifringseitigen Wechselspannung zu der Gleichspannung am Stromwender ist, wenn man von dem kleinen Spannungsabfall absieht, konstant, da beide Spannungen in der gleichen Wicklung vom gleichen Feld erzeugt werden. Wenn ein sinusförmig verteiltes Feld zugrunde gelegt wird, kann die Spannung am Kommutator und zwischen zwei beliebigen gelegenen Anzapfungen

als Durchmesser und als Sehne eines Kreises dargestellt werden. Abb. 149 zeigt die Darstellung für den einphasigen, den dreiphasigen und den sechsphasigen Umformer. Da die Wechselspannung mit ihrem Effektivwert angegeben wird, erscheint sie in der Darstellung, die die Maximalwerte ergibt, um das $\sqrt{2}$ fache zu groß. Man erhält die Effektivwerte, wenn man die Durchmesserspannung gleich der Gleichspannung geteilt durch $\sqrt{2}$ setzt. Hieraus folgt für die Spannungsübersetzung \ddot{u}_U

$$\ddot{u}_U = \frac{\text{Spannung zwischen zwei benachbarten Anzapfungen}}{\text{Gleichspannung}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sin\left(\frac{180^\circ}{\text{Zahl der Schleifringe}}\right).$$

Dieser Wert ist bei nichtsinusförmig verteiltem Feld mit dem Faktor Φ_1/Φ malzunehmen, wobei Φ_1 die Grundwelle des Flusses und Φ den Fluß bedeuten. Die Zahl der Schleifringe stimmt mit der Zahl der Phasen überein, außer im Falle des einphasigen Umformers. Obige Formel gilt aber auch für diesen Fall.

Die Spannung zwischen zwei um 180° el versetzten Punkten der Ankerwicklung heißt die Durchmesserspannung U_\varnothing . Sie ist unabhängig von der Phasenzahl und wird berechnet zu:

$$\text{Durchmesserspannung} = \frac{\text{Gleichspannung}}{\sqrt{2}}$$

$$= 0,707 \cdot \text{Gleichspannung},$$

$$U_\varnothing = \frac{U_{gl}}{\sqrt{2}}.$$

Bei dem weitaus am meisten gebauten sechsphasigen Umformer tritt die Durchmesserspannung zwischen den Ringen U und X , V und Y , W und Z auf, sofern alle Anschlüsse wie üblich um 60° el versetzt sind. U, V, W sind ebenso wie X, Y, Z untereinander stets um genau 120° el versetzt. Nur bei Reihenwicklungen liegen U und X und die anderen entsprechenden Ringe nicht genau um 180° el auseinander, da zugehörige Punkte der Wicklung nicht auf einer Seite des Ankers auftreten.

Der den Schleifringen zufließende Strom setzt sich aus dem Wirkstrom, der der umzuformenden Wirkleistung entspricht, und dem Blindstrom, der zu der dem Wechselstromnetz entnommenen oder an dieses zurückgegebenen Blindleistung gehört, zusammen. Bei der verlustlos gedachten Maschine, bei der also $\eta = 100\%$ ist, muß die Wechselstromwirkleistung gleich der Gleichstromleistung sein. Es gilt also:

$$m \cdot \frac{U_\varnothing}{2} \cdot I_{\text{schl}} \cdot \cos \varphi = U_{gl} \cdot I_{gl},$$

woraus folgt

$$I_{\text{schl}} = I_{gl} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{m \cdot \cos \varphi}.$$

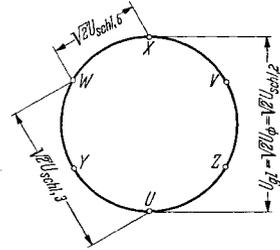


Abb. 149. Die Spannungen des idealen Umformers mit sinusförmig verteiltem Feld. Die Sehnenlängen zwischen den Anzapfungen geben das Maß für den Scheitelwert der dort auftretenden Spannungen, wenn der Durchmesser gleich der Gleichspannung gesetzt wird, bzw. den Effektivwert, wenn der Durchmesser gleich der Gleichspannung geteilt durch $\sqrt{2}$ gesetzt wird. $U_{\text{schl},6}$ gilt für den sechsphasigen, $U_{\text{schl},3}$ für den drei- und $U_{\text{schl},2}$ für den einphasigen Umformer.

Es bedeuten hierbei: m die Zahl der Schleifringe (über 2 also auch die Zahl der Phasen), U_{\varnothing} die Durchmesserspannung, I_{schl} den den Schleifringen von außen zufließende Wechselstrom, $\cos\varphi$ den Leistungsfaktor, U_{gl} und I_{gl} Spannung und Strom der Gleichstromseite.

Der Blindstrom ist von der Höhe des Gleichstromes natürlich unabhängig. Er kann durch Über- oder Untererregung beim Vorhandensein eines starren Wechselstromnetzes wie bei jeder Synchronmaschine beliebig eingestellt werden. Bevorzugt wird ein Betrieb mit $\cos\varphi = 1$ im Netz, wobei also der Blindstrom im Netz verschwindet, der Umformer aber den Magnetisierungsstrom des stets vorgeschalteten Transformators zu decken hat. Er läuft dann etwas übererregt mit einem $\cos\varphi$ von rund 0,97 bis 0,95.

Die Speisung des Umformers erfolgt ausschließlich über einen Transformator, der die Netzspannung auf den Wert der durch die gewünschte Gleichspannung vorgeschriebenen Schleifringspannung umzuspannen und die Änderung der Phasenzahl vorzunehmen hat. Der normale dreiphasige Transformator dient bei verketteter Sekundärwicklung zur dreiphasigen und bei offener Sekundärwicklung zur sechsphasigen Speisung des Umformers. Zwölf Sekundärphasen können mit Hilfe von zwei Transformatoren mit primärer Dreieck- und Sternschaltung gewonnen werden. Der zwölfphasige Umformer spielt keine Rolle.

Der Strom im speisenden Drehstromnetz errechnet sich unter Berücksichtigung des Netz- $\cos\varphi$ und des Gesamtwirkungsgrades η zu:

$$I_{\text{netz}} = \frac{U_{\text{gl}} I_{\text{gl}}}{\sqrt{3} U_{\text{netz}} \eta \cos\varphi}.$$

Die praktischen Werte der Übersetzung. Infolge des nicht sinusförmig verteilten Feldes und der auftretenden Verluste gelten folgende, etwas von den theoretischen Werten abweichende Übersetzungen für Strom und Spannung des Umformers bei Wechselstrom-Gleichstrom-Betrieb:

Anzahl der Ringe . . .	2	3	6
Anzahl der Phasen . . .	1	3	6
$\ddot{u}_U = U_{\text{schl}}/U_{\text{gl}}$	0,75	0,65	0,375
$\ddot{u}_{U_{\varnothing}} = U_{\varnothing}/U_{\text{gl}}$	0,75	—	0,75
$\ddot{u}_I = I_{\text{schl}}/I_{\text{gl}}$	1,414	0,943	0,472

Das Stromübersetzungsverhältnis gilt für einen mittleren Wirkungsgrad von 95% und $\cos\varphi = 1,0$ an den Schleifringen.

Die Drehzahl des Einankerumformers. Wenn der Umformer an einem Wechselstromnetz konstanter Frequenz liegt, ist seine Drehzahl wie die jeder Synchronmaschine:

$$n_{\text{syn}} = \frac{120}{2p} \cdot f, \quad \text{mit } f = \text{Frequenz, } 2p = \text{Polzahl.}$$

Er ist an diese Synchrondrehzahl gebunden. Auf Änderungen des Erregerstromes spricht der Umformer nicht an. Diese grundsätzliche Abweichung vom Verhalten der normalen Gleichstrommaschine erklärt sich daher, daß die wirksame Erregung nicht allein von der strom-

durchflossenen Erregerwicklung auf den Polen, sondern zusätzlich von den Längs- AW des Ankers aufgebracht wird. Sie wirken feldschwächend, wenn der Umformer Blindleistung an das Netz abgibt, feldverstärkend, wenn er solche aufnimmt.

Diese Verhältnisse sind von der Synchronmaschine her bekannt. Der untererregte Umformer verschafft sich also die fehlenden Erreger- AW durch Blindstromaufnahme, der übererregte Umformer schwächt seine Erregung durch Blindstromabgabe. Der Fluß ist praktisch konstant und seine Höhe wird nur von der den Schleifringen zugeführten Wechselspannung bestimmt.

Arbeitet der Umformer auf ein unselbständiges Wechselstromnetz, das nur von ihm selbst gespeist wird, so ist seine Drehzahl keineswegs mehr konstant. Die Frequenz ändert sich mit ihr nach der Beziehung:

$$f = \frac{2p \cdot n}{120}.$$

Die Leerlaufdrehzahl stellt sich nach den gleichen Gesetzen, wie sie für den normalen Gleichstrommotor gelten, ein. Sie kann bei konstanter Gleichspannung durch Feldregelung erhöht und gesenkt werden. Bei Belastung auf Wirklastverbraucher ändert sich die Drehzahl nur wenig. Sobald aber Blindlastverbraucher hinzutreten (Asynchronmotoren), steigt die Geschwindigkeit stark an, da der abgegebene Blindstrom entmagnetisierend wirkt. Das Feld muß verstärkt werden. Im Falle der seltenen Speisung von Kondensatoren würde die Umformerdrehzahl bei Last abfallen.

Der Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb kommt nicht häufig vor. Bei Störungen im speisenden Wechselstromnetz und normaler Betriebsweise kann er unerwünschterweise eintreten. Bleibt nämlich der Wechselstrom aus irgendwelchen Gründen weg und hängen primärseitig parallel zum Umformer noch andere Verbraucher, wie z. B. Asynchronmotoren, so tritt bei Aufrechterhaltung der Gleichspannung, etwa durch Gleichstrommotoren, Rückarbeit ein. Die auslaufenden Gleichstrommotoren speisen über den Umformer die Asynchronmotoren, die durch ihren Blindstrom das Feld des Umformers schwächen. Dieser geht hoch. Die damit verbundene Drehzahlsteigerung kann ihn gefährden und wird daher häufig durch einen angebauten Zentrifugalschalter vermieden. Dieser schaltet die Gleichstromseite ab.

Die Spannungsregelung. Infolge der starren Beziehung zwischen Wechsel- und Gleichspannung des Umformers werden alle Spannungsschwankungen des speisenden Netzes voll in das gespeiste Netz übertragen. Oft ist daher eine Regelung der Spannung erwünscht. Sie kann grundsätzlich auf vier verschiedene Arten erreicht werden, von denen aber nur die Drosselregelung und jene mittels Drehregler Bedeutung besitzen, während der Umformer mit Zusatzmaschine und der mit Spaltpolen keine Bedeutung mehr haben.

Zusatzmaschine: In Reihe mit dem Umformer wird auf der Wechselstrom- oder auf der Gleichstromseite eine Zusatzmaschine gelegt, die den vollen Strom führt und deren Spannung zwischen einem positiven

und einem negativen Höchstwert geregelt werden kann. Wenn diese Maschine ihren Antrieb vom Umformer selbst erhält, wie es bei der synchronen Zusatzmaschine der Fall ist, so muß dieser ein motorisches oder ein generatorisches Drehmoment aufbringen. Es tritt ein entsprechendes Ankerquerfeld auf, wodurch ohne besondere Maßnahmen die Stromwendung empfindlich gestört wird. Diese Zusatzmaschinen werden nicht mehr gebaut.

Drosselspule: Bei verhältnismäßig kleinen Regelbereichen wird vorteilhafterweise eine wechselstromseitig vorgeschaltete Drossel benutzt. Der in ihr vom Wirkstrom hervorgerufene Spannungsabfall wirkt fast nur phasenverdrehend auf die Schleifringspannung ein. Der vom Blindstrom erzeugte Abfall liegt in Richtung der Schleifringspannung. Bei Blindstromaufnahme, also bei Untererregung, verringert sich die Spannung an den Schleifringen, und bei Blindstromabgabe, also bei Übererregung, wird die Schleifringsspannung erhöht. Praktisch führt also die Erhöhung des Erregerstromes zur Erhöhung der Gleichspannung und seine Verringerung zu ihrer Erniedrigung. Dieser an sich bequemen, einfachen und billigen Art der Regelung ist eine Grenze durch den schlechter werdenden Leistungsfaktor des Umformers gesetzt, der zur Verringerung des Wirkungsgrades führt. Außerdem läßt sich natürlich im Netz nicht mehr beliebig der Leistungsfaktor 1,0 einstellen. In der Praxis findet die Drosselregelung häufig Anwendung. Bei einer Regelung um $\pm 5\%$ verwendet man eine Drossel von rund 20% Spannungsabfall, bezogen auf Nennstrom. Der benötigte Blindstrom beträgt dann etwa $\pm 25\%$ des Nennstromes. Für die Regelung der Leerlaufspannung werden dann etwa 50% an Blindstrom gebraucht.

Drehtransformator: Bei größeren Spannungsregelungen wird ein Drehregler vorgesehen, der entweder auf der Primärseite oder auf der Sekundärseite des Transformators liegt. Im ersten Fall ist er für die meist recht hohe Spannung des Netzes, im anderen Fall für den verhältnismäßig hohen Schleifringstrom auszulegen. Seine Leistung verhält sich zur aufgenommenen Umformerleistung wie (die gewünschte einseitige Spannungsänderung + der halbe Spannungsabfall von Trafo plus Umformer) zur (Nennspannung). Dies gilt für ausschließlichen Betrieb in einer Richtung. Bei Betrieb in beiden Richtungen muß der ganze Spannungsabfall eingesetzt werden. Soll die Spannung um $\pm 8\%$ geregelt werden und beträgt der Gesamtspannungsabfall zwischen Leerlauf und Vollast 4%, so ist der Drehregler für $8 + 0,5 \cdot 4$, also für 10% der aufgenommenen Umformerleistung auszulegen. Im Gegensatz zur Spannungsregelung mit Drossel ist es hierbei möglich, stets den Netzleistungsfaktor auf 1,0 zu halten. Diese Art der Regelung ist die technisch vollkommenste. Bei der Einstellung des Drehreglers (Anschluß der Netzphasen) beachte man die auf S. 138 angegebenen Richtlinien zur Erzielung des kleinsten Primärstromes.

Spaltpolumformer: Diese finden keine Anwendung mehr. In ihnen wurde durch Feldverzerrung eine Erhöhung der Gleichspannung gegenüber der zugeführten Wechselfspannung, die sich durch die Oberfelder kaum änderte, erzielt.

Die Ankerkupferverluste des Umformers. Für die Berechnung der Kupferverluste im Anker des Umformers gelten, sofern er nicht nur reinen Blindstrom führt, nicht mehr die üblichen Gleichungen. Infolge der Überlagerung des Wechsel- und des Gleichstromes verringern sich die vom Wirkstrom hervorgerufenen Verluste, während die vom Blindstrom verursachten Verluste in voller Höhe bestehen. Man kann für die Verluste, von der *Wechselstromseite* aus gesehen, setzen:

$$V_{\text{cuanker}} = m \cdot v' R_{\text{ph}} \cdot I_w^2 + m \cdot R_{\text{ph}} \cdot I_b^2,$$

wobei bedeuten:

- m die Zahl der Ringe,
- I_w den Wirkstrom je Ring,
- I_b den Blindstrom je Ring,
- R_{ph} den Widerstand einer gedachten Sternphase = $R_{\text{gl}} : (m \cdot \sin^2 \pi/m)$,
wobei R_{gl} der gleichstromseitige Ankerwiderstand ist,
- v' den Reduktionsfaktor < 1 .

Für den Reduktionsfaktor ergibt sich:

$$v' = 1 - \left(2 - \frac{\pi^2}{8}\right) \left(\frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}\right)^2 = \begin{array}{lll} 0,69 & \text{bei 2 Ringen} & \\ 0,48 & \text{,, 3 ,,} & \\ 0,38 & \text{,, 4 ,,} & \\ 0,30 & \text{,, 6 ,,} & \\ 0,25 & \text{,, 12 ,,} & \\ 0,23 & \text{,, } \infty & \end{array}$$

Bei Umformerbetrieb mit $\cos \varphi > 0$ treten mithin immer geringere Verluste auf, als wenn die gleiche Maschine mit den gleichen Strömen als Synchronmaschine betrieben würde. Dies bedeutet also, daß der Umformer mehr leisten kann als die Synchronmaschine gleicher Abmessung, wenn man von gleichen zulässigen Ankerkupferverlusten ausgeht.

In der Praxis betrachtet man die Verluste von der *Gleichstromseite* aus. Obige Verlustformel kann, da R_{ph} mit R_{gl} und der Wechselstrom mit dem Gleichstrom unmittelbar zusammenhängt, in folgende Formel umgewandelt werden:

$$V_{\text{cuanker}} = I_{\text{gl}}^2 \cdot R_{\text{gl}} \cdot v,$$

wobei R_{gl} = Widerstand zwischen den Bürsten, I_{gl} = Gleichstrom und v = Reduktionsfaktor ist.

Für den Reduktionsfaktor v ergibt sich:

$$v = 1 - \frac{16}{\pi^2} + \frac{8}{\left(m \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot \cos \varphi\right)^2}.$$

Dieser ist im Gegensatz zum Reduktionsfaktor v' auch vom $\cos \varphi$ abhängig, wodurch der in der Größe des Gleichstromes ja gar nicht enthaltene Blindstrom berücksichtigt wird. Für reinen Phasenschieberbetrieb, wo I_{gl} gleich Null wird, ergibt sich daher für v der unbrauchbare

Wert ∞ . Üblicherweise wird der Wirkungsgrad aber nur für $\cos \varphi$ gleich 1,0 berechnet. In diesem Fall gelten für v die auch in den REM angegebenen Werte:

Zahl der Ringe	= 2	3	4	6	12	}	$\cos \varphi = 1,0$
Zahl der Phasen	= 1	3	4	6	12		
v	= 1,38	0,56	0,38	0,27	0,21		

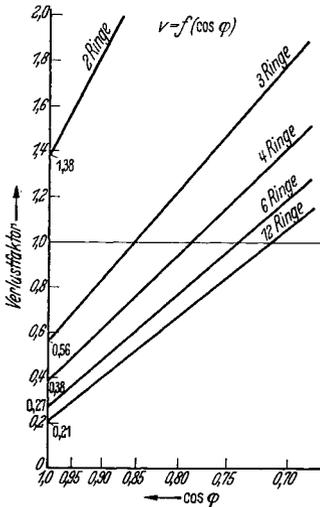


Abb. 150. Gleichstromseitiger Verlustfaktor v des Umformers.

Gemessen an dem reinen Gleichstrombetrieb werden die Verluste also bei $\cos \varphi = 1$ erst ab dreiphasigem Betrieb günstiger, und der Umformer gleicher Type leistet mehr als die Gleichstrommaschine. Sobald der $\cos \varphi$ aber von der Einheit abweicht, wie es bei Drosselregelung und auch sonst wegen der Deckung des Magnetisierungsstromes des Transformators oft der Fall ist, oder wenn der Umformer sogar Blindleistung an das Wechselstromnetz liefern soll, steigt der Wert von v stark an, wie aus den Kurven der Abb. 150 zu ersehen ist.

Die Reduktionsfaktoren sind ein Maß für den zulässigen Blindstrom bei Leerlauf und für den Ohmschen Spannungsabfall des Umformers. Es gilt:

$$\begin{aligned} \text{Zulässiger Blindstrom bei Leerlauf} \\ = \text{Nennwirkstrom} \cdot \sqrt{v}. \end{aligned}$$

Der Ohmsche Spannungsabfall des Ankers ist im allgemeinen kleiner als bei einer Gleichstrommaschine. Er beträgt:

$$\begin{aligned} \text{Ohmscher Spannungsabfall des Ankers} \\ = \text{Gleichstromwiderstand} \cdot \text{Gleichstrom} \cdot \sqrt{v}. \end{aligned}$$

Hierzu tritt der normal zu berechnende Abfall der Bürsten und der Wendepol- sowie der etwaigen Hauptstromwicklung.

Das Diagramm des Einankerumformers. Das vereinfachte Spannungs- und Stromdiagramm ist in Abb. 151 wiedergegeben. Der Ohmsche Abfall ist vernachlässigt, die Summe der induktiven Abfälle des Transformators, der Drossel oder des Drehreglers und der geringe Abfall des Umformers sind durch eine gemeinsame Streuspannung senkrecht und proportional zum — um den halben Magnetisierungsstrom des Transformators verringerten — Schleifringstrom berücksichtigt. Man erkennt, daß sich der bei Last benötigte Erregerstrom i zusammensetzt aus der algebraischen Summe aus dem Leerläufererregstrom i_0 und dem der Kompensation des Blindstromes I_b der Schleifringe dienende Anteil Δi . Mit steigender Last wächst I_b , welcher bei Leerlauf gleich dem Magnetisierungsstrom des Transformators ist, infolge der durch die Streuspannung verursachten größeren Phasenverschiebung zwischen

Selbstanlauf. Die wichtigste Anlaßart beim Mehrphasenumformer ist der Selbstanlauf vom Drehstromnetz aus, zu dem ihn sein richtig bemessener Käfig befähigt. Der Umformer wird über eine Anzapfung des Transformators an etwa 25% der vollen Spannung gelegt und läuft asynchron an. Die Erregerwicklung liegt über einem Widerstand vom 8—10fachen Eigenwiderstand am Anker. Die Stromaufnahme beträgt schleifringseitig nur 120 bis 150%, netzseitig rund 40 bis 50% des Nennstromes. Der Umformer läuft von selbst in Tritt. Hierauf wird der Anlaßwiderstand im Feldkreis kurzgeschlossen und der Feldregler auf Leerlaufstellung gebracht, die bei voller Spannung dem Netzblindstrom Null entspricht. Bei der Teilspannung ergibt sich also wegen der noch schwachen Sättigung eine geringe Übererregung. Anschließend wird auf volle Spannung übergeschaltet, wobei man bei größeren Umformern einen dreiphasigen Widerstand vor den Schleifringen benutzt, der den Überschaltstrom auf 100% des Nennstromes begrenzt. Dieser Widerstand wird kurz darauf überbrückt. Der Umformer läuft mit $\cos\varphi = 1,0$ leer am Netz und kann belastet werden. Da während des asynchronen Hochlaufes in den von den Bürsten kurzgeschlossenen Spulen eine Spannung induziert wird, die zu starkem Feuern Anlaß geben kann, ist man bestrebt, die Anlaßspannung soweit wie möglich herabzusetzen. Dies erfolgt durch Versuche.

Die Polarität. Ohne besondere Maßnahmen stellt sich an den Bürsten keine bestimmte Polarität ein. Bei kleinen Umformern legt man zwischen Gleichstromnetz und Ankerklemmen einen Umschalter, der die richtige Polarität des Netzes einzustellen gestattet. Bei größeren Umformern würde dieser Umschalter zu groß ausfallen. Man gibt also dem Umformer selbst die richtige Polarität. Dies gelingt dadurch, daß man ihn, wenn er mit falscher Polarität in den Synchronismus gelaufen ist, um eine Polteilung zurückfallen läßt. Um dies zu erreichen, wird die Erregung kurzzeitig umgepolt und dann wieder richtig eingeschaltet. Dieser Versuch darf aber nur gemacht werden, wenn der Umformer mit etwa 25% seiner Spannung läuft, da er unter voller Spannung zum Überschlag neigt. Die Gegenerrregung muß stark genug gewählt werden, damit die Reaktionskraft der Pole, die ihn im Tritt zu halten versucht, überwunden wird. Daher genügt in den meisten Fällen auch nicht das bloße Öffnen des Erregerkreises.

Wenn der Umformer dauernd von selbst seine Polarität ändert, wobei die Bürsten jedesmal kräftig feuern, so ist der Erregerkreis falsch angeschlossen oder die Drehrichtung falsch (Selbstmordschaltung). Es genügt, die Erregung umzupolen.

Durch eine kleine Fremderregung, die zu Beginn des Anlaufes schon eingeschaltet wird, kann für das Einlaufen mit richtiger Polarität in den Synchronismus gesorgt werden.

Die Prüfung. Nach der Widerstandsmessung an der kalten Maschine erfolgt die Untersuchung als leer laufender Gleichstrommotor, seltener als Synchronmotor. Ein Kurzschlußversuch wird, da der Antrieb meistens fehlt, nur ganz selten vorgenommen. Die Belastung erfolgt zusammen mit allen Zubehörapparaten. Ebenfalls wird der Dauerlauf

mit diesen gemeinsam vorgenommen. Stoßkurzschlußversuche auf der Gleichstromseite dienen gelegentlich der Untersuchung der Schnellschalter. Sie gehören keineswegs zur normalen Prüfung.

Die Widerstandsmessung. Der Widerstand der Feldwicklung, der Wendepol- und der etwa vorgesehenen Compoundwicklung wird wie üblich bestimmt. Der Widerstand der Ankerwicklung wird zweimal gemessen. Erstens auf die gleiche Weise, wie bei jeder normalen Gleichstrommaschine als Widerstand zwischen der (+)- und der (-)-Bürste bzw. zwischen zwei um eine Polteilung versetzten Segmenten und zweitens als Widerstand zwischen zwei um 180° el versetzten Ringen. Beim sechsphasigen Umformer mißt man sogar alle drei Werte zwischen den Ringen U und X , V und Y und W und Z . Diese letzteren Widerstände dürfen sich nur um wenige Prozente vom Widerstand auf der Kommutatorseite unterscheiden. Beim dreiphasigen Umformer bestimmt man den schleifringseitigen Widerstand zwischen U und V , V und W und W und U . Der gleichstromseitige Widerstand ergibt sich aus diesen Widerständen durch Malnehmen mit $\frac{9}{8}$. Allgemein ausgedrückt erhält man bei geradphasigen Umformern den gleichstromseitigen Widerstand unmittelbar als den größten zwischen zwei Schleifringen meßbaren Wert, während bei ungeradphasigen Umformern dieser noch mit $m^2:(m^2 - 1)$ malzunehmen ist.

Die Erwärmung der Ankerwicklung wird aus der Zunahme des kommutatorseitigen und des schleifringseitigen Widerstandes berechnet. Man erhält auf diese Weise eine gute Kontrolle.

Der Leerlaufversuch. Da im allgemeinen keine Antriebsmöglichkeit besteht, wird der Leerlaufversuch im Motorverfahren durchgeführt. Der Umformer liegt am Gleichstromnetz, dessen Spannung verändert wird. Die Erregung wird so nachgeregelt, daß der Umformer stets die Synchrondrehzahl besitzt. Aus den Aufnahmen von Spannung, Strom und Erregerstrom kann man die Sättigungskennlinie $E_0 = f(i)$ und die Verlustkurve $(V_{ie} + V_{rbg}) = f(E_0)$ finden.

Fährt man den leer laufenden Umformer vom Wechselstromnetz aus, so kann die V -Kurve $I_b = f(i)$ bei Nennspannung aufgenommen werden. Wenn man den Umformer an eine verringerte Spannung legt, so daß er auf dem geraden Teil der Kennlinie arbeitet, so ist es möglich, die Stromübersetzung zwischen Schleifringstrom und Erregerstrom zu ermitteln. Man erregt ihn so, daß er mit $\cos\varphi$ gleich 1 läuft, und liest den Erregerstrom i_0' ab. Dann entregt man ihn völlig und liest den dem Netz entnommenen Strom I_0' ab. Das Verhältnis I_0'/i_0' ist das gleiche, welches aus einem Kurzschlußversuch wie bei jeder Synchronmaschine als I_k/i_k gewonnen würde. Auf diese Weise gewinnt man also die Kurzschlußkennlinie $I_k = f(i)$.

Der Kurzschlußversuch. Bei der praktischen Prüfung wird kein Kurzschlußversuch durchgeführt. Die Kurzschlußkennlinie $I_k = f(i)$ kann aus dem Ergebnis des Leerlaufversuches am Wechselstromnetz bei kleiner Spannung, wie oben ausgeführt, gewonnen werden. I_0' und i_0' sind ein Wertepaar der Kurzschlußkennlinie, die als Gerade durch den Nullpunkt verläuft.

Die Untersuchung der Stromwendung. Die Stromwendung wird beim Einankerumformer nach den gleichen Gesichtspunkten wie bei der Gleichstrommaschine untersucht. Insbesondere wird die Über- oder Unterkommutierung durch Aufnahme der Bürstenspannungskurve untersucht, und ihr Grad durch Abzweigen oder Zusetzen von Strom in der Wendepolwicklung bestimmt. Besondere Untersuchungen sind bei Umformern erforderlich, welche in beiden Richtungen zu arbeiten haben: Im allgemeinen arbeitet eine Maschine, die in der einen Richtung gut Irommutiert, in der anderen nur bis etwa 25% Nennstrom einwandfrei. Soll sie bis 100% eine gute Stromwendung besitzen, so sind bei der Rückarbeit auf das Wechselstromnetz Wendepolwindungen zuzuschalten oder ein bei Betrieb nach der Gleichstromseite vorgesehener Nebenwiderstand zur Wendepolwicklung auszuschalten. Bei gleichem Wirkstrom auf der Schleifringseite unterscheidet sich nämlich der Gleichstrom um den doppelten Betrag des zur Deckung der Verluste nötigen Anteiles. Man vermeidet in der Praxis jegliche Schaltung im Ankerstromkreis, wenn man eine besondere Fremderregerwicklung auf den Wendepolen vorsieht, die von den Ankerklemmen gespeist wird. Diese wirkt schwächend auf die Wendepole bei Wechselstrom-Gleichstrom-Betrieb, verstärkend bei Gleichstrom-Wechselstrom-Betrieb. Sie kompensiert also gerade den Verluststrom; ihre AW betragen daher nur etwa 5% der vollen Wendepol- AW . Diese Wicklung braucht keinesfalls umgeschaltet zu werden.

Wenn bei Überkommutierung der Strom I_n abgezweigt werden muß, so muß der Luftspalt unter den Wendepolen auf den Wert gebracht werden:

$$\delta_{\text{neu}} = \delta_{\text{vorh}} \frac{I(w_w - 0,14w_a)}{(I - I_n)w_w - Iw_a \cdot 0,14} \approx \delta_{\text{vorh}} \cdot \frac{1}{1 - 1,16 \cdot I_n/I}.$$

Im Falle der Unterkommutierung, wo der Zusatzstrom I_z benötigt wurde, ergibt sich:

$$\delta_{\text{neu}} = \delta_{\text{vorh}} \frac{I(w_w - 0,14w_a)}{(I + I_z)w_a - I \cdot w_a \cdot 0,14} \approx \delta_{\text{vorh}} \cdot \frac{1}{1 + 1,16 \cdot I_z/I}.$$

Hierin bedeuten: w_w die Windungszahl je Wendepol, w_a die Ankerwindungszahl je Pol, also $z:(2 \cdot 2a \cdot 2p)$, δ den Gesamtluftspalt des Wendepoles, also die Summe aus dem Spalt am Anker und dem am Joch, und I den Ankerstrom. Die Näherungsformeln rechts berücksichtigen den praktisch wichtigen Fall des Windungszahlverhältnisses $w_w/w_a = 1,0$ und der Faktor 0,14 das Ankerrestfeld. Die Formeln gelten nur, wenn die Untersuchungen bei Wechselstrom-Gleichstrom-Betrieb vorgenommen wurden. In gewisser Annäherung kann man sagen, daß einer Änderung des Stromes in der Wendepolwicklung von 1% eine Luftspaltänderung von 1% entspricht.

Die Belastungsaufnahmen. Die Belastungsaufnahmen werden mit konstanter Primärspannung des Transformators gemacht. Man belastet den Umformer auf Widerstände oder auf ein Gleichstromnetz und regelt die Erregung so ein, daß der Netzleistungsfaktor gleich 1,0 bleibt. Hierdurch gewinnt man also die Regelkennlinie $I_{g1} = f(i)$. Bei

Umformern mit Drehreglern nimmt man drei Belastungsreihen auf, und zwar für höchste, mittlere und tiefste Reglerstellung. Falls Drosselregelung vorgesehen ist, werden diese Versuche noch durch eigentliche Spannungsregelungen ergänzt, bei denen man bei konstanten Werten des Gleichstromes den Erregerstrom ändert und die Abhängigkeit der Gleichspannung ermittelt. Man nimmt also die Kennlinie $U_{gl} = f(i)$ auf. Selten ermittelt man die Ortskurven des Umformers bei konstanten Werten des Erregerstromes.

Zur Ermittlung des *Wirkungsgrades* macht man noch einen weiteren Belastungsversuch, bei dem die Spannung an den Schleifringen konstant gehalten wird. Der Erregerstrom wird so nachgeregelt, daß der Leistungsfaktor an den Schleifringen gleich eins bleibt. Geändert wird der Gleichstrom. Die Gleichspannung ändert sich kaum.

Die Messungen des Umformers erfordern eine große Anzahl von Geräten, da bei der vollständigen Prüfung Spannung, Strom und Leistung entsprechend folgender Aufstellung gemessen werden:

Spannung	Strom	Wirkleistung	Blindleistung
Trafo, primär	Trafo, primär	Trafo, primär (zwei Geräte)	—
Trafo, sekundär	Trafo, sekundär	—	—
Drossel, bzw. Drehregler sekundär	Drehregler, primär	—	—
Schleifringe	Schleifringe	Schleifringe (ein Gerät)	Schleifringe (ein Gerät)
Gleichstromnetz	Gleichstromnetz	—	—
Erregerwicklung	Erregerwicklung	—	—

Der Wirkungsgrad. Die Berechnung des Wirkungsgrades erfolgt wegen der Kleinheit der Gesamtverluste in der Praxis ausschließlich nach dem Verfahren der Einzelverluste. Es gelten grundsätzlich die Angaben der Gleichstrommaschinen. Die Ankerkupferverluste werden mit dem reduzierten Ankerwiderstand zwischen zwei Kommutatorbürsten errechnet (S. 252). Die Verluste in der Wendepol- und Hauptstromerregwicklung werden natürlich nicht reduziert. Die Eisenverluste entnimmt man der Leerverlustkurve für die aus Spannungsabfall und Gleichspannung errechnete EMK. Der Ohmsche Spannungsabfall wird also berücksichtigt. Die Reibungsverluste sind konstant. Übergangsverluste treten sowohl auf der Kommutator- wie auch auf der Schleifringseite auf. Sie errechnen sich zu: $I_{gl} \cdot 2 + I_{schl} \cdot m \cdot 0,3 = 2,85 \cdot I_{gl}$ bei $\cos \varphi = 1,0$ unabhängig von der Phasenzahl. Die Erregerverluste betragen $U_{err} \cdot i$. Der Wirkungsgrad, der im allgemeinen recht hoch ist, wird berechnet zu:

$$\eta \% = 100 - \frac{\text{Gesamtverluste}}{\text{Abgabe} + \text{Gesamtverluste}} \cdot 100.$$

Es ist üblich, den Wirkungsgrad des Umformers nur für $\cos \varphi = 1,0$ zu berechnen, obwohl die meisten Umformer mit etwas voreilem Strom gefahren werden. Man erhält auf diese Weise eine Vergleichsmöglichkeit verschiedener Ausführungen, ohne die Eigenschaften der vorgeschalteten weiteren Apparate kennen zu müssen.

F. Die Ein- und Mehrphasenkommutatormaschinen.

a) Der ständergespeiste Drehstromnebenschlußmotor.

Aufbau und Wirkungsweise. Der ständergespeiste Nebenschlußmotor besteht in seiner einfachsten Ausführung aus einem Ständer mit einer normalen dreiphasigen Wicklung in Stern- oder Dreieckschaltung und aus einem Gleichstromanker, der über drei oder über sechs Bürsten je Polpaar gespeist wird. Der Ständer liegt am Netz. Dem Anker wird eine regelbare Spannung von Netzfrequenz zugeführt, die, wenn sie in Richtung der Bürstenspannung fällt, die Drehzahl und, wenn sie 90° nacheilt, die Phasenlage des Ständerstromes beeinflußt (Schaltung vgl. Abb. 152 a, b). Der drehzahlregelnde Anteil der an den Läufer angelegten Spannung heißt die Regelspannung U_r und der phasenkompensierende Anteil die Kompensationsspannung U_k . Die Ankerspannung, welche zwischen zwei um 120° bei Dreibürstenschaltung und um 180° versetzten Bürsten bei Sechsbürstenschaltung im Stillstand und bei offenem Ankerkreis gemessen wird, heißt die Stillstandsspannung U_{2_0} . Bei Lauf in Richtung des Drehfeldes wird sie kleiner und beträgt bei beliebigem Schlupf s $s \cdot U_{2_0}$. Man nennt sie dann die Schlupfspannung. Der Kommutator erfüllt die wichtige Aufgabe, daß die Schlupfspannung stets mit derselben Frequenz erscheint, die der ruhenden Ständerwicklung zugeführt wird. Aus diesem Grunde besitzen auch, im Gegensatz zur Drehzahl- und Phasenregelung einer Asynchronmaschine, Regelspannung U_r und Kompensationsspannung U_k Netzfrequenz. Im übrigen gelten die gleichen Überlegungen, wie sie auf S. 145 angestellt wurden.

Die Leerlaufdrehzahl n_0 ergibt sich aus der Bedingung, daß die Schlupfspannung gleich der den Bürsten zugeführten Regelspannung werden muß. Daraus folgt für die Drehzahl:

$$n_0 = \frac{U_{2_0} - U_r}{U_{2_0}} \cdot n_{\text{syn}}, \quad \text{da} \quad U_r = s_0 \cdot U_{2_0} \quad \text{und} \quad s_0 = \frac{n_{\text{syn}} - n_0}{n_{\text{syn}}} \text{ ist.}$$

Die steigende Regelspannung verringert also die Motorgeschwindigkeit, die zu Null werden kann, wenn die Regelspannung gleich der Stillstandsspannung wird. Regelspannung Null ergibt synchronen Lauf und negative Regelspannung Übersynchronismus.

Die Kompensationsspannung U_k bewirkt an und für sich keine Drehzahländerung, sondern treibt, bei Leerlauf oder Last, einen zusätzlichen Blindstrom durch den Sekundärkreis, dessen Größe im wesentlichen nur durch den Ohmschen Widerstand desselben gegeben ist zu:

$$I_{\text{kompsec}} \approx \frac{U_k}{R_{\text{sec}}}.$$

Dieser Strom wirkt magnetisierend auf den Motor ein und entlastet den Ständer von der Blindstromaufnahme um einen dem Übersetzungsverhältnis entsprechenden Betrag (s. S. 149). In Wirklichkeit bewirken die unvermeidlichen Streublindwiderstände des äußeren Sekundärkreises eine Phasenverschiebung zwischen Kompensationsspannung und Kompensationsstrom, wodurch es zu einer merklichen Drehzahlerhöhung

der kompensierten Maschine kommt. Außerdem wird der Strom etwas kleiner als nach obiger Formel, die aber immerhin mit gutem Erfolg bei der praktischen Prüfung angewandt werden mag. Zu beachten ist immer, daß der Bürstenübergangswiderstand einen recht beachtlichen Anteil des Gesamtskondärwiderstandes darstellt. Man berechnet ihn je gedachte Sternphase zu $R_{b\ddot{u}} = 1 \text{ V/Sekundärnennstrom}$.

Die Regelspannung kann technisch auf verschiedene Art zur Verfügung gestellt werden. Von Bedeutung ist die Verwendung von Transformatoren mit angezapfter Sekundärwicklung, von Doppeldrehreglern und von Einfachdrehreglern in Verbindung mit einer transformatorisch erzeugten festen Zusatz- oder Hilfsspannung. Im ersten und zweiten Fall behält die Regelspannung zwischen ihrem positiven und negativen Höchstwert die Phasenlage unverändert bei, während sie im letzten Fall ihre Phase um insgesamt 360° schwenkt. Dies hat zur Folge, daß beim Regeltransformator und Doppeldrehregler der Motor ein festes Bürstenjoch erhält, und daß beim Einfachdrehregler das Joch mit wachsender Drehzahlerhöhung mitverstellt werden muß. Würde man ein festes Joch verwenden, so ginge die drehzahlregelnde Wirkung der zugeführten Läuferspannung allmählich in eine rein phasenregelnde über.

Die Kompensationsspannung wird bei Motoren mit festem Joch am besten einem besonderen Kompensationstransformator entnommen. Dieser liegt primär am Netz und ist sekundär in den Ankerkreis des Motors in Reihe mit der Regelspannung eingeschaltet. Da die Kompensationsspannung rund 5 bis 10% der Ankerstillstandsspannung ausmacht, hat dieser Transformator eine Leistung von rund 5 bis 10% der synchronen Motorleistung. Er wird stets mit Anzapfungen versehen, um die Wahl verschieden hoher Kompensationen zu ermöglichen.

Die Kompensationsspannung bei Motoren mit beweglichem Bürstenjoch wird, wie unten beim Motor mit Einfachdrehregler ausgeführt, bei den tiefen und den hohen Geschwindigkeiten durch Verdrehung des Bürstenjoches gegen die aufgedrückte Regelspannung bewirkt, während sie im Bereich der synchronen Drehzahl durch die nicht ganz zu Null werdende Regelspannung selbst geliefert wird. Man unterscheidet dort die „Winkelkompensation“ und die „synchrone Kompensation“.

Die Einstellung des Motors in Umkehrstellung. Der eigentlichen Untersuchung des Nebenschlußmotors geht die durch Spannungsausmessung erfolgende Einstellung in Umkehrstellung voraus. Als solche bezeichnet man jene Stellung des Bürstenjoches und des Regelorganes, bei der der betriebsmäßig geschaltete Motor die tiefste Drehzahl annimmt und nach beiden Drehrichtungen hin völlig gleiches Verhalten zeigt. Man sucht sie für den unkompensierten Zustand auf. Es gelten dabei folgende allgemein gültige Regeln:

1. Man bestimmt die *Richtung des Drehfeldes im Motor*, indem man dessen Bürsten kurzschließt und ihn an Spannung legt. Drehrichtung und Drehsinn des Feldes stimmen miteinander überein. Im allgemeinen schließt man den Motor für Rechtslauf, auf Antriebsseite gesehen, an. Dann bezeichnet oder kontrolliert man die Bürsten des Kommutators. Deren Bezeichnung muß, in Drehrichtung des Stromwenders gesehen,

lauten: U_0, V_0, W_0 bei Dreibürstenschaltung und: $U_0, Z_0, V_0, X_0, W_0, Y_0$ in Sechsbürstenschaltung.

2. Man sucht die *Stellung höchster Spannung am Regelapparat* auf. Wenn möglich, bevorzugt man eine solche Einstellung, bei der die Phasenlage von gleichbezeichneten Primär- und Sekundärspannungen miteinander übereinstimmt. Dies ist bei Regeltransformatoren in Stern-Stern-Schaltung ohne weiteres möglich. Bei Doppeldrehreglern kann man sie erreichen, wenn einer der beiden Primärteile oder der Sekundärteile verstellbar angeordnet ist. Man erregt die beiden Primärteile nur einphasig, z. B. indem man die Phase U unterbricht, und verdreht unabhängig voneinander die beiden Sekundärteile, bis die dort in Phase U induzierte Spannung verschwindet. Dies gilt für primäre Sternschaltung. Den Einfachdrehregler stellt man so ein, daß sich seine Sekundärspannung algebraisch zur festen Hilfsspannung addiert.

3. Nunmehr bringt man das *Bürstenjoch* in die eigentliche Null- oder *Umkehrstellung* indem man die Differenzspannung zwischen Bürsten und Regelorgan auf ein Minimum bringt. Abb. 152a zeigt die Schaltung für Drei- und Abb. 152b für Sechsbürstenschaltung. Im ersten Fall hat man zwei, im zweiten Fall drei offene Stellen zwischen Anker und Regelorgan. Die Differenzspannung wird an einem Spannungsmesser, der die Trennstelle überbrückt, abgelesen. Sie muß, wenn U_{2_0} die Ankerstillstandsspannung ist und $U_{r, \max}$ die höchste Regelspannung bedeutet, betragen $U_{\min} = U_{2_0} - U_{r, \max}$.

Dies ist aus dem Zeitdiagramm der Spannungen in Abb. 152a und 152b ohne weiteres ersichtlich. Wenn die Differenzspannungen untereinander nicht übereinstimmen, liegt ein Schaltfehler oder eine fehlerhafte Klemmenbezeichnung vor. Hat man z. B. bei Dreibürstenschaltung die Differenz in der V -Phase auf den kleinsten Wert $U_{2_0} - U_{r, \max}$ eingestellt und ist die Spannungsdifferenz in der W -Phase größer als U_{2_0} , aber etwas kleiner als die Summe $U_{2_0} + U_{r, \max}$, so ist primär oder sekundär die Phase V mit der Phase W des Regelorganes zu tauschen und die richtige Nullstellung zu suchen. Das gleiche gilt bei der Sechsbürstenschaltung, wenn die Differenz in Phase U z. B. das Minimum besitzt, aber die beiden anderen Differenzspannungen größer als U_{2_0} sind.

4. Zur *Kontrolle* der gefundenen Umkehrstellung verstellt man jetzt, immer noch bei offenem Ankerkreis, das Regelorgan von der bisherigen Stellung positiver Höchstspannung über die Nulllage in die Stellung der höchsten negativen Spannung. Die Differenzspannung muß dauernd ansteigen und über den Zwischenwert U_{2_0} den Endwert $U_{2_0} + U_{r, \max}$ annehmen. Bei Transformatoren mit angezapfter Sekundärwicklung erfolgt der Anstieg linear mit der Verstellung, bei den Doppel- und Einfachdrehreglern nach einer Kosinuskurve.

5. Man geht zurück in die Umkehrstellung, trennt Motor und Spannungsregler vom Netz, schaltet den Ankerkreis zusammen und legt verringerte Netzspannung an. Der Motor beginnt zu laufen und läßt sich bei nicht allzu stark reduzierter Spannung bis auf die höchste Drehzahl hochregeln. Man schalte ihn, wenn es ein Hochspannungsmotor ist, nie anders als bei tiefster Drehzahl wieder ab, da durch normale

Selbsterregung die Abschaltspannung an den Klemmen rund den 1,2- bis 1,5fachen Wert der Nennspannung von einigen tausend Volt erreichen kann.

Eine sehr gute Kontrolle für die genaue Umkehrstellung erhält man durch Beobachtung der Drehzahl, des Ankerstromes und des Netzstromes in der bisherigen Drehrichtung, die man mit den gleichen Größen in

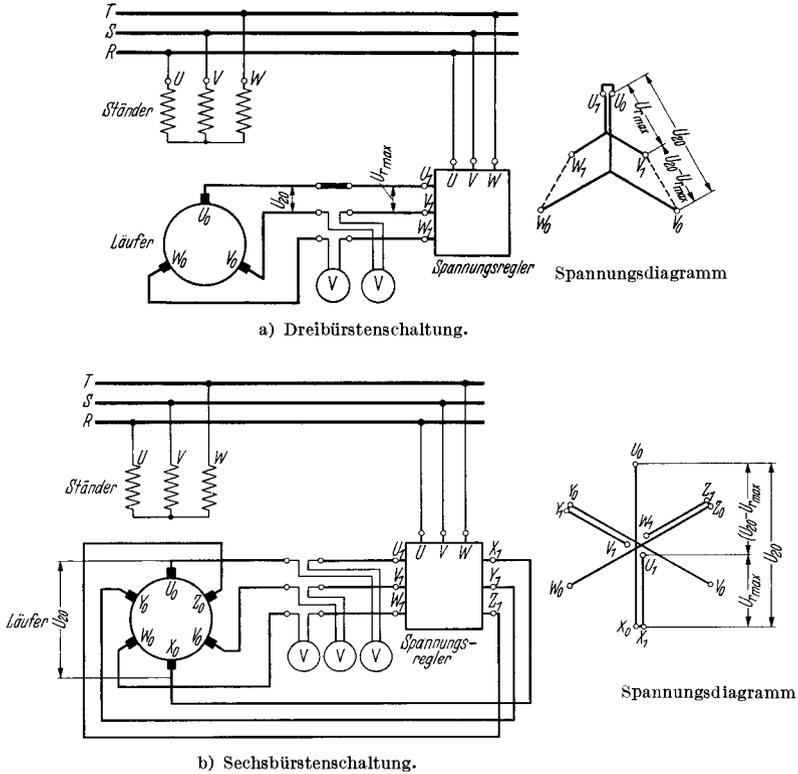


Abb. 152. Ausmessung der Regelspannung in Umkehrstellung des ständergespeisten Nebenschlußmotors ohne künstlichen Nullpunkt. Jeweils rechts die Lage der Spannungen bei reiner Drehzahlregelung nach unten. Die betriebsmäßige Schaltung entsteht durch Überbrückung der Trennstellen im Ankerkreis.

der anderen Drehrichtung vergleicht. Wenn die Drehzahl nunmehr zu hoch ist, verschiebt man das Joch im Lauf vorsichtig in Drehrichtung, bis sie den Mittelwert beider Drehzahlablesungen annimmt. Dann kehrt man den Drehsinn noch einmal um und vergleicht von neuem die drei Größen. Durch etwaiges erneutes Nachjustieren findet man auf den Bruchteil einer Segmentbreite genau die richtige Stellung des Joches. Diese wird, wie bei den Gleichstrommaschinen, dauerhaft durch einen Gehäusezeiger und eine Marke *U* gekennzeichnet.

Die Einstellung der Kompensationsspannung bei Verwendung eines besonderen Kompensationstrafos. Wenn ein besonderer Kompensations-

trafo vorgesehen ist, ermittelt man die richtige vektorielle Lage der von ihm in dem Ankerkreis zugesetzten Spannung mittels eines künstlichen Nullpunktes. Es gelten die gleichen Angaben wie beim Asynchronmotor mit Phasenschieber auf S. 148. Abb. 153 zeigt die Versuchsschaltung und das für richtigen Anschluß geltende Spannungsdiagramm. Die Ausmessung erfolgt, im Gegensatz zum Asynchronmotor, im Stillstand bei etwa 30% der Normalspannung.

Gelegentlich kann man die Kompensationsspannung nicht in die erwünschte 90° -Lage zur Ankerstillstandsspannung bringen, sondern es läßt sich nur eine Verschiebung von 60° oder 120° erreichen. Dann wirkt die Kompensationsspannung zu 50% drehzahlerniedrigend bzw. drehzahlerhöhend und nur zu 86,7% phasenschiebend.

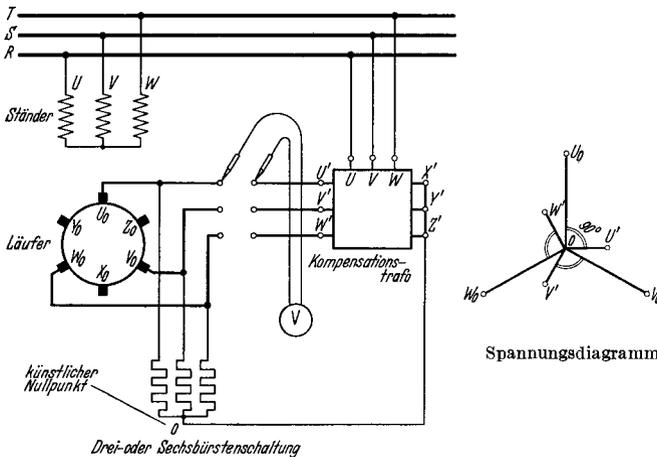


Abb. 153. Ausmessung der Kompensationsspannung mit künstlichem Nullpunkt. Rechts die richtige Lage der Spannungen.

Der Drehrichtungswechsel. Die Umkehr der Drehrichtung wird bei allen Motoren durch Tausch zweier Netzzuleitungen, die gemeinsam Motor und Regler speisen, erreicht. Beim kompensierten Motor ist außerdem eine innere Umschaltung erforderlich. Es gilt grundsätzlich, daß bei Tausch zweier für alle Primärwicklungen (Motorständer, Spannungsregler, Kompensationstrafos) gemeinsamer Netzzuleitungen die Phasenwinkel zwischen den Sekundärspannungen ihren nachteiligen Charakter verlieren und statt dessen voreilenden Charakter annehmen. Da Regel- und Ankerspannung in Phase liegen, ändert sich bei ihnen nichts. Die Winkel zwischen Kompensationsspannung und Ankerstillstandsspannung jedoch, die 90° , selten auch 60° oder 120° betragen, klappen aber um ihren doppelten Betrag herum und werden zu -90° bzw. -60° oder -120° . Die Kompensation würde also nunmehr gerade falsch wirken. Um sie wieder richtig zu stellen, müssen primärseitig oder sekundärseitig entsprechende Umschaltungen vorgenommen werden. Man muß im ersten Fall die Phasen einer Seite des Kompensationstransformators, also primär

oder sekundär, umgekehrt anschließen, im zweiten Fall die Primärseite nach der einen Seite und im dritten Fall nach der anderen Seite zyklisch vertauschen.

Die Richtigkeit der getroffenen Schaltmaßnahme ist sofort im Leerlauf zu überprüfen. Drehzahl, Netzstrom und Läuferstrom müssen genau die gleichen Werte für beide Drehrichtungen haben.

Wenn die Kompensationsspannung durch Bürstenverdrehung gegen den Drehsinn untersynchron zusätzlich vergrößert wird, wie dies im allgemeinen die Regel ist, so muß außerdem diese Verstellung rückgängig gemacht werden und entgegen der neuen Drehrichtung erfolgen.

Die Prüfung des Motors erfolgt wie unter b) nachstehend beschrieben.

b) Der Motor mit Einfachdrehregler und beweglichem Bürstenjoch.

Schaltung und Regelprinzip. Abb. 154 zeigt die Schaltung dieses Motors¹, der als eigentlichen Drehzahlregler einen Einfachdrehregler besitzt, dessen Verstellung gemeinsam mit dem Bürstenjoch des Motors

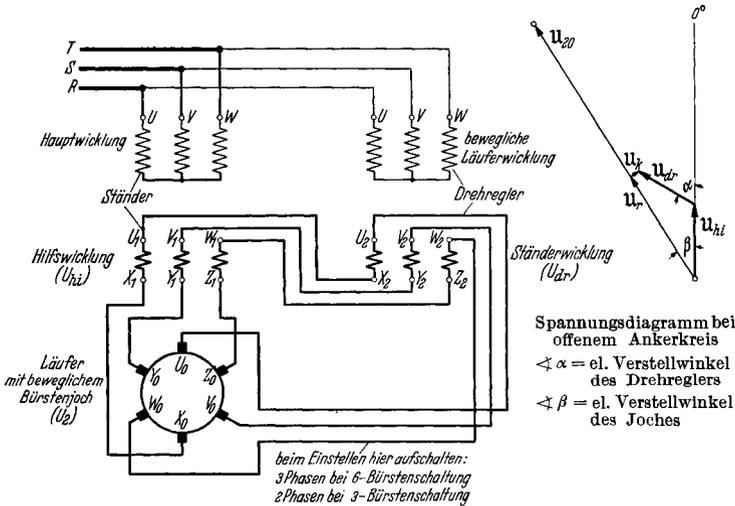


Abb. 154. Schaltung und Spannungsdiagramm des Nebenschlußmotors mit Einfachdrehregler und beweglichem Bürstenjoch mit sinngemäßer Klemmenbezeichnung. Bei Dreibürstenschaltung fallen Bürsten $X_0 Y_0 Z_0$ fort. Hilfswicklung erhält dann Sternschaltung. u_r ist die drehzahlregelnde, u_x die phasenregelnde Komponente der tatsächlichen Spannung $u_{hi} + u_{dr}$, die in Richtung bzw. 90° nacheilend zu der Ankerstillstandsspannung u_{20} liegt.

erfolgt. Der Regler ist auf den Motor aufgebaut und die mechanische Übersetzung \ddot{u} zwischen ihm und der Bürstenbrücke ist derart, daß zu einer Reglervorstellung um 360° el eine Bürstenverstellung um nahezu 180° el gehört.

Die *Regelspannung* setzt sich zusammen aus der nach Größe und Phase unveränderlichen Hilfsspannung U_{hi} und der in der Phase schwenkbaren, konstanten Drehreglerspannung U_{dr} . In der Null-

¹ Bauart AEG.

stellung des Drehreglers addieren sich beide algebraisch zur höchsten Regelspannung $U_r, \max = U_{hi} + U_{dr}$. In der 180° -Stellung heben sich beide Spannungen, die fast die gleiche Größe haben, bis auf ihre kleine

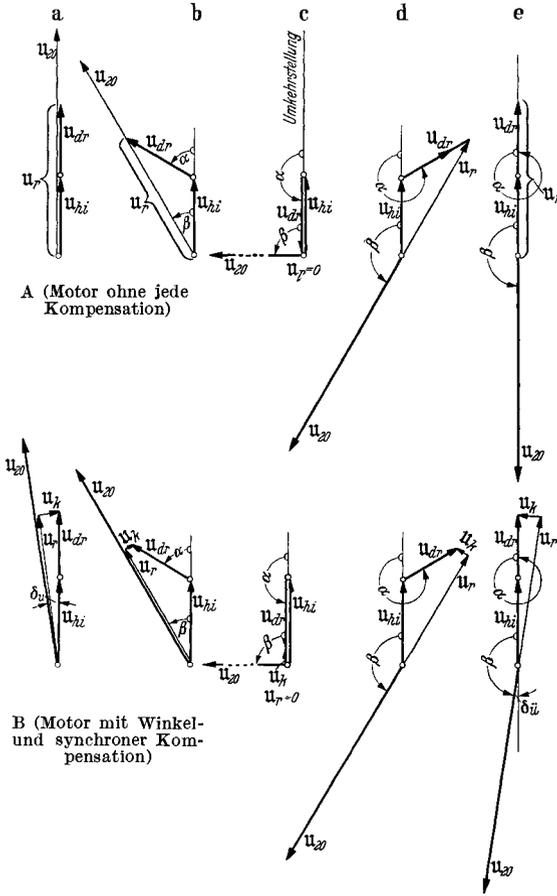


Abb. 155. Spannungsdiagramme des Motors mit Einfachdrehregler bei offenem Ankerkreis.

A für Motoren ohne Kompensation ($U_{hi} = U_{dr}$, $\beta = \frac{1}{2} \alpha$) und B für Motoren mit „synchroner Kompensation“ ($U_{hi} > U_{dr}$) und mit „Winkelkompensation“ ($\beta = \delta_u + \frac{\alpha}{2(1+p\%/100)}$). Es gilt Diagramm a) für tiefste, b) für untersynchrone, c) für synchrone, d) für übersynchrone und e) für höchste Drehzahl. U_r ist die drehzahlregelnde, U_k die phasenregelnde Komponente von $(U_{hi} + U_{dr})$ und U_{20} die Ankerstillstandsspannung.

spannung von Drehregler und Hilfswicklung über dem Reglerverstellwinkel α ist in recht guter Annäherung gegeben durch die einfache Beziehung:

$$U_r = (U_{hi} + U_{dr}) \cdot \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (\text{vgl. Abb. 156a})$$

Differenz auf und in der 360° -Stellung addieren sie sich wieder. Das Zeitbild der Abb. 154 läßt erkennen, daß das Bürstenjoch um praktisch den halben Drehreglerwinkel α mitverstellt werden muß, damit die ihm zugeführte Spannung in Phase mit der Bürstenspannung U_{20} zu liegen kommt. Man erkennt aus den weiteren Spannungsdiagrammen der Abb. 155, daß bei $\alpha = 180^\circ$ die aufgedrückte Spannung senkrecht auf der Bürstenspannung steht und daß sie bei $\alpha = 360^\circ$ genau in Gegenphase zu ihr liegt.

Hierauf beruht die übersynchrone Regelung. Man beachte, daß nach einer Verdrehung um 360° der Drehregler elektrisch — und bei der häufigen zweipoligen Ausführung auch mechanisch — in seine Ausgangsstellung zurückgekehrt ist, das Bürstenjoch aber um 180° aus der Umkehrstellung verschoben ist.

Der Verlauf der rein drehzahlregelnden Komponenten der Summen-

Die *Kompensationsspannung* kann wegen der Schwenkung der Ankerspannung nicht als eine Spannung konstanter Phasenlage eingefügt werden. Sie würde sonst zwar untersynchron richtig wirken, synchron aber drehzahlerhöhend werden und übersynchron sogar gegenkompensieren. Man erzeugt daher die Kompensationsspannung in Stellung kleinster und in Stellung höchster Drehzahl durch Verdrehung der Bürstenbrücke um einen kleinen Kompensationswinkel δ_u und $\delta_{\bar{u}}$ gegenüber der Regelspannung. Wie Abb. 155 B erkennen läßt, muß man untersynchron das Bürstenjoch gegen das Drehfeld, also gegen den Drehsinn des Stromwenders, übersynchron jedoch im umgekehrten Sinn verstellen. Unter gegebenen Verhältnissen wirkt sich also jeder Eingriff, den man untersynchron vornimmt, im umgekehrten Maße übersynchron aus. Der Gesamtweg des Bürstenjoches beträgt bei der solcherart kompensierten Maschine nicht mehr 180° bei 360° Reglerverstellung, sondern 5 bis 15° weniger. Daher muß die mechanische Übersetzung zwischen Drehreglerwelle und Bürstenjoch größer gemacht werden. Bezeichnet man deren wirklichen Wert mit \bar{u} und den auf einen zweipoligen Motor und einen zweipoligen Drehregler bezogenen Wert mit \bar{u}' , so ist:

$$\bar{u} = 2 \cdot \frac{2p_{\text{motor}}}{2p_{\text{regler}}} \quad \text{bzw.} \quad \bar{u}' = 2$$

bei Motoren ohne Winkelkompensation, und

$$\bar{u} = 2 \cdot \frac{2p_{\text{motor}}}{2p_{\text{regler}}} \cdot \left(1 + \frac{p\%}{100}\right) \quad \text{bzw.} \quad \bar{u}' = 2 \left(1 + \frac{p\%}{100}\right)$$

bei Motoren mit Winkelkompensation.

Der Prozentsatz $p\%$ wird nach der letzten Formel oder aber einfacher als die prozentuale Abweichung der Übersetzung von der nächsten ganzen Zahl gefunden. Bei einer Übersetzung von z. B. 4,12 ist $p\%$ gleich 3% und bei einer Übersetzung von 6,06 nur 1%.

Allgemein kann für den elektrischen *Bürstenverstellwinkel* β , wenn das Joch bereits in der Ausgangsstellung um den untersynchronen Kompensationswinkel δ_u verschoben worden ist, schreiben:

$$\beta = \delta_u + \frac{\alpha}{2(1 + p\%/100)}.$$

Der anfängliche, untersynchrone Kompensationswinkel δ_u geht während des Durchregelns allmählich in den übersynchronen Kompensationswinkel $\delta_{\bar{u}}$ über, der meistens schwach negativ oder aber Null ist. Für die Zwischenwerte des *Kompensationswinkels* δ , der nichts anderes darstellt, als den gewünschten Fehlwinkel des Joches mit dem tatsächlichen Verstellwinkel β gegenüber einem gedachten Joch, das aus der 0° -Stellung genau um den halben Drehreglerwinkel $\alpha/2$ verstellt wurde, gilt also:

$$\begin{aligned} \delta &= \beta - \frac{\alpha}{2} = \delta_u - \frac{\alpha \cdot p\%}{200(1 + p\%/100)}, \\ &\approx \delta_u - \frac{\alpha p\%}{200}. \end{aligned}$$

Die „Winkelkompensationsspannung“ hängt unmittelbar vom Kompensationswinkel δ (genauer vom $\sin \delta$) und von der Regelspannung U_r ab:

$$U_{k_{\text{Winkel}}} = \frac{U_r}{57,3} \cdot \delta = \frac{U_{hi} + U_{dr}}{57,3} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \delta,$$

wobei $57,3 = \frac{360}{2\pi}$ ist.

Im synchronen Bereich übt die Winkelverdrehung des Bürstenjoches um kleine Winkel in keiner Weise auf die Kompensation der Maschine ein.

Hier steht das Joch praktisch senkrecht auf der kleinen Restspannung $U_{hi} - U_{dr}$, die durch die algebraische Differenz der Spannungen von Hilfswicklung und Drehregler gegeben ist. Diese stellt also die Kompensationsspannung in der Nähe des Synchronismus dar. Man nennt sie daher auch die „synchrone Kompensationsspannung“. Sie wird unwirksam in der Stellung für kleinste und für höchste Geschwindigkeiten. Die synchrone Kompensationsspannung beträgt:

$$U_{k_{\text{syn}}} = (U_{hi} - U_{dr}) \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Die bei den einzelnen Reglerstellungen wirksame Kompensationsspannung des Motors besteht also aus zwei verschiedenen Anteilen, der Winkel- und der synchronen Kompensationsspannung. Sie beträgt:

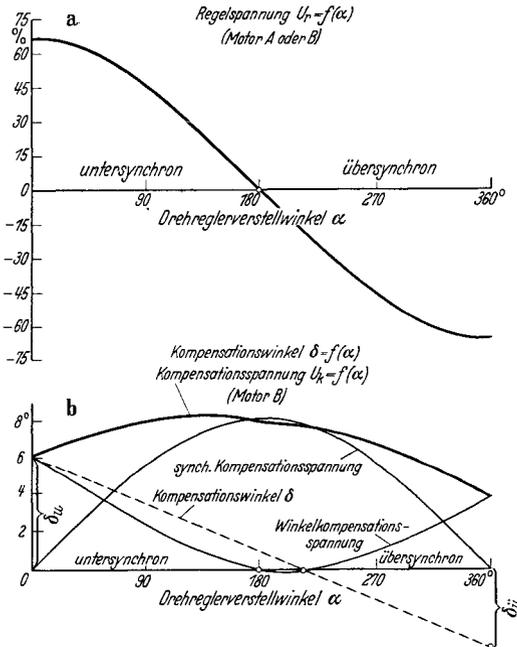


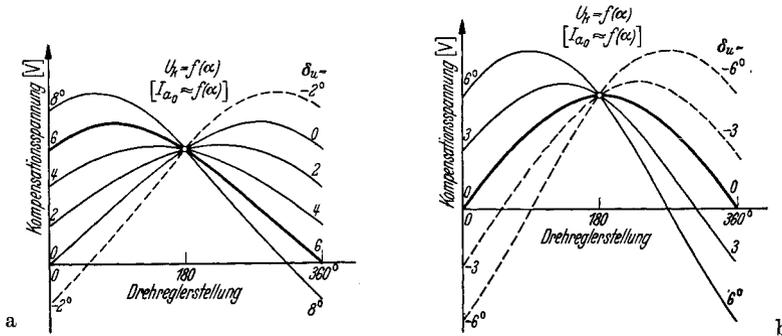
Abb. 156. Die Regelspannung U_r (a), die Kompensationsspannung U_k mit ihren Komponenten: synchrone und Winkelkompensationsspannung sowie der Kompensationswinkel δ über dem Drehreglerwinkel (b). Die Spannungen sind in % der Ankerstillstandsspannung aufgetragen. Es liegen folgende Werte zugrunde: $U_{hi} = 38,2\%$, $U_{dr} = 28,8\%$, $p\% = 5,9\%$, $\delta_u = 6^\circ$. Fehlender Spannungsmaßstab (b) so, daß 6° der Spannung 7% entspricht.

$$U_k = U_{k_{\text{Winkel}}} + U_{k_{\text{syn}}} = \frac{U_{hi} + U_{dr}}{57,3} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \delta + (U_{hi} - U_{dr}) \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

In Abb. 156 ist der Verlauf der Regel-, der Winkel- und der synchronen Kompensationsspannung und des Kompensationswinkels über dem Drehreglerverstellwinkel aufgetragen für eine Maschine, bei der $p\%$ etwa 5,9% beträgt. In Abb. 157 ist nur die gesamte Kompensationsspannung U_k einer Maschine mit $p\%$ von etwa 3,4% und einer anderen mit $p\%$ gleich Null wiedergegeben, und zwar für verschieden große, auch negative untersynchrone Kompensationswinkel δ_u . Man kann

bei diesem Motor im allgemeinen durch Änderung von $p\%$ und von $(U_{hi} - U_{dr})$, welches letzteres durch einen Spartransformator vor dem Drehregler möglich ist, drei Punkte der Kompensationsspannungskurve frei wählen. Hiervon macht man bei neuen Maschinen Gebrauch.

Da wegen der Entlastung des Drehreglers die Spannung der Hilfswicklung U_{hi} stets größer als die Spannung des Drehreglers U_{dr} gemacht wird, darf der Motor nur durch Verdrehung des Bürstenjoches entgegen dem Drehsinn des Läufers auf höhere Geschwindigkeit geregelt werden. Andernfalls würde die synchrone Kompensationsspannung gegenkompensieren, wodurch die Stromaufnahme im Leerlauf und bei Last sich etwa verdoppeln bis verdreifachen würde.



Motor mit synchroner und Winkelkompensation.

$$\ddot{u} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta \beta} = 2 \frac{p_{mot}}{2 p_{regler}} \left(1 + \frac{p\%}{100} \right), \quad p\% \approx 3,4\%.$$

Motor nur mit synchroner Kompensation.

$$\ddot{u} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta \beta} = 2 \frac{p_{mot}}{2 p_{regler}}, \quad p\% = 0.$$

Abb. 157. Kompensationsspannungen U_k bei verschiedenen untersynchronen Kompensationswinkeln δ_u einer Maschine für eine Drehrichtung (a) und für Umkehrbetrieb (b). Die stark ausgezogenen Kurven gelten für richtige Einstellung. (Die Leerlauf-Ankerströme I_{a0} haben denselben typischen Verlauf.)

Die Einstellung. Die Umkehrstellung des Drehreglers und des Bürstenjoches wird folgendermaßen gefunden. Man erregt Motorständer und Primärteil des Reglers mit verringerter Spannung von etwa 30% des Nennwertes. Dann mißt man die Phasenspannungen der Hilfswicklung U_{hi} , des Sekundärteiles des Drehreglers U_{dr} und die Ankerstillstandsspannung U_{20} zwischen den Bürsten U_0 und X_0 bzw. U_0 und V_0 bei der seltenen Dreibürstenspannung. Auch die Netzspannung wird abgelesen. Dann legt man den Spannungsmesser an die Reihenschaltung von Hilfswicklung und Drehregler und verstellt letzteren, bis die angezeigte Spannung ein Maximum, und zwar genau gleich der Summe $U_{hi} + U_{dr}$ wird. Dies ist die Umkehrstellung des Reglers. Man kontrolliert die Summenspannung der beiden anderen Phasen, die den gleichen Wert haben müssen. Da das Maximum etwas flach verläuft, verfeinert man die Einstellung, indem man den Regler um den gleichen Winkel, etwa 60° , nach links und nach rechts verstellt und die die beiden verringerten Summenspannungen abliest. Diese werden in beiden Richtungen im allgemeinen etwas voneinander abweichen. Man bildet den Mittelwert, dreht den Regler so lange vor-

oder rückwärts, bis sich diese Spannung ergibt, löst seinen Zeiger, setzt ihn wieder auf, so daß er nunmehr den Verstellwinkel, also z. B. 60° , anzeigt, und dreht den Regler wieder in die Nullstellung zurück. Mit Rücksicht auf die Zuleitungskabel zum beweglichen Primärteil des Drehreglers (Läufer) ist natürlich die Nullstellung aufzusuchen, bei der diese Kabel gerade durchhängen, damit sie bei Drehzahlregelung in Links- und Rechtslauf gleiche Verstellwege zulassen.

Die gleiche Art der Reglereinstellung gilt auch für die Hochspannungsmaschinen, bei denen die Reglerprimärwicklung nicht unmittelbar an die volle Netzspannung von 3000 bis 6000 V, sondern an eine besondere Speisewicklung von etwa 500 V gelegt wird. Diese kann in den Nuten des Motorständers zusammen mit der Hilfswicklung oder aber in einem kleinen Zwischentransformator untergebracht sein.

Anschließend wird die *Umkehr- oder Nullstellung des Bürstenjoches* ermittelt. Man bringt das Joch von vornherein in jene Lage, bei der die drei bzw. sechs Bürstenkabel gerade durchhängen. Dann mißt man in der Schaltung, wie sie oben schon auf S. 261 angegeben wurde, die Differenzspannung zwischen Anker einerseits und Drehregler plus Hilfswicklung andererseits aus. Durch Verdrehen des Joches, nicht etwa des Drehreglers, der genau in seiner Nullstellung stehen muß, wird die Differenzspannung auf das Minimum, also den Wert $U_z - (U_{hi} + U_{dr})$ eingestellt. Alle offenen Spannungen müssen natürlich untereinander übereinstimmen. Die genauere Umkehrstellung findet man, indem man das Joch stehen läßt und den Drehregler jetzt um 60° nach links und um 60° nach rechts verstellt. Man bildet den Mittelwert aus beiden abgelesenen Differenzspannungen, die gewachsen sind, und stellt das Joch vorsichtig so fein nach, bis der Mittelwert als Differenz gemessen wird. Dann geht man mit dem Regler zurück auf Null, markiert das Bürstenjoch mit U und kuppelt beide mechanisch zusammen. Man vergesse nicht folgende weitere Kontrolle, die darin besteht, daß man den Regler vollständig durchregelt und die Differenzspannung aller Trennstellen fortlaufend abliest. Diese muß nach einem Kosinusetz bis auf den Wert $U_{max} = U_z + U_{hi} + U_{dr}$ stetig ansteigen, ohne etwa kurz vor und kurz nach der Stellung für Synchronismus eine schwache Abnahme zu zeigen. Letzteres tritt dann ein, wenn das Drehfeld im Drehregler falsch herumläuft. Dies ist nämlich bei der Ausmessung der Umkehrstellungen für den Regler und das Joch nicht ohne weiteres festzustellen. Merkt man zwar hierbei, daß zwei Phasen des Reglers zu vertauschen sind, so weiß man nicht, ob man den Tausch primär oder sekundär zu vollziehen hat. Die Wirkung würde in der Umkehrstellung in beiden Fällen scheinbar dieselbe sein. In Wirklichkeit ist der Regler aber bei der Drehzahlregelung so zu verdrehen, daß die Sekundärspannung gegen das Drehfeld verdreht wird. Man hat also den Primärteil räumlich mit dem Drehfeld zu verstellen. Diese Drehung erfolgt aber zwangsläufig mit dem Joch, welches gegen das Drehfeld im Motor zu verstellen ist. Also muß das Drehreglerdrehfeld entgegengesetzt zum Motorfeld umlaufen. Beides kontrolliert man folgendermaßen. Man schließt den Motor über die Bürsten kurz und läßt ihn laufen. Der Drehsinn

ist derselbe wie der des Drehfeldes. Dann schließt man den Drehregler sekundär kurz. Er versucht sich zu verdrehen. Er ist richtig angeschlossen, wenn er sich im gleichen Sinne verdreht, falsch, wenn er gegen die Motordrehrichtung anzulaufen versucht. Dann sind zwei Primärphasen zu tauschen und, falls man schon vorher die Reglernullstellung ermittelt hatte, auch zwei Sekundärphasen umzutauschen und die neue sich ergebende Nullstellung aufzusuchen.

Nunmehr schaltet man die Maschine ordnungsgemäß zusammen, legt sie an kleine Spannung und regelt sie langsam hoch. Man vermeide den Durchgang durch den Synchronismus oder vollziehe ihn schnell, damit man die bei zu kleiner Sättigung an manchen Maschinen auftretende Selbsterregung mit Gleichstrom im Ankerkreis vermeidet. Hochspannungsmaschinen schalte man nur über Hochspannungsschalter aus und ein, da sie wegen der natürlicherweise auftretenden Selbsterregung mit Netzfrequenz nach dem Abschalten auf volle oder gar erhöhte Spannung kommen können und somit Gefahr für den Bedienenden eines Handschalters besteht. Nachdem die Bürsten gut in beiden Drehrichtungen eingelaufen sind, kontrolliert man noch einmal die Umkehrstellung des Joches durch Ablesen der Drehzahl, des Netz- und des Ankerstromes in Stellung kleinster Drehzahl für beide Richtungen. Läuft die Maschine in einer Richtung zu schnell, so wird das Joch etwas in Drehrichtung vorgeschoben, läuft sie zu langsam, wird es gegen den Drehsinn bewegt. Der Drehregler verbleibt natürlich in seiner Nullstellung.

Wenn die *mechanische Übersetzung* zwischen Drehreglerwelle und Bürstenjoch nicht genau bekannt ist, kann man sie unmittelbar ausmessen. Man blockiert den Anker, stellt das Bürstenjoch in eingekuppeltem Zustand so ein, daß eine Bürstenkante genau mit einer Segmentkante abschließt und verdreht nunmehr den Drehregler um einen solchen Winkel, daß man nach Überstreichung einer größeren Anzahl von Segmenten wieder genau mit der Bürstenkante auf eine Segmentkante zu stehen kommt. Man liest den Winkel des Reglers ab und setzt ihn in Beziehung zu dem durch die Anzahl der Segmente gegebenen elektrischen Bürstenstellwinkel. Man beachte hierbei, daß allen Segmenten zusammen der Winkel (Polzahl des Motors) $\cdot 180^\circ$ entspricht. Reglerwinkel durch Bürstenwinkel gibt den Wert der gesuchten Übersetzung. Diese Messung ist mit großer Sorgfalt durchzuführen.

Die Leerlaufmessungen. Zu den Leerlaufversuchen gehört die Bestimmung der Spannungsübersetzung zwischen Ständerhauptwicklung und Hilfswicklung sowie Anker und zwischen Drehreglerläufer und Drehreglerständer. Diese Messungen werden bereits vor der Einstellung des Motors durchgeführt. Man ergänzt sie noch durch die Bestimmung der Lamellenspannung, die, wenn die Wicklungsart des Ankers bekannt ist, den Ankerfluß zu bestimmen erlaubt. Dieser ergibt sich zu:

$$\text{Ankerfluß } \Phi' \text{ in } 10^6 \text{ Maxwell} \\ = \frac{\text{auf volle Spannung umgerechnete Lamellenspannung bei Stillstand}}{2,22 \cdot \text{Zahl der Ankerwindungen zwischen den Segmenten}} \text{ (bei 50 Hz).}$$

Bei der ständergespeisten Drehstrommaschine hängt die Lamellenspannung unmittelbar vom Schlupf ab. Bei Synchronismus ist sie gleich Null. Da die Lamellenspannung der kommutierenden Spule von der Bürste kurzgeschlossen wird, darf sie betriebsmäßig gewisse Beträge nicht überschreiten, die im wesentlichen durch die Bürstenqualität begrenzt werden. Im allgemeinen hat ein Wert von 2,5 V als Höchstwert zu gelten. Eine Maschine mit einer tiefsten Drehzahl von 50% der synchronen darf also im Stillstand bei voller Netzspannung nicht mehr als 5 V Lamellenspannung haben.

Die Magnetisierungsaufnahme des Motors ohne Drehregler erfolgt entweder im Lauf mit kurzgeschlossenen Bürsten oder aber im Stillstand mit abgehobenen Bürsten. Diese dürfen nie aufliegen, wenn die Maschine ruht und an volle Spannung gelegt werden soll. Die Kohlen würden aufglühen und der Anker infolge der hohen Verluste in den überbrückten Windungen zum Anlauf kommen. Die Verluste interessieren nicht besonders, da der Wirkungsgrad nicht aus den Einzelverlusten bestimmt wird. Man bestimmt meistens nur den Magnetisierungsstrom.

Die Magnetisierung des Drehreglers erfolgt bei voller Spannung. Die gemessenen Verluste treten bei Betrieb dauernd auf. Der Blindleistungsbedarf von Motor plus Drehregler ist das wichtigste Ergebnis beider Versuche, da er den sog. Magnetisierungspunkt P_0 im Kreisdiagramm liefert.

Die wichtigste Leerlaufmessung ist die Aufnahme des Ankerstromes in Abhängigkeit der Drehreglerstellung. Da der Ankerstrom, wie oben angegeben, fast in unmittelbarer Abhängigkeit von der Kompensationspannung steht, gibt sein Verlauf auch qualitativ deren Verlauf wieder (vgl. Abb. 157). Man beachte aber, daß der in den Ankerkreis eingeschaltete Strommesser natürlich nicht anzeigt, ob der Leerlaufankerstrom voreilenden oder nacheilenden Charakter besitzt. In beiden Fällen schlägt das Gerät nach rechts aus. Außerdem überlagert sich dem Blindstrom auch bei Leerlauf ein kleiner Wirkstrom, der besonders bei kleinen Motoren mit relativ hohen Verlusten die Stelle des Nulldurchganges des Blindstromes nur schwer erkennen läßt. Am Netzstrom ist aber sofort zu sehen, ob der Ankerstrom vor- oder nacheilend ist. Wenn der Leerlaufstrom im Netz kleiner als die Summe aus Motor plus Drehreglermagnetisierungsstrom ist, dann liegt Kompensation im Ankerkreis vor. Der Sekundärblindstrom eilt vor. Wenn der Netzstrom aber größer wird, ist der Motor gegenkompensiert und der Ankerstrom eilt nach. Man trage den Leerlaufankerstrom, solange er voreilend ist, nach oben, sobald er nacheilend wird, nach unten über dem Reglerverstellwinkel auf und verbinde die beiden Kurvenäste, die in der Nähe des Stromminimums also springen, durch eine anschmiegende Verbindungslinie. Den kleinen Wirkstromrest läßt man dann unberücksichtigt.

Durchweg gibt es zwei Typen von Motoren. Zur ersten gehören diejenigen, die für *Umkehrbetrieb* bestimmt sind. Diese dürfen keine untersynchrone Winkelkompensation erhalten. Der Leerlaufankerstrom muß daher mit Null beginnen. Die stark ausgezogene Kurve in Abb. 157 b

zeigt den zugehörigen Verlauf. Zur zweiten Gattung gehören fast alle größeren Motoren, die *nur in einer Drehrichtung* zu arbeiten haben. Sie erhalten Kompensation im ganzen Regelbereich. Die stark ausgezogene Kurve in Abb. 157a zeigt den typischen Verlauf des Ankerstromes. Man sieht, daß derselbe in Stellung kleinster Drehzahl fast den gleichen Wert wie bei Synchronismus erhält und bei den hohen Geschwindigkeiten, wo die Maschine bei Vollast von selbst auf $\cos\varphi$ gleich 1 kommt und daher keine Kompensationsspannung im Ankerkreis braucht, fast zu Null wird. Man beachte das Leerlaufstrommaximum kurz vor der synchronen Reglerstellung bei etwa $\alpha = 120^\circ$, das durch die Überlagerung der Winkel- und der synchronen Kompensationsspannung zustande kommt. Wenn der Strom dort zu groß wird, ist entweder untersynchron oder synchron die Kompensation etwas zu reduzieren.

Die Leerlauf-Ankerstromkurven werden mit Vorteil auch an bereits in Betrieb befindlichen Motoren aufgenommen, bei denen der Verdacht besteht, daß sich etwas an der gegenseitigen Stellung von Joch und Regler geändert hat. Man stellt, wenn der Regler in Umkehrstellung steht, das vom Drehregler abgekuppelte Joch vorsichtig im Leerlauf so nach, bis der Leerlaufankerstrom der gesunden Maschine erreicht wird, der aus dem Prüfnachweis zu ersehen ist. Man verstellt im richtigen Sinn, wenn der Ankerstrom durch Bewegen des Joches gegen die Drehrichtung anwächst. Bei Umkehrmotoren stellt man natürlich das Joch so ein, daß der Ankerstrom ein Minimum wird. Liegen keine Prüffeldergebnisse vor, so stellt man bei größeren Motoren für einseitigen Betrieb das Joch so ein, daß der Strom in tiefster Stellung des Reglers gleich dem Strom in Synchronstellung wird und daß der Strom in höchster Stellung nicht durch Null geht.

In der endgültigen Einstellung wird eine Leerlaufaufnahme des Stromes im Netz, in der Drehreglerwicklung und im Ankerkreis, der Leistung im Netz sowie der Leerlaufdrehzahl in Abhängigkeit der Drehreglerstellung durchgeführt.

Die Selbsterregung. Abschließend wird noch die Selbsterregung der Maschine untersucht. Man stellt den Regler auf die Stellung für synchrone Drehzahl und verringert die der Maschine zugeführte Spannung. Ein an einen im Ankerkreis eingebauten Nebenwiderstand angeschlossenes Drehspulgerät zeigt an, ob ein Gleichstrom fließt. Sobald es ausschlägt, ist der Zustand der Selbsterregung eingetreten. Man beobachtet gleichzeitig heftiges Feuern der Bürsten, verringerte Drehzahl und erhöhte Netzstromaufnahme. Man bestimmt den Prozentsatz der kritischen Netzspannung, bei dem diese unerwünschten Vorgänge einsetzen. Liegt diese Spannung unterhalb von 90% der Nennspannung, so ist für den Motor keine Gefahr vorhanden, da er nur innerhalb eines Spannungsbereiches von 95 bis 105% laufen darf. Die Selbsterregung tritt nur auf, wenn die Hilfswicklung im Ständer des Motors untergebracht ist und einen Wickelschritt von genau oder nahezu 100% besitzt. Der den Anker und die Hilfswicklung durchfließende selbst-erregte Gleichstrom tritt aus den Bürsten aus, wobei immer $U_0 - V_0 - W_0$ und $X_0 - Y_0 - Z_0$ unter sich die gleiche Polarität besitzen, und ruft

ein Magnetfeld im Ständer hervor, welches die dreifache Polzahl des normalen Motorfeldes hat. Man kann daher die Selbsterregung mit Sicherheit ausschalten, wenn man den Wickelfaktor der Hilfswicklung für die dritte Oberwelle durch Sehnung um 33,3% zu Null macht. Ebenfalls kann keine Selbsterregung eintreten, wenn man die drei offenen Hilfsphasen zu zwei getrennten Sternen verbindet. Nur wenn man die Sternpunkte verbinden würde, könnte die Erregung wieder eintreten. Eines dieser Mittel wird in der Regel bei allen größeren Maschinen angewandt. Bei kleineren Maschinen verhindert der relativ hohe Widerstand im Ankerkreis die Selbsterregung. Die Abhängigkeit der Selbsterregungsfähigkeit von der Höhe der angelegten Netzspannung erklärt sich dadurch, daß das der Maschine aufgezwungene Drehfeld bereits die Eisenwege so stark sättigt, daß das sich überlagernde Gleichfeld einen hohen Erregerbedarf erfordert. Deshalb kann man auch, wenn bei kleinen Motoren Selbsterregung auftritt, diese sofort beseitigen, indem man die Spannung oder aber — durch Verschmälern der Ankerbreite — die Sättigung der Maschine heraufsetzt. Diese letztere Maßnahme wird so durchgeführt, daß man einen Teil der Zähne an den Stirnseiten des Ankers auf etwa 2 bis 3 mm Zahnlänge wegdreht.

Wegen des geringeren Widerstandes zeigt die kalte Maschine erhöhte Neigung zur Selbsterregung gegenüber der betriebsmäßig warmen Maschine.

Der Nebenschlußmotor ist natürlich wie jede kompensierte Maschine imstande, bei entsprechend hoher Kompensationsspannung sich selbst mit Drehstrom der normalen Frequenz zu erregen. Wenn der leer laufende Motor gerade so weit kompensiert wurde, daß er dem Netz keinen Blindstrom mehr entnimmt, behält er auch nach dem Abschalten vom Netz seine Spannung bei. War er dagegen überkompensiert, so daß er Blindstrom an das Netz abgegeben hatte, so steigt seine Klemmenspannung noch an. Da die Sättigung normalerweise nicht allzu hoch getrieben wird, kann man Spannungssteigerungen an der abgeschalteten, auslaufenden Maschine bis zu 50% beobachten. Diese können mit Sicherheit durch Einschalten von Widerständen in den Ankerkreis vermieden werden, die betriebsmäßig überbrückt werden. Diese Selbsterregung ist also als ganz natürlich zu betrachten.

Der Belastungsversuch. Zu Beginn der Belastungsaufnahmen errechnet man zweckmäßigerweise den sog. Ankermindeststrom $I_{a_{\min}}$, der zum Nenndrehmoment des Motors gehört. Es ist dies der Wirkanteil des Ankerstromes, unter welchen derselbe bei Vollast — unabhängig vom Grade der Kompensation — nicht sinken kann. Man berechnet ihn zu:

$$I_{a_{\min}} = \frac{N_{\text{syn}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2_0}} \cdot 1000 = \frac{Md_{\text{neenn}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2_0}} \cdot n_{\text{syn}} \cdot 1,03$$

bei Dreibürstenschaltung, und zu:

$$I_{a_{\min}} = \frac{N_{\text{syn}}}{3 \cdot U_{2_0}} \cdot 1000 = \frac{Md_{\text{neenn}}}{3 \cdot U_{2_0}} \cdot n_{\text{syn}} \cdot 1,03$$

bei Sechsbürstenschaltung.

Hierbei ist N_{syn} die auf synchrone Drehzahl bezogene Motorleistung, Md_{nenn} das Nenndrehmoment, U_{2_0} die Ankerstillstandsspannung.

Dieser Wert ist deshalb von besonderer Wichtigkeit, weil er die Phasenlage des Ankerstromes zu bestimmen erlaubt. Der tatsächliche Ankerstrom I_a besteht aus den beiden aufeinander senkrecht stehenden Komponenten des Wirkstromes, der gleich $I_{a_{\text{min}}}$ ist, und des unbekanntes Blindstromes. Dieser letztere ist also zu berechnen aus:

$$I_{a_{\text{blind}}} = \sqrt{I_a^2 - I_{a_{\text{min}}}^2}$$

Man kann auch den $\cos\varphi$ des Ankerstromes, bezogen auf die Anker-spannung, bestimmen als das Verhältnis zwischen $I_{a_{\text{min}}}$ und I_a .

Der Ankerstrom steigt nur bei der unkompenzierten Maschine immer mit steigendem Drehmoment an. Bei der kompenzierten führt schon der leer laufende Motor einen Ankerstrom, der gleich dem Vollaststrom oder in Sonderfällen sogar noch größer als dieser werden kann. Bei der Messung mit steigendem Moment fällt dann der Ankerstrom erst ab, erreicht einen Tiefstwert und nimmt wieder zu. Der Tiefstwert ist identisch mit dem Mindeststrom für das betreffende Drehmoment, wie verschiedenartig der Stromverlauf sein kann. Allgemein läßt sich sagen, daß der Ankerstrom, bevor er die Mindeststromgerade berührt, voreilenden Charakter hat und nachdem er sich wieder davon abhebt, induktiven Charakter annimmt.

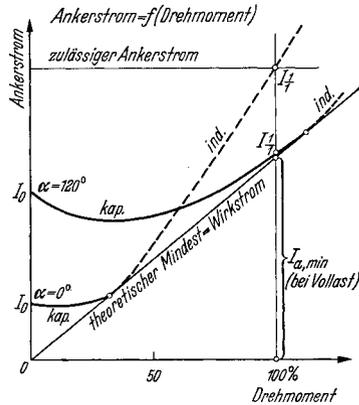


Abb. 158. Der Ankerstrom über dem Drehmoment. — = kapazitiver, - - - = induktiver Strom. Bei Berührung mit der Mindeststromgeraden ist er reiner Wirkstrom.

Das Verhalten des Ankerstromes läßt sich am besten aus dem *Kreisdiagramm* des Motors plus Drehregler erkennen. In Abb. 159 sind die Kreise für die Stellung der tiefsten, dreier mittlerer und der höchsten Drehzahl wiedergegeben. Diesen Kreisen können die Netzgrößen in der üblichen Weise entnommen werden. Der Ankerstrom I_a kann ebenfalls abgegriffen werden, jedoch ist zu beachten, daß der Maßstab für jede Drehreglerstellung ein anderer ist. Man erhält I_a als die Strecke zwischen Magnetisierungspunkt P_0 , der aus der Summe von Motor- und Drehreglerleerlaufstrom gewonnen wird, und Betriebspunkt P auf dem betrachteten Kreise. Der Ankerstrommaßstab ist angenähert zu bestimmen aus:

$$\text{Ankerstrommaßstab } a_2 = a_1 \cdot \frac{U}{U_{2_0} - \bar{U}_{\text{verkettet}}}$$

bei Dreibürstenschaltung,

$$= a_1 \frac{U}{\sqrt{3} (U_{2_0} - U_r)}$$

bei Sechsbürstenschaltung.

Hierbei ist a_1 der Netzstrommaßstab in A/mm, U die Motorspannung, U_{2_0} die Ankerstillstandsspannung und U_r die Regelspannung, die gleich $(U_{dr} + U_{hi}) \cos(\alpha/2)$ ist. Wenn diese letzteren Werte nicht bekannt sind, kann man auch in guter Annäherung setzen:

$$a_2 = a_1 \frac{n_{syn}}{n_0} \cdot \frac{U}{U_{2_0}}, \quad \text{bzw.} \quad = a_1 \frac{n_{syn}}{n_0} \cdot \frac{U}{\sqrt{3} \cdot U_{2_0}},$$

wobei n_0 die für den betreffenden Kreis geltende Leerlaufdrehzahl darstellt. Insbesondere ist es auf Grund dieser Betrachtungen möglich, bei einer in Betrieb befindlichen Maschine die Ankerstromstärke festzustellen. Man bestimmt den Netzstrom nach Größe und Phase, zeichnet

ihn auf und mißt die Strecke zwischen Endpunkt des Stromvektors und Magnetisierungspunkt. Mit obigem Maßstab erhält man die Größe des Ankerstromes.

Die Kreise für den ständergespeisten Nebenschlußmotor liegen für den unter-

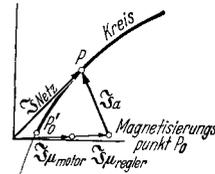
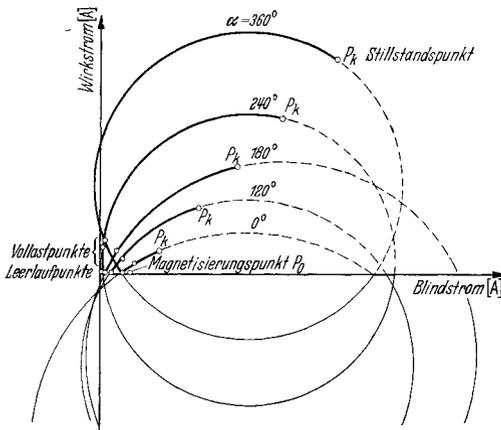


Abb. 159. Gemessene Ortskurven (Kreise) des Netzstromes des Motors mit Einfachdrehregler für 5 verschiedene Drehreglerstellungen entspr. tiefster, synchroner, höchster und zweier mittlerer Drehzahlen.

synchronen Betrieb sehr tief, für den synchronen Bereich noch merklich tiefer als der entsprechende Asynchronmotorkreis, und verlaufen für die hohen Geschwindigkeiten recht hoch. Man erkennt aus den Kreisen in Abb. 159, daß der Motor bei kleinen bis mittleren Geschwindigkeiten einer besonderen Kompensation bedarf, oberhalb der synchronen Drehzahl aber von sich aus einen guten Leistungsfaktor annimmt. Für den unkompenzierten Motor gehen natürlich alle Kreise durch den Magnetisierungspunkt.

Das Verhalten einer neuen Motortype wird am besten an Hand der aus den Prüfergebnissen gewonnenen Kreisbilder erkannt. Dies gilt besonders mit Rücksicht auf die Überlastbarkeit und den Leistungsfaktor, wovon der Grad der nötigen Kompensation abhängt.

Grundsätzlich richtet man sich bei der *Einstellung der Kompensationsspannung* nach folgenden Regeln. Untersynchron kompensiert man möglichst so stark, daß der Ankerstrom bei Vollast nahezu gleich dem Mindeststrom wird. Dies geschieht mit Rücksicht auf die Erwärmung. Meist ist dieser Einstellung aber eine Grenze gesetzt durch den Leerlaufankerstrom, der aus den gleichen Gründen nicht zu groß werden darf. Man kompensiert daher im allgemeinen so stark, daß der Leerlaufankerstrom gleich dem Vollastankerstrom wird, wobei dieser

dann bereits induktiven Charakter erhält. Motoren für Ventilatorantrieb, die untersynchron nur mit einem schwachen Drehmoment belastet werden, kompensiert man am besten gar nicht. Motoren für schweren Anlauf (Papierkalanders, Gummikalanders usw.) kompensiert man bei der tiefsten Drehzahl so stark, daß sie mit Sicherheit das verlangte Anzugsmoment hergeben. Diese Motoren dürfen dann meistens nicht mehr längere Zeit unbelastet laufen.

Die Kompensationsspannung im synchronen Bereich, die bei den größeren Maschinen durch einen besonderen Spartransformator, der der Speisung der Drehreglerprimärwicklung dient, in weiten Grenzen einstellbar ist, wird so gewählt, daß ein guter Leistungsfaktor bei einem Ankerstrom erreicht wird, der kapazitiv ist und rund 20 bis 30% über dem Mindestwert liegt. Unter Umständen ist mit Rücksicht auf einen zu hohen Ankerstrom kurz vor Synchronismus etwas weniger stark zu kompensieren.

Bei den hohen Drehzahlen strebt man mit Rücksicht auf die gute Stromwendung einen möglichst kleinen Ankerstrom an. Meistens reicht eine ganz kleine oder auch verschwindende Kompensationsspannung aus, um bei einem den Mindeststrom im Anker nur um 10% übersteigenden Strom einen Netzleistungsfaktor von 1,0 zu erreichen. Voreilende Leistungsfaktoren im Netz vermeidet man auf jeden Fall, da die geringen Vorteile allzu teuer durch die erhöhte Beanspruchung des Ankers, des Stromwenders und der Bürsten erkauft werden.

Die *Belastungsaufnahmen* nimmt man am besten bei konstanten Drehreglerstellungen auf, und zwar bei den Werten 0, 120, 180, 240 und 360°, also bei 100, 50, 0, -50 und -100% der Regelspannung. Das Drehmoment ändert man zwischen 0 und 125% um jeweils 25%. Man beachte, daß die fast ausschließlich als Belastungsmaschine zur Verwendung kommende Pendelbremse nicht auf Drehmoment Null entlastet werden kann, da ihre Leerlaufverluste natürlich von der Probemaschine gedeckt werden müssen. Man wiege sie daher auch dann aus, wenn man ihren Erreger- oder Ankerkreis zur Einstellung von „Leerlauf“ geöffnet hat.

Die Meßergebnisse lassen sich auf die mannigfaltigste Art darstellen. Für den Abnehmer der Maschine, für den Berechner und für nachträgliche Untersuchungen an Ort und Stelle haben sich folgende Darstellungen gut bewährt:

1. Drehzahlkennlinien $n = f(Md)$ bei verschiedenen Reglerstellungen.
2. Drehzahlkennlinien $n = f(\alpha)$ bei verschiedenen Drehmomenten.
3. Wirkungsgrad- und Leistungsfaktorkennlinien $= f(n)$ bei verschiedenen Drehmomenten.
4. Netzleistungsaufnahme $N_{\text{auf}} = f(n)$ bei verschiedenen Drehmomenten.
5. Ankerstrom $I_a = f(Md)$ bei verschiedenen Reglerstellungen.
6. Strom im Netz, im Anker, im Drehregler und Leistungsfaktor, Wirkungsgrad sowie Drehzahl $= f(\alpha)$ bei vollem Drehmoment.

Solche Kurven sind zum Teil in den Abb. 160 wiedergegeben. Man beachte, daß man der Kurve zu 4., entsprechend Abb. 160 c, wenn man die Punkte gleicher Reglerstellung miteinander verbindet, sowohl den

Drehzahlabfall, also die Drehzahlkennlinie, wie auch den Wirkungsgrad als das Verhältnis Abgabe/Aufnahme entnehmen kann. An einer laufenden Maschine braucht man nur die Leistungsaufnahme und die Drehzahl zu messen, um den Grad der Belastung, also insbesondere auch eine etwaige Überlastung feststellen zu können.

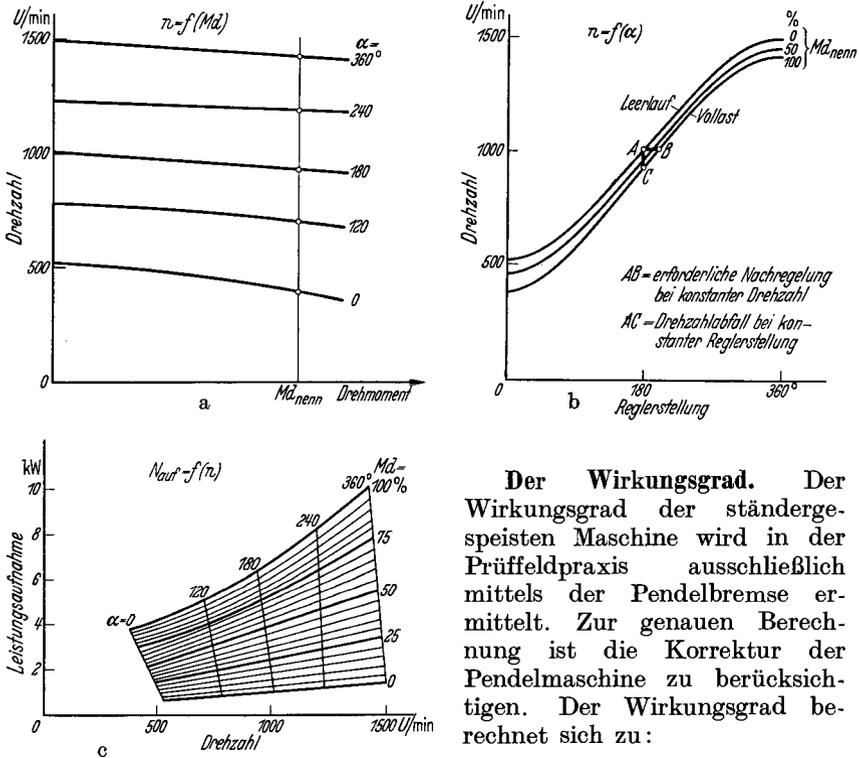


Abb. 160. Typische Belastungskennlinien des Motors mit Einfachdrehregler.

Der Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad der ständergespeisten Maschine wird in der Prüffeldpraxis ausschließlich mittels der Pendelbremse ermittelt. Zur genauen Berechnung ist die Korrektur der Pendelmaschine zu berücksichtigen. Der Wirkungsgrad berechnet sich zu:

$$\eta \% = \frac{Md \cdot n}{N_{\text{auf}} \cdot 9,73} \text{ in } \%,$$

wobei Md = Drehmoment in mkg (einschl. Korrektur),
 n = Drehzahl in Uml/min,
 N_{auf} = Leistungsaufnahme in kW ist.

Umkehr der Drehrichtung. Die Drehrichtungsumkehr geschieht durch Vertauschen zweier Netzzuleitungen. Das Bürstenjoch ist entgegen der neuen Drehrichtung bei Regelung auf schnellere Geschwindigkeit zu verstellen. Bei Motoren ohne untersynchrone Kompensation ist nichts weiter erforderlich. Bei Maschinen mit untersynchrone Kompensation ist dagegen das Joch vom Drehregler zu entkuppeln, um den doppelten Kompensationswinkel gegen die neue Drehrichtung zu verdrehen und wieder einzukuppeln. Es ist natürlich praktischer, das Joch mittels des Verstellorganes, also bei noch eingekuppeltem Drehregler zu verstellen, dann auszukuppeln und nun-

mehr den Regler allein in seine Ausgangslage zurückzuführen, worauf wieder die gemeinsame mechanische Verbindung herzustellen ist. Diese besteht meistens aus einer Seilverbindung, seltener wird auch eine Kette als Übertragungsglied gewählt.

c) Der läufergespeiste Drehstromnebenschlußmotor (Schragemotor).

Aufbau und Wirkungsweise. Der läufergespeiste Nebenschlußmotor besitzt einen Läufer mit zwei getrennten Wicklungen und einen Ständer mit einer einzigen Wicklung. Die eine der Läuferwicklungen ist dreiphasig ausgeführt und liegt als Primärwicklung über drei Schleifringen am speisenden Netz. Die zweite Wicklung ist eine normale Gleichstromankerwicklung, die in den gleichen Nuten liegt und zu dem Kommutator geführt ist. Auf diesem schleifen zwei gegeneinander bewegliche Bürstensätze, deren Bürsten mit den Anfängen und Enden der mehrphasigen, offenen Ständerwicklung verbunden sind (Abb. 161). Das von der Netzwicklung hervorgerufene Drehfeld läuft relativ zum Läuferisen mit synchroner Geschwindigkeit um, während seine Relativgeschwindigkeit zum Ständer und zum Raum entsprechend dem Schlupfe geringer ist. Bei Synchronismus steht das Drehfeld, vom Ständer aus betrachtet, still, und bei Übersynchronismus kehrt es seinen Drehsinn um.

Die in Polteilung auf dem Kommutator zu messende Ankerspannung hat einen konstanten Wert, der unabhängig von der mechanischen Drehzahl des Läufers ist. Dieser ist als ein umlaufender Transformator zu betrachten, dessen Primär- und Sekundärwicklung relativ zueinander ruhen. Durch die beiden gegeneinander verschiebbar angeordneten Bürstensätze kann jede gewünschte Teilspannung am Stromwender abgegriffen werden. Ihre Größe verhält sich zur vollen Spannung wie die zwischen den Bürsten liegende Sehne zum Durchmesser, wenn man die Bürstenstellung im zweipoligen Bild wiedergibt (Abb. 162). Stehen die beiden zueinander gehörenden Bürsten auf dem Kommutator nebeneinander, dann ist die abgegriffene Spannung gleich Null. Führt man sie einander vorbei, so dreht die Spannung ihre Phasenlage um 180° herum und die Spannung nimmt wieder zu, bis sie endlich als negativen

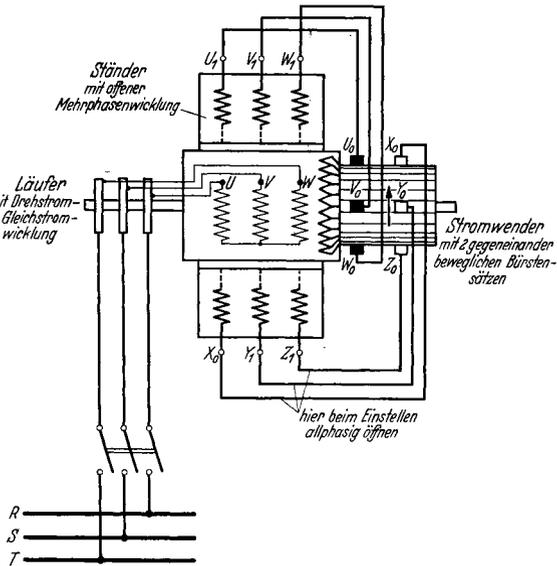


Abb. 161. Schaltung des Schragemotors.

Höchstwert wieder die Durchmesserspannung erreicht. Durch gemeinsames Verdrehen der Bürstensätze im gleichen Sinn wird die Größe der Spannung zwischen ihnen nicht geändert, wohl aber ändert sich die

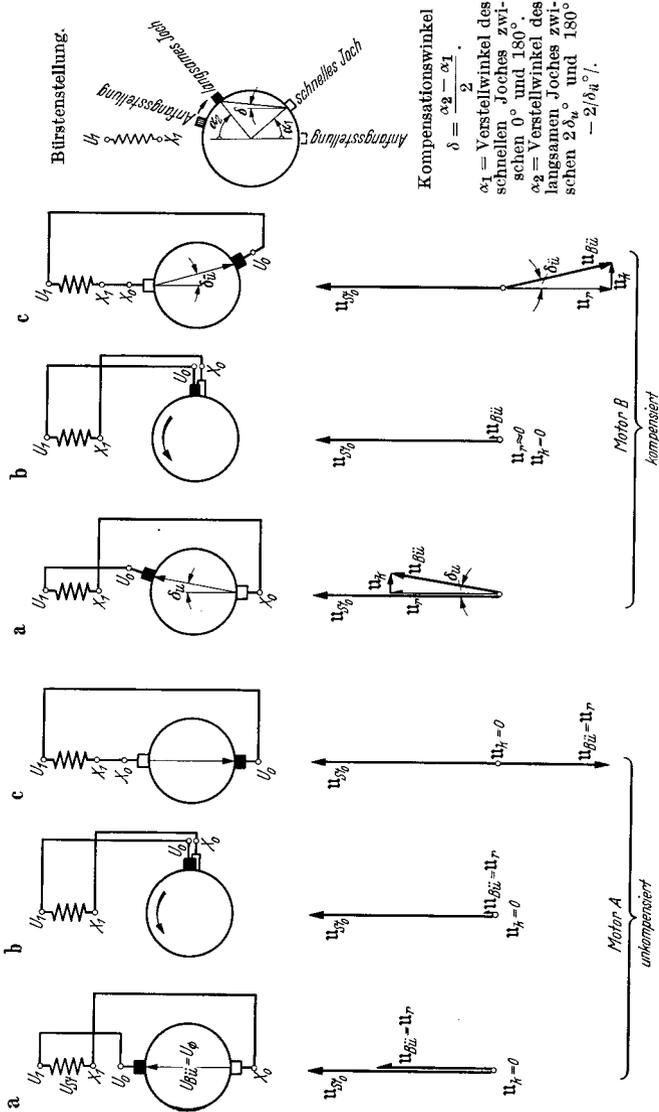


Abb. 162. Bürstenstellungen und Spannungsdiagramme des Schragmotors für unkompenzierte und für kompenzierte Maschinen. Es gilt a) für kleinste, b) für synchrone, c) für übersynchrone Drehzahl. Rechts allgemeine Stellung. U_{δ} ist die Durchmesserspannung des Ankers, U_k die drehzahleigende Komponente, U_r die phaseneigende Komponente der Bürstenspannung $U_{\delta k}$. $U_{\delta k_0}$ ist die Spannung der Ständerwicklung bei Stillstand und offenem Sekundärkreis, für den auch die Diagramme gelten.

Phasenlage. Spannung und Phase sind also frei wählbar. Nur die Frequenz der Bürstenspannung hängt von der Drehzahl des Motors ab, und zwar ist sie, im Gegensatz zu den ständergespeisten Typen, gleich der Schlupffrequenz.

Die Spannung, die in der Ständerwicklung induziert wird, und ihre Frequenz hängen von der Drehzahl ab. Sie sind am größten im Stillstand, verschwinden bei Synchronismus und nehmen wieder zu bei übersynchronen Drehzahlen. Die Ständerwicklung verhält sich also genau wie die Sekundärwicklung eines normalen Asynchronmotors. Ihre Regel- und ihre Kompensationsspannung erhält sie größten- und phasengerecht über die Bürsten (Abb. 162 A, B). Wenn diese eine phasengleiche Spannung abgreifen, wirkt diese nur drehzahlregelnd, wenn sie eine um 90° nacheilende Spannung abgreifen, wirkt dieselbe phasenregelnd. Im allgemeinen liegt die Sehne durch zwei zueinander gehörenden Bürsten in gleicher Achse mit der zugehörigen Ständerphase, und nur bei den größeren Motoren bewirkt man durch eine kleine Schwenkung der Bürstenachse eine Kompensation der Maschine. Die Bürstenachse muß untersynchron um einen Winkel δ_u gegen die Drehrichtung und übersynchron um einen kleinen Winkel δ_u in der Drehrichtung verschoben werden, um eine richtige Kompensierung zu erhalten. Es liegen also genau die gleichen Verhältnisse wie beim ständergespeisten Motor vor. Im Synchronismus ist, ohne sehr komplizierte mechanische Vorkehrungen, keinerlei Kompensation möglich. Der Schragemotor nimmt dort also den gleichen Charakter wie ein normaler, kurzgeschlossener Asynchronmotor an.

Bei der nichtkompensierten Maschine werden beide Joche bei voller Ausregelung um je 180° el verstellt. Bei der kompensierten Maschine jedoch macht das eine Joch nur einen Winkel von weniger als 180° , während das andere um volle 180° verstellt wird. Letzteres muß also schneller verdreht werden. Dies kann leicht durch eine verschieden starke Zahnradübersetzung zwischen der gemeinsamen Verstellwelle und den beiden Jochen oder durch andere geeignete konstruktive Mittel erreicht werden. Es gilt die Verstellregel, daß beim Höherregeln das schnellere Joch *in* der Drehrichtung des Kommutators verdreht werden muß. Zum Zwecke der untersynchronen Kompensation ist ein beliebiges Joch aus der Umkehrstellung gegen die Ankerdrehrichtung um den Winkel $2\delta_u$ zu verstellen. Meistens trägt das eine Bürstenjoch die Marke U und das andere zwei Marken R und L , von denen die eine für Rechts- und die andere für Linkslauf gilt. Durch ein Langloch im Joch ist es möglich, nach Lösen der Befestigungsschrauben die Umstellung von der einen in die andere Lage vorzunehmen. Soll die Betätigung der Verstellwelle, wie es in vielen Fällen erwünscht ist, für beide Drehrichtungen des Motors im selben Sinne erfolgen, so muß durch entsprechende Maßnahmen, z. B. Umstecken von Zahnrädern, dafür gesorgt werden, daß wiederum das schnellere Joch in der neuen Kommutatordrehrichtung bewegt wird.

Die *Regelspannung* des Schragemotors folgt etwa dem Gesetz:

$$U_r = U_\varnothing \cdot \cos \alpha_1.$$

Hierbei bedeutet U_\varnothing die Durchmesserspannung des Ankers und α_1 den Verstellwinkel des schnellen Jochs aus der 0° -Stellung. Der Winkel des anderen Joches, das die untersynchrone Ausgangslage $2\delta_u$ ent-

sprechend der wirksamen Bürstenachsenverschiebung δ_u hat, sei α_2 (Abb. 162). Es ist:

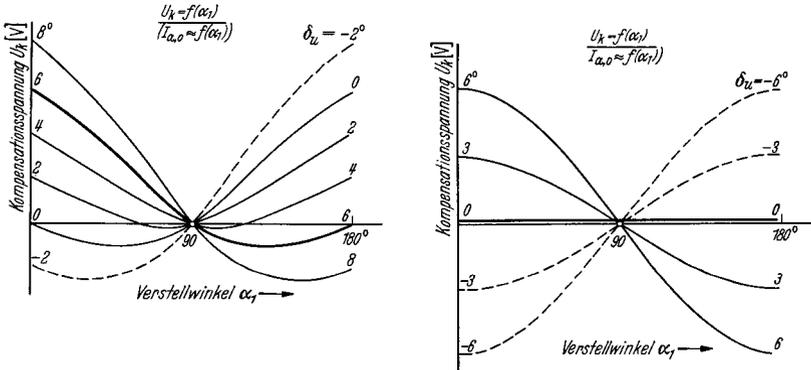
$$\alpha_2 = 2\delta_u + \frac{\alpha_1}{\ddot{u}},$$

wobei \ddot{u} = Übersetzung vom schnellen aufs langsame Joch ist, also = 1,0 bei unkompensierten, = $1,0 + p\%/100$ bei kompensierten Motoren ist.

Der untersynchrone Kompensationswinkel δ_u zwischen Bürstenachse und Achse der Ständerwicklung geht allmählich während des Hochregels in den übersynchronen Kompensationswinkel $\delta_{\ddot{u}}$ über, der meistens zu Null gemacht wird. Seltener wählt man einen schwach negativen Wert. Der *Kompensationswinkel* beträgt:

$$\delta = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} = \delta_u - \frac{\alpha_1}{2} \left(1 - \frac{1}{\ddot{u}}\right),$$

$$\approx \delta_u - \frac{\alpha_1}{200} p\%.$$



a) Kompensierter Motor. Übersetzung der Joche $\ddot{u} > 1,0$.
 b) Unkompensierter Motor. Übersetzung der Joche $\ddot{u} = 1,0$.

Abb. 163. Verlauf der Kompensationsspannung U_k des Schragmotors bei verschiedenen untersynchronen Kompensationswinkeln δ_u . Die stark ausgezogenen Kurven gelten für richtige Einstellung. (Die Leerlauf-Sekundärströme $I_{a,0}$ haben denselben typischen Verlauf.)

Die *Kompensationsspannung* hängt unmittelbar vom Kompensationswinkel δ (genauer vom $\sin \delta$) und von der Regelspannung U_r ab nach der Gleichung:

$$U_k = \frac{U_r}{57,3} \cdot \delta = \frac{U_\emptyset \cdot \cos \alpha_1}{57,3} \cdot \delta \quad \text{mit} \quad 57,3 = \frac{360}{2\pi}.$$

Abb. 163 zeigt den Verlauf der Kompensationsspannung einer kompensierten und einer unkompensierten Maschine für verschiedene untersynchrone Kompensationswinkel δ_u . Die Kennlinien des Leerlaufankerstromes $I_{a,0}$ auf der Kommutatorseite haben im wesentlichen den gleichen Verlauf, so daß wie beim ständergespeisten Motor von ihnen rückwärts auf die Kompensationsspannung der Maschine bzw. die Stellung der Joche geschlossen werden kann.

Die Einstellung des Schragemotors. Bei dem mit dreiphasigem Ständer ausgeführten Schragemotor unterbricht man alle drei Sekundärphasen und legt den Läufer über zwei Schleifringe an das Netz verringerte Spannung. Dann verstellt man den Läufer so lange, bis die Spannung der Ständerphase $U_1 X_1$ ein Maximum erreicht, das genau an der Gleichheit der beiden Spannungen in den Phasen $V_1 Y_1$ und $W_1 Z_1$ erkannt werden kann, die den halben Maximalwert haben müssen. In dieser Stellung wird der Läufer festgekeilt.

Dann wird das Bürstenjoch I , dessen Bürsten $U_0 V_0 W_0$ heißen, eingestellt, indem man es so lange dreht, bis die Spannung zwischen den Bürsten V_0 und W_0 verschwindet und die Spannung zwischen $U_0 V_0$ gleich der zwischen $U_0 W_0$ geworden ist. Man wählt von den an sich möglichen Stellungen die für die Lage der Zuleitungskabel günstigste, die mit U bezeichnet wird.

Anschließend stellt man das Joch II ein, bei dem die Spannung zwischen Y_0 und Z_0 zu Null werden muß, während zwischen $X_0 Y_0$ und $X_0 Z_0$ gleiche Werte abzulesen sind. Man berücksichtigt wiederum die Lage der Zuleitungen und wählt weiterhin nur eine solche Stellung, wo die Bürsten des einen Joches genau zwischen die Bürsten des danebenliegenden anderen Joches zu sitzen kommen. Es muß liegen X_0 zwischen V_0 und W_0 , Y_0 zwischen W_0 und U_0 und Z_0 zwischen U_0 und V_0 . Man bezeichnet auch diese Stellung mit U . Jetzt werden die beiden Bürstenjoches untereinander und mit der Verstellwelle über Zahnräder oder Seile verbunden. Die Festkeilung des Läufers wird gelöst und dieser dreiphasig mit verringerter Spannung erregt. Die Spannung zwischen den Bürsten $U_0 X_0$, $V_0 Y_0$ und $W_0 Z_0$ ist gleich dem Maximalwert U_{\varnothing} . Man kontrolliert dies an Hand einer kleinen Verdrehung der Verstellwelle in der einen und in der anderen Richtung, wobei die Bürstenspannung jedesmal abnehmen muß. Die Spannung U_{st_0} der Ständerphasen ist jetzt gleich groß und hat meistens etwa den doppelten Wert der Ankerstillstandsspannung. Man mißt jetzt wie beim ständergespeisten Motor die Differenzspannung an den drei Trennstellen des Sekundärkreises. Sie muß bei richtiger Stellung der beiden Joche gleich $U_{st_0} - U_{\varnothing}$ sein. Ist sie dagegen gleich der Summe aus diesen beiden Werten, so sind entweder bei der Ständerwicklung oder bei den Bürstenzuleitungen Anfang und Ende miteinander zu vertauschen. Nunmehr verstellt man die beiden Joche durch Betätigung des Handrades. Die Differenzspannung muß zunehmen und schließlich den Endwert $U_{st_0} + U_{\varnothing}$ erreichen. Man geht in die Ausgangsstellung zurück, schaltet den Sekundärkreis zusammen, legt den Motor wieder an verringerte oder an volle Spannung und regelt ihn vollständig durch. Die Drehzahl nimmt, ausgehend vom tiefsten Wert, den höchsten Betrag an. Durch Umkehrversuche, wie sie beim ständergespeisten Motor beschrieben wurden, wird die Umkehrstellung der Joche nachkontrolliert.

Bei den kleineren und mittleren nichtkompensierten Motoren, aber auch bei den übrigen Maschinen wendet man gern das *vereinfachte Einstellverfahren* mit dreiphasiger Erregung an. Man unterbricht den Sekundärkreis wiederum an drei Stellen und verstellt die beiden mit-

einander gekuppelten Bürstenjoch so lange, bis die Differenzspannung an der Trennstelle ein Minimum wird. Gleichzeitig mißt man zwischen den Bürsten $U_0 X_0$, $V_0 Y_0$ und $W_0 Z_0$ das Maximum der Ankerstillstandsspannung U_\varnothing . Das Minimum ist nicht unbedingt gleich der Differenz aus Ständer und Läuferspannung, da die Jochs wohl in Gegenstellung, aber durchaus nicht genau in Umkehrstellung stehen. Dann schaltet man den Sekundärkreis zusammen und fährt den Motor an. Man mißt die Drehzahl, den Netz- und den Ankerstrom für die eine und die andere Drehrichtung. Es ergeben sich im allgemeinen verschiedene Werte. Nunmehr löst man eines der beiden Jochs, am besten jenes, welches man am besten erreichen kann und verstellt es im Lauf vorsichtig so lange, bis Drehzahl und Ströme den Mittelwert der vorigen Ablesungen annehmen. Man befestigt das Joch wieder, kehrt die Drehrichtung um und verfeinert unter Umständen noch einmal die Einstellung. Dann verstellt man wiederum beide Jochs gemeinsam, bis man den Tiefstwert der Drehzahl findet. Jetzt stehen beide Jochs in Umkehrstellung und können markiert werden. Bei Motoren mit verschieden schnell bewegten Jochs ergibt sich ein kleiner Fehler, der, wenn die Jochs nicht allzuweit von vornherein aus der U -Stellung verschoben waren, ohne Bedeutung ist. Dieses Verfahren ist das schnellste und kann besonders auch bei bereits eingestellten Maschinen zur Kontrolle durchgeführt werden.

Größere Motoren erhalten oft eine höhere Sekundärphasenzahl als drei. In diesen Fällen benutzt man am besten zum Einstellen die dreiphasige Läufererregung und verwendet zum Einstellen zwei Nullpunktwiderstände. Man stellt erst das eine und dann das andere Joch ein. Die Differenzspannung zwischen gleichbezeichneten Ständerklemmen und Bürsten muß bei richtiger Stellung gleich der halben Differenz aus U_{st_0} und U_\varnothing sein. Im übrigen verfährt man wie bei der normalen Maschine.

Leerlauf-, Kurzschluß- und Lastversuche. Für die Durchführung dieser Versuche gelten die gleichen Gesichtspunkte wie beim ständergespeisten Nebenschlußmotor. Man beachte jedoch, daß der Strom im Sekundärkreis Schlupffrequenz besitzt und daher nicht über einen Stromwandler, sondern nur direkt gemessen werden kann. Beim Durchgang durch den Synchronismus beobachtet man gelegentlich ein etwas unstetiges Verhalten der Maschine, das sich in der Drehzahl und besonders im Ankerstrom als ein Sprung bemerkbar macht. Bei genau synchronem Lauf steht der Fluß des Motors im Raume und relativ zum Ständer still. Er klammert sich dann an nie zu vermeidende magnetische Ecken, die durch Unsymmetrien bedingt werden, fest, so daß es zu einer Art Reaktionswirkung des Motors kommt, wie man sie bei den Einzelpolsynchronmaschinen kennt. Auch nicht völlig gleiche Widerstände in den Sekundärphasen bewirken ein Festhaken im Synchronismus, der durch Öffnen einer oder mehrerer Sekundärphasen sogar noch weiter gesichert werden kann. Der Motor läuft dann nämlich als Einankerumformer, der allerdings nur seine Erregerleistung gleichstromseitig abgibt, im übrigen aber als reiner Synchronmotor Drehmoment entwickelt. Nur bei Motoren mit gemeinsamer Drehzahl-

regelung kann sich dieses synchrone Hängenbleiben gelegentlich unangenehm bemerkbar machen.

Die *Einstellung der Kompensation* wird allgemein so vorgenommen, daß man nur untersynchron durch Verstellung des einen Joches kompensiert. Es bleibt sich gleich, welches der beiden Joche verstellt wird. Die Verstellung erfolgt aber in jedem Fall entgegen der Drehrichtung. Nur die Drehzahlkurve wird bezüglich der Handradlage etwas verschoben, sonst ergeben sich keine Unterschiede bei der Verdrehung des einen oder des anderen Jochs. Man kompensiert so stark, daß der Ankerleerlaufstrom gleich dem Vollaststrom wird. Der Ankermindeststrom auf der Kommutatorseite wird, entsprechend wie beim ständergespeisten Motor, bestimmt zu:

$$I_{a, \min} = N_{\text{syn}} \cdot \frac{1000}{m_{\text{sec}} \cdot U_{\text{sto}}} = \frac{Md_{\text{neenn}}}{m_{\text{sec}} \cdot U_{\text{sto}}} \cdot n_{\text{syn}} \cdot 1,03,$$

wobei m_{sec} die Phasenzahl der Ständerwicklung ist. Da man im Synchronismus den läufergespeisten Motor nicht kompensieren kann, nimmt dort der Ankerstrom, wenn der Kurzschlußstrom nicht allzu klein ist, ungefähr den Mindestwert an. Man beobachtet wegen der Verluste einen etwa 5% höheren Wert. Übersynchron kompensiert sich die Maschine bei Vollaft allein. Man verzichtet also auf eine Winkelverschiebung. Den untersynchronen Kompensationswinkel kann man im allgemeinen nicht in Grad ablesen, aber man bestimmt ihn leicht nach folgender Formel:

$$\delta_u = \frac{d}{\pi \cdot D_{\text{joch}}} \cdot 2p \cdot 90^\circ,$$

in der d die Verschiebung des einen Joches aus der U -Stellung in mm, D_{joch} der Jochdurchmesser in mm, $2p$ die Polzahl des Motors ist. δ_u ist der Verdrehungswinkel der Bürstenachse gegen die Ständerachse. Die Winkelverdrehung des Joches selbst ist doppelt so groß.

Die *Lastablesungen* werden bei verschiedenen konstanten Bürstenstellungen durchgeführt und in der gleichen Weise wie beim ständergespeisten Motor aufgetragen. Auch der Wirkungsgrad wird am besten direkt mittels der Pendelbremse bestimmt. Wenn man die Kreise des Netzstromes aufträgt, so sieht man den grundlegenden Unterschied gegenüber dem ständergespeisten Motor darin, daß der synchrone Kreis etwas über der Abszisse liegt, während er bei jenem Motor nicht unmerklich unterhalb derselben lag (Abb. 164).

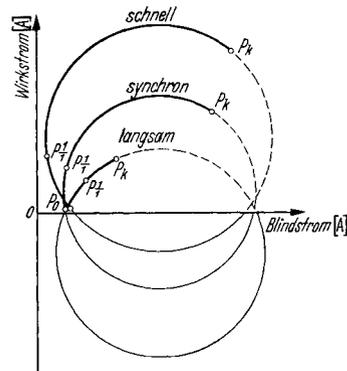


Abb. 164. Gemessene Ortskurven (Kreise) des Netzstromes eines unkompenzierten Schragmotors für Stellung tiefster, synchroner und höchster Drehzahl. Der Leerlaufpunkt aller Kreise fällt praktisch mit dem Magnetisierungspunkt P_0 zusammen.

d) Der Drehstromreihenschlußmotor.

Aufbau und Wirkungsweise. Der Drehstromreihenschlußmotor besitzt in seiner einfachsten Schaltung nach Abb. 165a einen Ständer mit einer normalen Dreiphasenwicklung und einen Läufer mit einer zu einem Kommutator geführten Gleichstromankerwicklung. Beide Wicklungen

sind in Reihe geschaltet und werden also vom gleichen Strom durchflossen. In der sog. Magnetisierungsstellung der Bürsten liegen die Achsen der Ständer- und der Läuferwicklung in gleicher Richtung, und die beiden Wicklungen unterstützen sich. Der dem Netz entnommene Strom ist klein. Bei Verschiebung der Bürsten um 180° el ergibt sich die Kurzschlußstellung, in der die beiden Wicklungen einander entgegenarbeiten. Die Stromaufnahme ist ein Mehrfaches der normalen.

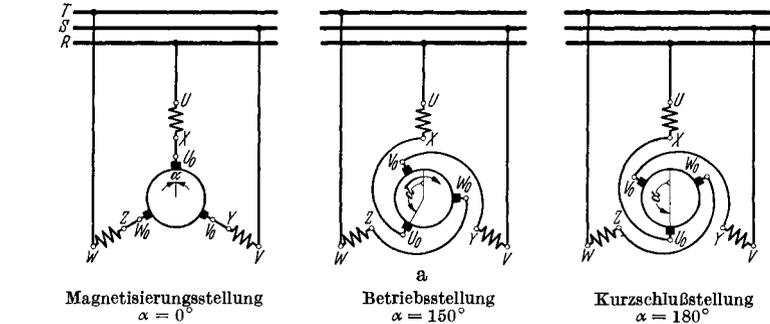
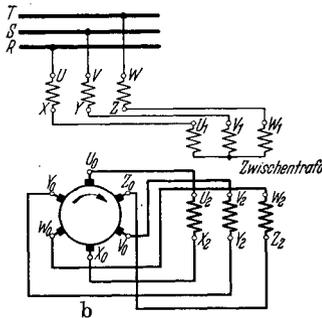


Abb. 165. Drehstromreihenschluß - Kommutatormotor. Schaltung ohne (a) und mit (b) Zwischentrafo. Die richtige Bürstenverschiebung erfolgt gegen den Sinn des Drehfeldes, der Lauf also im Sinne des Drehfeldes.



Sechsbürstenschaltung mit Zwischentrafo. Primärseite kann auch in Δ liegen; bei 8-Bürstenschaltung fehlen $X_0 Y_0 Z_0$ und $X_2 Y_2 Z_2$ werden verbunden.

In beiden Stellungen ist das entwickelte Drehmoment gleich Null. In den Zwischenstellungen der Bürstenbrücke entwickelt der stillstehende Motor ein Drehmoment, dessen Verlauf in Abb. 166 wiedergegeben ist. Dieses wirkt, unabhängig vom Drehsinn des Drehfeldes, immer in solchem Sinne, daß es den Läufer entgegen der Verdrehung der Bürsten aus der Magnetisierungsstellung heraus zum Anlauf zu bringen versucht. Zur Vermeidung schlechter Betriebseigenschaften darf die Verstellung der Bürsten zur Schnellerregelung nur gegen den Drehsinn des Feldes erfolgen. Der Motor läuft dann im Sinne des Drehfeldes, also in der gleichen Richtung, die er als Asynchronmotor bei kurzgeschlossenen Bürsten einschlagen würde.

Der belastete Motor fällt in der Drehzahl bei steigendem Drehmoment stark ab, verhält sich also wie ein Gleichstromreihenschlußmotor. Entsprechend dem Anwachsen des Stillstandsmomentes mit zunehmender Bürstenverschiebung liegen die Drehzahl-Drehmomentkennlinien für höhere Verstellwinkel α ebenfalls höher, so daß sich Kurvenscharen nach Abb. 167 ergeben. Hierauf beruht die Regelbarkeit der Drehzahl bei gleichem Belastungsmoment.

Der völlig entlastete Motor geht durch oder nimmt doch meistens unzulässige Drehzahlen an.

Der völlig entlastete Motor geht durch oder nimmt doch meistens unzulässige Drehzahlen an.

Bei großen Verstellwinkeln über 160 bis 170° fällt das Drehmoment wieder ab, weshalb dieser Bereich durch einen Anschlag gesperrt wird.

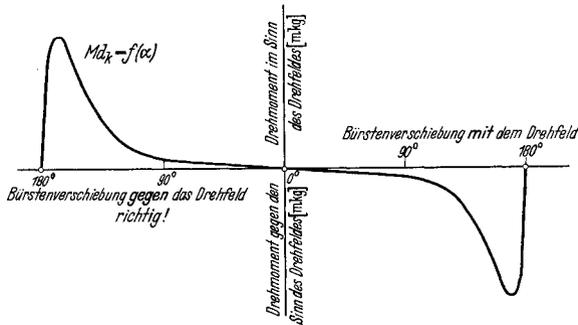


Abb. 166. Stillstandsrehmoment des Drehstromreihenschlußmotors. Motor läuft bei Verschiebung der Bürsten aus Magnetisierungsstellung bei 0° sanft entgegen dem Verstellinn an, bei Verschiebung aus der Kurzschlußstellung bei 180° schroff im Sinne der Verdrehung an.

Bei kleinen Verstellwinkeln unter etwa 100° reicht das Drehmoment meistens nicht mehr aus. Auch dieser Bereich wird verriegelt.

Die Drehrichtungs-umkehr darf nur durch Tauschen zweier Netzphasen und gleichzeitiges Betätigen der Bürstenbrücke im umgekehrten Sinn, also entgegen der neuen Drehrichtung, erfolgen. Wenn die Ausgangsstellung des Joches z. B. 100° betrug, ist es also zu allererst einmal um den doppelten Winkel, also um 200°, entgegen der neuen Drehrichtung zu schwenken, damit die neue Ausgangslage erreicht wird. Statt der räumlichen Bewegung kann man sich auch durch entsprechende zyklische Vertauschung der Bürstenzu-

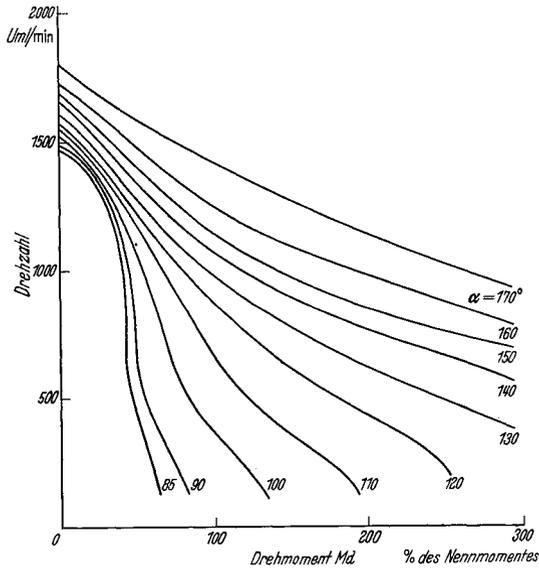


Abb. 167. Drehzahlkennlinien eines durch gesättigten Zwischentransformator stabilisierten Drehstromreihenschlußmotors (Meßergebnisse).

leitungen helfen, auf welche Weise eine gleichwertige Verschiebung um 120 bzw. um 240° erreicht wird. Tauschen zweier Netzphasen allein ändert, wie betont sei, die Drehrichtung nicht. Bei Ungewißheit, ob der Motor richtig angeschlossen oder geregelt wird, empfiehlt es sich, versuchsweise zwei Netzphasen zu tauschen. Der-

jenige Anschluß ist dann der richtige, bei dem Netzstrom merklich kleiner ist.

Der Motor mit Zwischentransformator. In den meisten Fällen ist die Netzspannung höher als die zulässige Kommutatorspannung und man schaltet daher zwischen Ständer und Läufer einen Transformator ein. Die übliche Sechsbürstenschaltung ist in Abb. 165 b wiedergegeben. Der Transformator besitzt auf der Primärseite etwa drei Anzapfungen je Phase, die drei verschiedene Werte des Übersetzungsverhältnisses zwischen Ständer und Läufer einzustellen gestatten. Die Prüfung bei Last entscheidet über die endgültig zu wählende Anzapfung. Unter *Übersetzungsverhältnis* ist der Wert zu verstehen:

$$\ddot{u} = \frac{w_a}{w_{st}}$$

bei Motoren ohne Zwischentransformator und

$$\ddot{u} = \frac{w_a}{w_{st}} \cdot \frac{w_{pr}}{w_{sec}}$$

bei Motoren mit Zwischentransformator.

Hierbei bedeuten w die wirksamen Windungszahlen von Ständer, Anker und Transformator unter Berücksichtigung der sinngemäß zu verstehenden Fußzeichen.

Der Wert von \ddot{u} liegt hart in der Nähe von 1,0. Durch höhere Windungszahl im Läufer oder aber durch höhere Windungszahl in der Transformatorprimärwicklung kann er über 1 gebracht werden. Höhere Werte von \ddot{u} bedeutet einen besseren Leistungsfaktor, da sich der Läufer stärker an der Magnetisierung beteiligt, verschlechtern aber das stabile Verhalten des Motors bei kleinen Drehzahlen, wie unten beim Diagramm erklärt wird. Üblich ist ein Verhältnis zwischen 1,06 und 1,14, in welchen Grenzen es durch die vorgesehenen Anzapfungen am Transformator eingestellt werden kann. Für diese Werte ist der Leistungsfaktor bei synchroner Drehzahl etwa 0,92 und für höhere Geschwindigkeiten gleich 1. Die Stabilität ist dabei noch befriedigend.

Der Einfluß der Sättigung: Der stark gesättigte Motor hat bei hohen Drehzahlen ungünstige Drehzahl-Drehmomentkennlinien. Diese verlaufen zu steil, so daß geringe Laständerungen starkes Nachregeln erforderlich machen. Er wird daher nur mit mäßiger Sättigung ausgelegt. Im Prüffeld ist keine Änderung mehr möglich, da man Anzapfungen in der Ständerwicklung nicht vorsieht. Man versteht aber den Einfluß von Spannungsschwankungen. Eine Erhöhung der Netzspannung beeinflusst den Motor im ungünstigen Sinne.

Die Sättigung des Zwischentrafos wird ziemlich hochgetrieben, da sie einen günstigen Einfluß auf das Verhalten des Motors ausübt. In der Nähe der synchronen Drehzahl ist der Transformator natürlich immer ungesättigt. Dort ist sein Einfluß gering. Bei unter- und bei übersynchroner Drehzahl dagegen sättigt er sich und bewirkt eine Abflachung der Kennlinien. Diese schneiden sogar die Nullpunktsordinate, so daß der Motor unbedenklich entlastet laufen darf (Abb. 167).

als ein Strom, der \ddot{u} mal größer als \mathfrak{I}_1 ist und dagegen um den Winkel α nacheilt. Abb. 169 zeigt

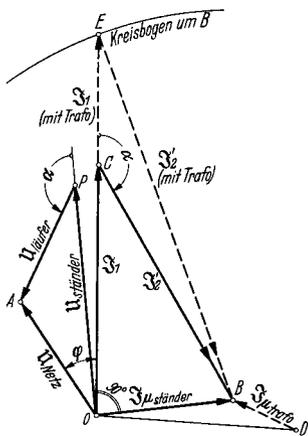


Abb. 169. Spannungs- und Stromdiagramm für untersynchronen Betriebspunkt P in Abb. 168 ohne (ausgezogen) und mit (gestrichelt) Berücksichtigung des Magnetisierungsstromes $\mathfrak{I}_{\mu\text{trafo}}$ des Zwischentransformators. 1. Konstruktion ohne $\mathfrak{I}_{\mu\text{trafo}}$ (ausgezogen):

$\mathfrak{I}_{\mu\text{ständer}}$ senkrecht, nacheilend zu $U_{\text{ständer}}$. Größe aus Magnetisierungslinie des Motors. \mathfrak{I}_1 ergibt sich aus Bedingung, daß $\mathfrak{I}_1 \ddot{u}$ mal so groß werden muß und gegen \mathfrak{I}_1 um Winkel α nacheilend verdreht ist. 2. Konstruktion mit $\mathfrak{I}_{\mu\text{trafo}}$ (gestrichelt): Vorige Konstruktion durchführen. $\mathfrak{I}_{\mu\text{trafo}}$ mit Spitze an B , senkrecht nacheilend zu $U_{\text{läufer}}$ zeichnen. Größe aus Magnetisierungslinie des Transformators entspr. $U_{\text{läufer}}$. Kreisbogen um B mit Radius $BC \cdot \frac{OD}{OB}$ schlagen. Schnittpunkt E auf Verlängerung OC gibt Strom \mathfrak{I}_1 und Strom \mathfrak{I}_2 unter Berücksichtigung des Magnetisierungsstromes des Transformators. Übersynchron fällt P links von OA , D innerhalb von $\triangle OBC$ und E unterhalb von C auf \overline{OC} . \mathfrak{I}_1 mit berücksichtigtem $\mathfrak{I}_{\mu\text{trafo}}$ wird dann kleiner. \mathfrak{I}_1 ist der wirkliche Ständerstrom, \mathfrak{I}_2 der auf die Ständerwindungs- und Phasenzahl und auf in 0° -Stellung befindliche Bürsten bezogene Läuferstrom. (Konstr. 1 gilt auch für Motor ohne Zwischentrafo.)

das gesamte *Strom- und Spannungsdiagramm* für einen bestimmten Lastzustand. Man erkennt, daß der Strom \mathfrak{I}_1 , also der Netzstrom, gegen die Ständerspannung bei unveränderter Bürstenstellung α um einen konstanten, kleinen Winkel verschoben ist. $U_{\text{ständer}}$ und \mathfrak{I}_1 stehen in festem Verhältnis zueinander, wenn man von dem Einfluß der Sättigung absieht. $U_{\text{ständer}}$ ist daher ein Maß für den Strom. Das Drehmoment hängt quadratisch von I_1 ab, also ist das Quadrat von $U_{\text{ständer}}$ ein direktes Maß für das Drehmoment. Wächst also $U_{\text{ständer}}$ für steigende Werte der Drehzahl noch an, so nimmt das Drehmoment des Motors noch zu. Dies bedeutet also unstabiles Verhalten. Aus dem Kreisdiagramm der vorhergehenden Abb. 168 ist zu erkennen, daß der Bereich vom Stillstandspunkt P_k bis zu dem Punkt, für den $U_{\text{ständer}}$ durch den Kreismittelpunkt geht, noch unstabil ist. Daraus sieht man, daß eine Ständerspannung, die kleiner als die Läuferspannung im Stillstand ist, die Unstabilität bedingt. Diesem Zustand entspricht aber ein Wert der Übersetzung \ddot{u} von über 1,0. Nur wenn \ddot{u} unter 1,0 ist, hat der Motor überhaupt keinen unstabilen Bereich, da von vornherein $U_{\text{ständer}}$ kleiner als $U_{\text{läufer}}$ ist. In Wirklichkeit gelten diese Überlegungen nur unter Vernachlässigung der Widerstände, welche bei den meisten Motoren kleinerer und mittlerer Leistung die Unstabilität auch bei Werten von \ddot{u} von etwa 1,08 bis 1,10 gar nicht aufkommen lassen.

Das Diagramm des Reihenschlußmotors (mit Zwischentrafo). Das Diagramm des Motors mit Zwischentrafo unterscheidet sich vom vorhergehenden nicht, wenn man den Magnetisierungsstrom des Transformators vernachlässigt und statt der wahren Läuferspannung die Primärspannung des Transformators einsetzt.

Soll dagegen der Magnetisierungsstrom berücksichtigt werden, so ist ein Diagramm nach Abb. 169 (gestrichelt!) zu entwerfen. Die Entwicklung des Diagrammes ist im Text angegeben. Man sieht, daß der Strom \mathfrak{I}_1 untersynchron durch den Magnetisierungsstrom größer wird und im übersynchronen Gebiet aber kleiner wird.

Das bedeutet aber, daß der Motor bei gleicher Drehzahl untersynchron ein größeres und übersynchron ein kleineres Drehmoment entwickelt, als es bei Verwendung eines ungesättigten Transformators der Fall wäre. Die Drehzahl-Drehmomentkurve wird also tatsächlich durch Verwendung des stark gesättigten Transformators abgeflacht, der Motor mithin stabilisiert.

Der Reihenschlußmotor mit doppeltem Bürstensatz. Zur Verbesserung des Drehzahlverhaltens kann man den Reihenschlußmotor auch mit einem doppelten Bürstensatz ausrüsten, wobei einer der beiden Sätze in der Magnetisierungsstellung verbleibt, während der andere daraus verschoben wird. Man erzielt hiermit bei kleinen Verstellwinkeln flach verlaufende Kennlinien und erhält auch, da der Verstellbereich des beweglichen Joches sich verdoppelt, eine feinere Einstellung des Motors. Dem steht die unvermeidliche Komplikation gegenüber. Der Motor mit doppeltem Bürstensatz wird daher kaum noch ausgeführt.

Die Selbsterregung. Der Reihenschlußmotor hat zwei Arten von Selbsterregung mit netzfremden Periodenzahlen, von denen die eine bei Generatorbetrieb, die andere wichtigere bei Motorbetrieb auftritt.

Die Selbsterregung bei *Generatorbetrieb* tritt auf, wenn der Motor als Generator laufend von außen entgegen seiner eigentlichen Drehrichtung angetrieben wird. Sie setzt bereits bei kleinen Geschwindigkeiten ein, und zwar unabhängig von der Art der Schaltung auf der Primär- oder der Sekundärseite der Maschine. Ihre Frequenz ist ungefähr 2 bis 5 Hz. Der erzeugte Strom ist ein *Drehstrom*, der sich praktisch widerstandslos über das Netz oder die etwa kurzgeschlossenen Klemmen schließt. Außerdem tritt bei Netzanschluß natürlich die erwünschte Erzeugung eines überlagerten Drehstromes von Netzfrequenz auf. Gegenmittel gegen die unerwünschte Selbsterregung bestehen in hoher Sättigung von Motor und Transformator oder im Einbau von Widerständen. Ersteres verschlechtert den $\cos\varphi$, letzteres den Wirkungsgrad. Den mit Dämpfungswiderstand bezeichneten Widerstand kann man, da er nur einen Energieverzehrer darstellt, primär oder sekundär einbauen. Im Motorbetrieb nimmt man ihn heraus. Ein gutes Mittel gegen diese Art der Selbsterregung besteht nicht.

Die Selbsterregung¹ im *Motorbetrieb* tritt nur auf, wenn primärseitig Ständerwicklung und Transformatorwicklung in Dreieck liegen und der Anker in Sechsbürstenschaltung gespeist wird. Diese Schaltung ist aber wichtig. Der selbsterregte Strom ist ein *Wechselstrom*, der von einem Feld der dreifachen Polzahl hervorgerufen wird. Er pulsiert in allen drei Phasen gleichzeitig und schließt sich innerhalb der Dreieckschaltung. Er tritt daher nicht nach außen in Erscheinung. Seine Frequenz ist klein. Die obengenannten Mittel dürfen nicht benutzt werden, um die technischen Eigenschaften des Motors nicht zu verderben. Wie beim Nebenschlußmotor kann man aber die Primärwicklung (dort war es die Hilfswicklung) mit $\frac{2}{3}$ Schritt wickeln oder

¹ Siehe ETZ 56. Jg. H. 41 S. 1121.

sekundär eine Doppelsternschaltung anwenden. Im ersten Fall kann sich kein Erregerfeld der dreifachen Polzahl entwickeln, im zweiten Fall ist der galvanische Weg des Stromes unterbrochen. Ein weiteres Mittel besteht im Aufbringen einer Kurzschluß- oder Dreieckwicklung auf den Schenkeln des Zwischentransformators, die den pulsierenden Fluß, der den parasitären Strom überträgt, unterbindet.

Die Einstellung. Die Einstellung des Reihenschlußmotors braucht nicht mit der Sorgfalt zu erfolgen, wie sie beim Nebenschlußmotor unbedingt erforderlich ist. Man legt ihn am besten an verringerte Spannung und sucht jene Bürstenstellung auf, in der die Netzstromaufnahme am kleinsten ist und der Motor weder nach rechts noch nach links ein Drehmoment entwickelt. Dies ist die Magnetisierungsstellung, die man markiert. Durch Verdrehen um 180°_{el} , also um $180^\circ:p$ räumlich, findet man die Kurzschlußstellung, in der wiederum das Drehmoment verschwindet, der aufgenommene Strom aber ein Maximum ist.

Man erhält die betriebsmäßige Stellung des Bürstenjoches durch Verdrehen desselben um rund $100^\circ:p$ bis $150^\circ:p$ räumlich aus der Magnetisierungsstellung entgegen der Drehrichtung des Drehfeldes. p ist die halbe Polzahl der Maschine.

Der Verstellwinkel zwischen Magnetisierungsstellung einerseits und Kurzschlußstellung andererseits bis zum normalen Regelbereich wird durch Anschläge gesperrt. Man bringt diese so an, daß der Motor bei kleinstem verlangtem Drehmoment noch auf die tiefste verlangte Drehzahl und bei Normalmoment noch auf die höchste Drehzahl geregelt werden kann.

Die Prüfung. *Leerlaufversuche* im eigentlichen Sinne können am Reihenschlußmotor nicht vorgenommen werden. Man macht nur am stillstehenden Motor die Magnetisierungsprobe, die auch am Transformator getrennt durchgeführt wird.

Kurzschlußversuche können am Motor allein, am Transformator allein und an beiden gemeinsam in betriebsmäßiger Schaltung durchgeführt werden. Im letzteren Fall nimmt man auch das Stillstands-drehmoment in Abhängigkeit der Bürstenverschiebung α auf.

Lastversuche werden am besten wie bei allen regelbaren Motoren mittels der Pendelmaschine durchgeführt. Man erregt dieselbe von vornherein, ehe der Reihenschlußmotor eingeschaltet wird, um die Gefahr unzulässiger Drehzahlsteigerung auszuschließen. Man nimmt Kennlinien bei konstanten Bürstenstellungen auf, wobei man jeweils eine andere Anzapfung des Zwischentransformators anschließt. Man wählt endgültig jene Anzapfung, bei der sich eine noch befriedigende Regelbarkeit mit möglichst gutem Leistungsfaktor verbindet. Da der Motor nach den REM auch bei einer um $\pm 5\%$ veränderten Netzspannung anstandslos arbeiten muß, untersucht man ihn bei neuen Typen auch bei diesen Spannungen. Das Drehzahlverhalten darf bei der erhöhten Spannung noch nicht zu Beanstandungen führen.

Die Meßergebnisse werden wie bei den Nebenschlußmotoren teils über der Drehzahl, teils über dem Verstellwinkel α aufgetragen. Der Wirkungsgrad wird ebenfalls vorzugsweise aus der aufgenommenen

und der abgegebenen Leistung ermittelt. Bei Motoren mit betriebsmäßiger Dreieckschaltung macht man auch Belastungsablesungen in Sternschaltung, sofern diese, wie es bei Ventilatorantrieben der Fall sein kann, bei kleinen Drehzahlen und Lasten Verwendung finden soll. Der umgeschaltete Motor zeigt bei Teillast besseren Wirkungsgrad und größere Drehzahlstabilität.

e) Der Einphasen-Reihenschlußmotor (Bahnmotor).

Aufbau und Wirkungsweise. Der Einphasenreihenschlußmotor besitzt grundsätzlich den Aufbau eines kompensierten Gleichstromreihenschlußmotors. Die Schaltung ist in Abb. 170 dargestellt. Der Unterschied gegenüber dem Gleichstrommotor besteht in der Lamellierung des Ständers, in der Form des Hauptpols und in dem kleinen Luftspalt. In den großen Nuten liegt die Erregerwicklung, die den Pol umfaßt, und die Wendepolwicklung, die den Wendezahn umschlingt. In Nuten des Polbogens eingebettet befindet sich die Kompensationswicklung, die mit allen übrigen Wicklungen in Reihe liegt. Sie dient im wesentlichen der Verbesserung des Leistungsfaktors und verhindert außerdem die Feldverzerrung durch den Ankerstrom. Wenn die Maschine ohne Kompensationswicklung ausgeführt würde, müßte vom Netz zusätzlich die volle Magnetisierungsleistung des Ankers in der Bürstenachse aufgebracht werden. Der Anker besitzt eine normale Gleichstromankerwicklung, die als Schleifenwicklung ausgeführt wird.

Parallel zur Wendepolwicklung liegt ein Ohmscher und unter Umständen in Reihe mit diesem noch ein induktiver Widerstand. Durch die Wendepolwicklung fließt ein phasenverschobener Strom, dessen eine Komponente ein Feld zur Aufhebung der Reaktanzspannung und dessen andere Komponente ein Feld zur Aufhebung der Transformatorspannung in der kommutierenden Spule schafft.

Die Wirkungsweise der Maschine, welche mit Wechselstrom beliebiger Frequenz oder mit Gleichstrom betrieben werden kann, üblicherweise aber nur für die Bahnfrequenz von $16\frac{2}{3}$ Hz verwendet wird, ist folgende. Der dem Netz entnommene Strom durchfließt die Erregerwicklung und ruft in der Hauptpolachse einen pulsierenden Kraftfluß Φ hervor, der mit den vom gleichen Strom durchflossenen Ankerleitern ein Drehmoment ausübt. Φ und I hängen durch die Sättigungskurve $\Phi = f(I)$ miteinander zusammen. Das Drehmoment ist dem Produkt aus beiden proportional, verläuft also bei ungesättigter Maschine quadratisch, bei stark gesättigter Maschine fast linear mit dem Strom I . Von der Drehzahl ist es bei gegebenem Strom I praktisch unabhängig. Da aber I mit steigender Drehzahl abnimmt, nimmt auch das Drehmoment mit steigender Geschwindigkeit ab.

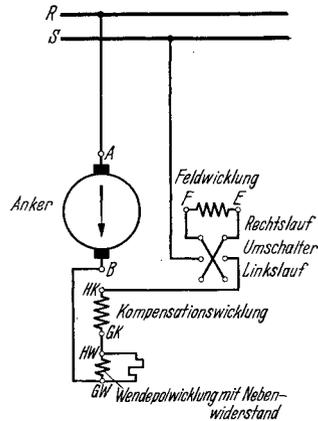
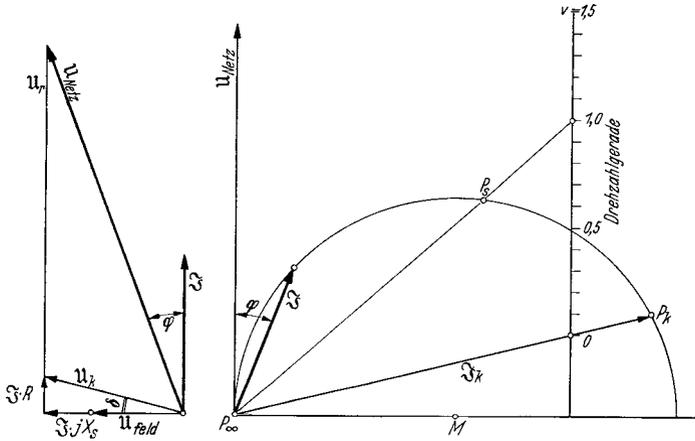


Abb. 170. Schaltung des Einphasenreihenschlußmotors.

Das Diagramm. Abb. 171 a zeigt das Diagramm des Motors für einen bestimmten Strom \mathfrak{I} . Die gesamte Netzspannung U_{netz} setzt sich zusammen aus dem Ohmschen Abfall $\mathfrak{I} \cdot R$ in Phase mit \mathfrak{I} , den induktiven Streuabfällen der Anker-, Wendepol- und Kompensationswicklung, die zusammen durch $\mathfrak{I} \cdot jX_s$ wiedergegeben sind und dem induktiven Abfall der Erregerwicklung $\mathfrak{I} \cdot jX_{\text{feld}} = U_{\text{feld}}$, woran sich endlich die in Phase mit \mathfrak{I} liegende Nutzsinnung des Ankers, nämlich die Rotationsspannung U_r des Ankers, ansetzt. Die beiden induktiven Spannungsabfälle $\mathfrak{I} \cdot jX_s$ und U_{feld} eilen dem Strom um 90° vor. Man beachte, daß die tatsächlich an der Wendepol- und Kompensationswicklung sowie am Anker auftretenden Einzelblindspannungen wesentlich größer als $\mathfrak{I} \cdot jX_s$ sind, sich aber wegen der Gegensaltung der Wicklungen bis



a) Strom- und Spannungsdiagramm b) Kreisdiagramm des ungesättigten Motors.

Abb. 171. Diagramme des Einphasenreihenschlußmotors.

auf $\mathfrak{I} \cdot jX_s$ aufheben. Die Blindspannung an der Feldwicklung läßt sich naturgemäß nicht durch eine Gegenwicklung verringern. Die kleine Ohmsche Komponente, welche durch den Parallelwiderstand zur Wendepolwicklung hineinkommt, sei vernachlässigt. Da die Rotationsspannung U_r der Drehzahl genau proportional ist, erkennt man, daß die Netzspannung bei konstantem Strom \mathfrak{I} mit steigender Drehzahl zunehmen muß, und daß sich der Leistungsfaktor, der durch den Winkel φ zwischen U und \mathfrak{I} gegeben ist, mit steigender Drehzahl verbessert, aber nicht zu 1,0 werden kann. Andererseits muß bei konstanter Netzspannung und steigendem Strom die Drehzahl stark abfallen, wodurch das Reihenschlußverhalten erklärt wird. Auf andere Ströme ist die Streuspannung und der Ohmsche Abfall proportional, die Feld- und die Rotationsspannung dagegen mittels der Sättigungskennlinie umzurechnen.

Die Drehzahlregelung des Motors geschieht durchweg durch Regelung der zugeführten Spannung, die der angezapften Sekundärseite eines Transformators entnommen wird. Der Spannungssprung zwischen zwei

aufeinanderfolgenden Anzapfungen wird durch eine sog. Feindrossel genügend unterteilt.

Die Drehrichtung des Motors wird durch Betätigen des Umkehrschalters in der Zuleitung zur Feldwicklung gewechselt.

Wenn man den in Wirklichkeit sehr wichtigen Einfluß der Sättigung vernachlässigt, kann man zu einer bestimmten Spannung ein *Kreisdiagramm* nach Abb. 171 b konstruieren, dem zu jeder Drehzahl der Strom und der Leistungsfaktor sowie die umgesetzte Leistung zu entnehmen sind. Die eingetragenen Punkte entsprechen: P_k dem Stillstand, P_s dem „Synchronlauf“ und P_∞ der unendlich hohen Geschwindigkeit. Unter „synchroner“ Drehzahl versteht man die sich aus Polzahl und Netzfrequenz bestimmende Drehzahl, die allerdings beim Reihenschlußmotor ohne jede physikalische Bedeutung ist.

Die Stromwendung. Wenn der Reihenschlußmotor mit Gleichstrom betrieben würde, so gälten für die Stromwendung die gleichen Überlegungen wie bei der Gleichstrommaschine. In Wirklichkeit tritt durch die Pulsation des Feldes eine Komplikation ein, da außer der *Reaktanzspannung* in der kurzgeschlossenen Windung auch noch die vom Feld induzierte, um 90° zeitlich versetzte *Transformatorspannung* auftritt. Auch diese soll durch das Wendefeld möglichst vollkommen aufgehoben werden. Hieraus ergibt sich, daß der Wendepol nicht nur vom Ankerstrom selbst, sondern auch noch von einem um 90° verschobenen Strom durchflossen werden muß. Die Verhältnisse sind folgende: Der kommutierende Ankerzweigstrom I_z induziert in der kurzgeschlossenen Spule die mittlere Reaktanzspannung:

$$e_r = H \cdot 2 \cdot l_e \cdot w_s \cdot v_a \cdot AS \cdot 10^{-6},$$

der die vom Wendefeld erregte Wendespannung:

$$e'_w = 2 \cdot l_e \cdot w_s \cdot v_a \cdot B'_w \cdot 10^{-6}$$

entgegenwirkt. B'_w ist die Kraftliniendichte unter dem Wendepol, welche von dem mit dem Ankerstrom phasengleichen Anteil des wahren Wendepolstromes hervorgerufen wird. (Die Bezeichnungen sind dieselben wie auf S. 209.) Wie bei der Gleichstrommaschine wählt man die Erregung des Wendepoles etwas stärker, als sich aus der Beziehung $e_r = e'_w$ ergibt, man kompensiert also etwas über. Dies bedeutet aber eine verfrüht einsetzende Stromwendung, also eine Verschiebung des Ankerfeldes gegen die Drehrichtung. Dadurch kommt es zu einer Feldschwächung des Hauptfeldes, die sich in einer Erniedrigung der Blindspannung an der Erregerwicklung bei gleichem Strom gegenüber der alleinigen Speisung der Erregerwicklung beim Magnetisierungsversuch bemerkbar macht. Umgekehrt deutet also eine verringerte Blindspannung an der Feldwicklung auf Überkompensation des Wendekreises hin.

Die vom pulsierenden Fluß Φ (in 10^6 Maxwell) in der kurzgeschlossenen Spule bei Netzfrequenz f induzierte Transformatorspannung beträgt:

$$e_{tr} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot w_s \cdot \frac{f}{100} \cdot \Phi = K_1 \cdot f(I),$$

ist also unabhängig von der Drehzahl und hängt nur vom Strom I ab. Wegen des Nebenwiderstandes zur Wendepolwicklung fließt in dieser ein zum Ankerstrom phasenverschobener Strom, dessen um 90° nach-eilende Komponente zur Erzeugung der Induktion B''_w dient. Durch die Bewegung im Wendefeld wird in der kommutierenden Spule noch die Wendespannung:

$$e''_w = 2 \cdot l_e \cdot w_s \cdot v_a \cdot B''_w \cdot 10^{-6} = K_2 \cdot n \cdot I,$$

die in Gegenphase zu e_{tr} liegt, induziert. Man erkennt ohne weiteres, daß die gewünschte Aufhebung nur bei einer bestimmten Drehzahl für die einzelnen Ströme eintreten kann. Insbesondere kann bei Stillstand und kleinen Geschwindigkeiten keine Aufhebung erzielt werden. Interessant ist die Rückwirkung der durch die Differenzspannung ($e_{tr} - e''_w$) hervorgerufenen Kurzschlußströme auf die Wirkspannung, also den meßbaren Leistungsumsatz in der Erregerwicklung. Im Stillstand ist e''_w gleich Null. Infolge der voll zur Wirkung kommenden Transformatorspannung fließt in der kurzgeschlossenen Spule ein Kurzschlußstrom, der Verluste verursacht, die ausschließlich von der Erregerwicklung transformatorisch gedeckt werden müssen. An der Welle machen sich die Verluste als meßbares, motorisches Drehmoment bemerkbar. Bei Lauf beginnt e''_w in dem Sinne zu wirken, daß die Kurzschlußströme kleiner werden, die Leistungserhöhung in der Erregerwicklung also auch kleiner wird. Bei jener Drehzahl, wo bei gegebenem Strom die Wendespannung e''_w die Transformatorspannung e_{tr} gerade aufhebt, fließt überhaupt kein Kurzschlußstrom mehr und die Leistungsaufnahme der Erregerwicklung ist die gleiche wie bei nichtaufliegenden Bürsten. Bei noch schnellerem Lauf wird e''_w größer als e_{tr} . Dies bedeutet das Wiederauftreten des Kurzschlußstromes, der aber nunmehr seine Richtung umkehrt. Die Deckung der entstehenden Verluste erfolgt nunmehr durch die Welle, deren Drehmoment also geschwächt wird, und die Erregerwicklung zeigt infolge auftretender Energierücklieferung durch die kurzgeschlossene Spule jetzt eine Verringerung der aufgenommenen Leistung an, die in extremen Fällen zum generatorischen Verhalten der Erregerwicklung führen kann. Umgekehrt kann also aus der Leistungsänderung, die an den Klemmen der Erregerwicklung gegenüber dem Lauf ohne aufliegende Bürsten gemessen werden kann, auf die mehr oder weniger vollkommene Aufhebung der Transformatorspannung geschlossen werden. Man strebt die vollkommene Aufhebung an für Nenn Drehzahl und Nennstrom.

Die praktische Untersuchung der Stromwendung. In der Praxis bestimmt man den Nebenwiderstand zur Wendepolwicklung und deren Windungszahl häufig durch systematische Versuche, bei denen man durch Zusetzen oder Abzweigen von Ankerstrom bei entsprechender Änderung des Nebenwiderstandes die besten Stromwendebedingungen aufsucht. Die Messung der Bürstenspannungskurve ist zwar grundsätzlich möglich, scheidet aber meistens an der Unzugänglichkeit des Stromwenders. Nach STIER¹ kann man folgendermaßen vorgehen:

¹ STIER: El. Bahnen 1938.

Man stellt zuerst die phasengleiche Stromkomponente fest, welche zur Aufhebung der Reaktanzspannung nötig ist, indem man die Stromwendung bei Gleichstrom untersucht. Dann ändert man durch Zuhilfenahme einer Drossel und eines Ohmschen Widerstandes nur noch

die senkrechte Stromkomponente und nimmt die Leistungsaufnahme der Feldwicklung über der Drehzahl bei dem betreffenden Ankerstromwert auf. Die Messung kann nur mit einem Leistungsmesser erfolgen, der bei einem Leistungsfaktor von 0,1 oder 0,3 Vollausschlag hat. Nach Abb. 172 stellt man die gemessenen Werte über der Drehzahl dar, wobei man gleichzeitig die Leistungsaufnahme der Erregerwicklung einträgt, die bei abgehobenen Bürsten gemessen wurde. Letzteres ergibt übrigens praktisch unabhängig von der Drehzahl eine Parallele zur Grundlinie. Dort, wo sich die beiden Leistungslinien schneiden, wird die Transformatorspannung e_{tr} vollkommen

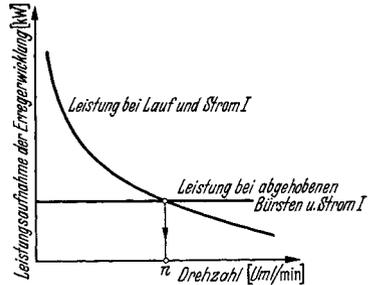


Abb. 172. Untersuchung der Aufhebung der Transformatorspannung e_{tr} durch die Stromwendespannung e'_w bei konstantem Strom I in Abhängigkeit der Drehzahl durch Messung der Leistungsaufnahme der Erregerwicklung bei abgehobenen Bürsten und im Betrieb. Unterhalb der Drehzahl n ist $e'_w < e_{tr}$, bei Drehzahl n ist $e'_w = e_{tr}$ und darüber $e'_w > e_{tr}$. (Nach STIER.)

von der Stromwendespannung e'_w aufgehoben. Man kann also durch Versuche die nacheilende Stromkomponente im Wendepol so lange ändern, bis bei einer bestimmten Drehzahl die Leistungsaufnahme der Erregerwicklung den gleichen Wert annimmt, wie er bei abgehobenen Bürsten gemessen wurde. Die gewünschte Überkompensation betrifft die Reaktanzspannung erkennt man an der Blindspannung, also praktisch richtig an der Klemmenspannung der Erregerwicklung, die etwa 5% tiefer liegen muß, also sie bei gleichem Strom und bei abgehobenen Bürsten gemessen wurde.

Die Stromwendung wird auf genaue Weise immer nur an der ersten Maschine der Type untersucht und die etwa notwendigen Änderungen werden dann von vornherein auch an den restlichen Motoren vorgenommen.

Das Zuschalten und Abzweigen von Ankerstrom geschieht bei der Einphasenreihenschlußmaschine mittels eines Stromtransformators in Sparschaltung. Abb. 173 gibt die beiden zugehörigen Schaltungen wieder.

Man kann also die Wendepolwicklung samt ihren Nebenwiderständen mit einem erhöhten oder verringerten, aber praktisch in der Phase unveränderten Ankerstrom speisen. Mußte man den Strom erhöhen, so ist die Windungszahl des Wendepols oder auch der Kompen-

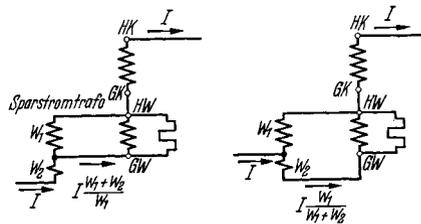


Abb. 173. Zuschalten und Abzweigen von Strom in der Wendepolwicklung bei unter- und bei überkompensierten Einphasenreihenschlußmotoren mit einem Stromtransformator in Sparschaltung.

sationswicklung zu erhöhen. War der Ankerstrom zu hoch, so ist eine oder mehrere Windungen herauszunehmen. Eine Änderung des Luftspaltes wie bei der Gleichstrommaschine ist nicht möglich.

Zu bemerken ist noch, daß bei generatorischem Betrieb sich die Richtung der transformatorischen Spannung e_{tr} herumdreht, weshalb dann vor die Wendepolwicklung ein Ohmscher Widerstand und parallel zu beiden eine Drossel zu legen ist.

Die Prüfung. Bei Erstauführungen werden die meisten der nachstehend angegebenen Versuche durchgeführt, während man sich bei weiteren Motoren auf einige von ihnen beschränken kann. Die Untersuchungen erstrecken sich auf die Magnetisierungsaufnahmen im Stillstand und im Lauf in der Hauptachse und in der Querachse der Maschine. Hierzu kommen die Kurzschlußmessungen im Stillstand in normaler Schaltung sowie unter Ausschluß der Erregerwicklung. Die Lastablesungen werden in der betriebsmäßigen Schaltung durchgeführt und durch die Dauerläufe zur Bestimmung der Stunden- und der Dauerleistung in Abhängigkeit der Drehzahl ergänzt. Durch Spannungs- und Leistungsmessungen an der Erregerwicklung der belasteten Maschine wird auch die Stromwendung mit Hinblick auf die Aufhebung der Reaktanz- und der Transformatorspannung untersucht. Es bedeuten nachstehend U_a , U_{ko} , U_{we} , U_{feld} die Spannungen an der Anker-, Kompensations-, Wendepol- und Feldwicklung.

Magnetisierungsversuch im Stillstand. 1. Magnetisierung von der Erregerwicklung aus: Die Bürsten müssen bei diesem Versuch abgehoben werden, da die Transformatorspannung bei stromlosem und stillstehendem Anker nicht kompensiert werden kann. Die Magnetisierung erfolgt in der Hauptachse der Maschine. Gemessen und aufgetragen werden: U_{feld} , e_{tr} und N_{feld} in Abhängigkeit vom Strom I . Errechnet und ebenfalls dargestellt werden der Streufaktor und der Feldschwächungsfaktor. Der *Streufaktor* wird bestimmt aus dem Verhältnis der transformatorischen Spannung im Anker zu der Windungsspannung der Erregerwicklung, also zu:

$$\text{Streufaktor } v = \frac{e_{tr} \cdot w_{feld}}{U_{feld}},$$

wobei w_{feld} die Windungszahl der Erregerwicklung bedeutet. Dieser Faktor beträgt etwa 0,88. In der Formel ist vorausgesetzt, daß der Anker wie üblich nur eine Windung je Segment besitzt. e_{tr} wird als sogenannte Segmentspannung unter den abgehobenen Bürsten gemessen. Der *Feldschwächungsfaktor* stellt das Verhältnis der Feldspannung der belasteten Maschine zu jener bei abgehobenen Bürsten dar. Er ist ein Maß für die Überkompensation des Wendepoles bezüglich der Reaktanzspannung. Bei etwas überkommütierenden Motoren beträgt der Feldschwächungsfaktor etwa 0,95, d. h. die etwas beschleunigt verlaufende Stromwendung schwächt das Feld in der Hauptachse um rund 5%. Die beim Stillstandsversuch beobachteten Erregerverluste decken die Verluste durch Stromwärme in der Erregerwicklung und die Eisenverluste bei Stillstand. Wenn man die Maschine antreibt, erhält man fast genau die

gleichen Werte, da die ansteigenden Eisenverluste im Läufer von der Welle her zugeführt werden müssen. Abb. 174 zeigt die Darstellung der Ergebnisse.

2. Magnetisierung von der Kompensations- plus Wendepolwicklung aus: Bei diesem Versuch wird der Motor in der Querachse magnetisiert. Unter den Bürsten tritt keine transformatorische Spannung auf, die Bürsten können daher aufgesetzt werden. Man mißt $(U_{ko} + U_{we})$, U_a und die zugeführte Leistung $N_{zu} = f(I)$.

3. Magnetisierung von der Ankerwicklung aus: Der Anker wird an Spannung gelegt und die gleichen Messungen wie vorher durchgeführt. Aus den sich aus beiden Versuchen ergebenden Spannungsverhältnissen errechnet man den Streufaktor zwischen Anker- und Kompensations- plus Wendepolwicklung zu:

$$\text{Streufaktor } v = \sqrt{\frac{U'_a}{U'_{ko} + U'_{we}} \cdot \frac{U''_{ko} + U''_{we}}{U''_a}}$$

wobei die U' -Werte dem ersten Versuch (2) und die U'' -Werte dem zweiten Versuch (3) bei gleichen AW -Betragen zu entnehmen sind. Der Streufaktor liegt etwa bei 0,88.

Kurzschlußversuch im Stillstand. 1. Kurzschluß des ganzen Motors: Der normal geschaltete Motor wird an Spannung gelegt. Man mißt $I, N, Md, \cos\varphi = f(U)$ und trägt neben diesen Größen auch noch den charakteristischen Wert N/Md in kVA/mkg auf.

2. Kurzschluß des Motors unter Ausschluß der Erregerwicklung: Man speist nur die Anker- plus Kompensations- plus Wendepolwicklung und mißt $U_{gesamt}, U_a, U_{ko}, U_{we}, N = f(I)$. Ein Drehmoment tritt nicht auf. Man beachte bei diesem Versuch, daß die Summenspannung der beiden Ständerwicklungen wesentlich größer als die angelegte Spannung ist.

3. Kurzschluß des Ankers bei erregter Kompensations- plus Wendepolwicklung und Kurzschluß der beiden letzteren bei erregter Ankerwicklung. Diese Versuche dienen nur der Schaffung von Berechnungsunterlagen.

Magnetisierungsversuch im Lauf. 1. Magnetisierung von der Erregerwicklung aus. Der Läufer wird von einem geeichten Hilfsmotor aus angetrieben. Man mißt die dem Läufer zugeführte Leistung, die gleich den vom Läufer her gedeckten Eisenverlusten ist. Man stellt das Ergebnis dar entweder in der Form $V_{fe} = f(n)$ bei konstanten Werten der Spannung an der Erregerwicklung U_{feld} oder als $V_{fe} = f(U_{feld})$ bei konstanten Werten der Drehzahl.

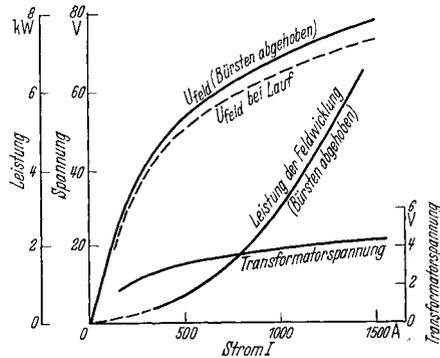


Abb. 174. Leerlaufmessungen bei abgehobenen Bürsten und bei Magnetisierung durch die Erregerwicklung. Die gestrichelte Kurve $U_{feld} = f(I)$ gilt bei Lauf und zeigt an, da sie tiefer liegt als die Stillstandskurve, daß die Wendepole bezüglich der Reaktanzspannung etwas übererregt sind, daß also $e'_0 > e_r$ ist.

2. Magnetisierung von der Wendepol- plus Kompensationswicklung aus: Dieser Versuch entspricht dem vorhergehenden, nur wird statt

der Spannung an der Erregerwicklung, die jetzt gleich Null ist, jene an der erregten Ständerwicklung, also $U_{ko} + U_{we}$ gesetzt.

Lastversuche.

Aufnahme der Betriebskennlinien: Man betreibt den Motor mit verschiedenen Spannungen $U_1, U_2, \dots U_n$, die jeweils während einer Belastungsreihe konstant gehalten werden. Die Belastung geschieht fast ausschließlich auf Pendelmaschinen, da mit deren Hilfe auch der Wirkungsgrad bestimmt wird. Die Ermittlung des Wirkungsgrades nach

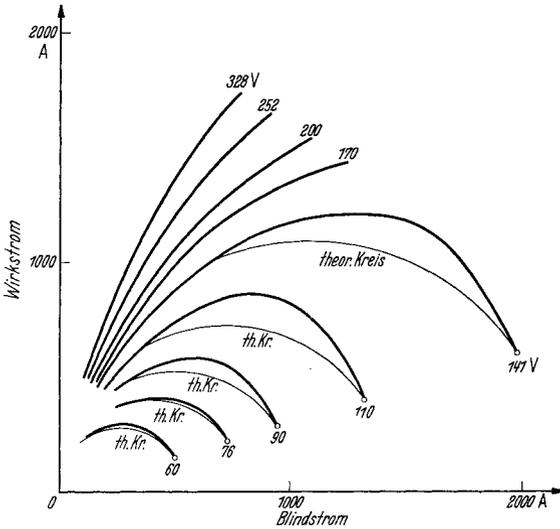


Abb. 175. Gemessene Ortskurven des Einphasenreihenschlußmotors bei konstanten Werten der Netzspannung. (Dünn eingezeichnet einige theoretische Kreise des ungesättigten Motors.)

einem Einzelverlustverfahren ist recht umständlich und wegen der nur ungenau zu berücksichtigenden Eisen- und Zusatzverluste nicht genauer

als die direkte Methode. Man bestimmt aus den Ergebnissen der Lastversuche die Kurven: $\eta, \cos \varphi, n, I, N_{zu} = f(Md)$ oder $= f(I)$, wobei Md an Stelle von I dargestellt wird. Die Abhängigkeit des Drehmomentes Md vom Strom I wird kaum meßbar von der Drehzahl beeinflusst, weshalb die etwas streuenden Punkte der einzelnen Belastungsreihen durch eine einzige Kurve, die für Stillstand und alle Geschwindigkeiten gilt, verbunden werden können.

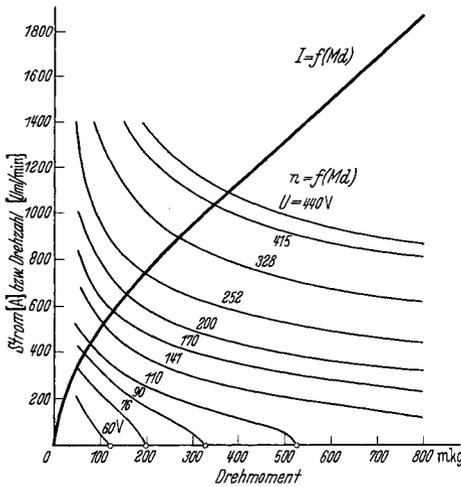


Abb. 176. Drehzahl- und Stromkennlinien des Einphasenreihenschlußmotors über dem Drehmoment. (Gleiche Messungen wie in Abb. 175.)

Auf Grund der Belastungsaufnahmen kann man auch die tatsächlichen Ortskurven des Motors aufzeichnen, die von den theoretischen Kreisen der ungesättigten Maschine, wie aus

Abb. 175 ersichtlich ist, nicht unbeträchtlich abweichen. Man kann dieser Darstellung entnehmen: Strom, Leistungsfaktor, Netzleistung und

Drehmoment. Letzteres ist für konstante Werte des Stromes ebenfalls konstant, weshalb Punkte gleichen Momentes auf Kreisen um den Nullpunkt liegen. Abb. 176 zeigt die übliche Darstellung der Meßergebnisse.

Dauerlauf. An den Reihenschlußmotoren werden eine Anzahl von Dauerläufen vorgenommen, bei denen die Grenzleistung für Stundenbetrieb und für Dauerbetrieb in Abhängigkeit der Drehzahl ermittelt wird. Infolge der energischen Kühlung von Ständer und Läufer, die getrennt erfolgt, liegen beide Leistungen nur um wenige Prozent auseinander. Die Grenzleistung steigt erst linear mit der Drehzahl an, nimmt aber ab etwa 80% der Höchstgeschwindigkeit wegen der stark anwachsenden Zusatzverluste nur noch schwach zu.

f) Der Repulsionsmotor.

Aufbau und Wirkungsweise. Der Repulsionsmotor ist ein indirekt gespeister Einphasenkommutatormotor mit Reihenschlußverhalten, dessen Drehzahl durch Bürstenverschiebung geregelt werden kann. Er besteht aus einem Ständer mit verteilter Wicklung, welche an einem Netz beliebiger Spannung liegt, und aus einem Anker, dessen

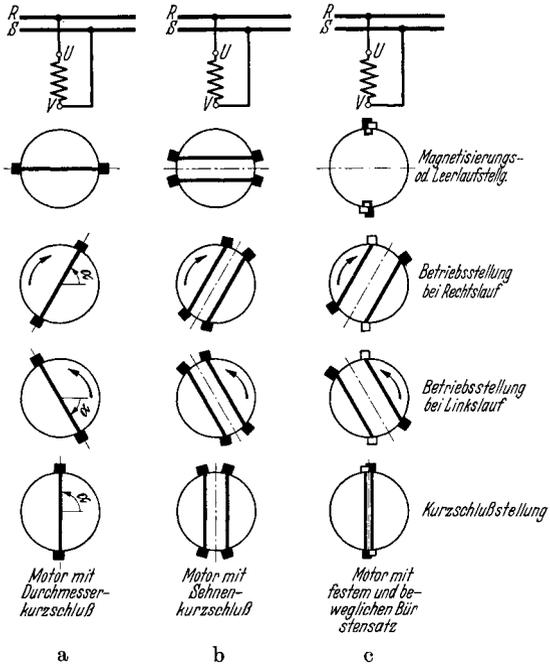


Abb. 177. Schaltung und typische Lagen der Bürstenachse (— · — · —) des Repulsionsmotors mit Durchmesser-kurzschluß (a), mit Sehnen-kurzschluß (b) und mit doppeltem Bürstensenatz (c, Dérímotor).

Gleichstromwicklung über die Bürsten des Stromwenders in sich

kurzgeschlossen ist. Je nach Art des Kurzschlusses unterscheidet man den Motor mit einfachem, beweglichem Bürstensenatz mit einer Entfernung der kurzgeschlossenen Bürsten von 180° el, oder den Motor mit ebenfalls einfachem, beweglichem Satz, der aber vier Bürstenreihen je Polpaar besitzt, die paarweise miteinander verbunden, so daß zwischen ihnen ein Winkel von 120 bis 150° el liegt oder endlich den Dérímotor, der zwei Bürstensenätze hat. Der eine steht still und der andere ist beweglich. Die Kurzschlußverbindungen gehen von den Bürsten des einen Satzes zu jenen des anderen Satzes. Der Winkel zwischen ihnen ist zwischen 0° und 180° el veränderlich (Abb. 177 a—c).

Maßgebend für das Verhalten des Motors ist die Lage der Bürstenachse. Diese wird durch die Symmetrielinie zu den Kurzschlußver-

bindungen im zweipoligen Bild angegeben. Die Bürstenachse hat zwei ausgezeichnete Lagen. Wenn sie mit der Achse der Ständerwicklung zusammenfällt, so wirkt der Motor auf das Netz wie ein kurzgeschlossener Transformator. Der dem Netz entnommene Strom ist sehr hoch. Das vom Motor in der Kurzschlußstellung entwickelte Drehmoment ist gleich Null. Wenn die Bürstenachse um 90° el gedreht wird, kommt sie in die Leerlaufstellung. Der Läufer führt, von den Kurzschlußströmen in den durch die Kohlen überbrückten Spulen abgesehen, keinen Strom und der Motor wirkt wie eine Drossel. Er entnimmt dem Netz nur seinen Magnetisierungsstrom. Das Drehmoment ist ebenfalls gleich Null. In den Zwischenstellungen entwickelt der Motor ein Drehmoment. Dieses wirkt stets in solcher Richtung, daß sich der Anker auf kürzestem Wege aus der durch die Bürstenachse gegebenen Stellung in die Leerlaufstellung, also die Querlage zur Ständerwicklung zu verdrehen sucht. Bei Verschiebung der Bürstenachse aus der Leerlauf-

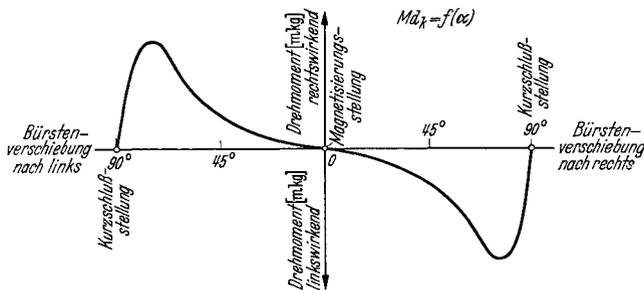


Abb. 178. Stillstandsrehmoment des Repulsionsmotors. Motor läuft sanft entgegen der Bürstenverschiebung aus der Magnetisierungsstellung, bzw. schroff im Sinne der Verschiebung aus der Kurzschlußstellung an.

stellung läuft der Motor sanft entgegen der Verschiebung an, bei Verdrehung aus der Kurzschlußstellung läuft er dagegen kräftig im Sinne der Verschiebung an. Dies ist aus der Darstellung des Stillstanddrehmomentes in Abb. 178 über dem Verstellwinkel ohne weiteres verständlich.

Bei beliebiger Verdrehung der Bürstenachse aus der Leerlaufstellung um den Winkel α denkt man sich am besten die Ständerwicklung in zwei um 90° el versetzt angeordnete Teilwicklungen aufgelöst, von denen die eine senkrecht zur Bürstenachse und die andere parallel zu ihr steht (Abb. 179a—c). Die senkrecht stehende heißt die Erregerwicklung E und die in gleicher Richtung stehende die Arbeitswicklung A . Ihre gedachten Windungszahlen hängen vom $\cos \alpha$ bzw. dem $\sin \alpha$ ab. Die beiden Wicklungen wirken im Stillstand ähnlich wie die Erreger- und die Kompensationswicklung des Einphasen-Reihenschlußmotors. Die Erregerwicklung erregt in der Erregerachse den sog. Drehmomentfluß. Anker- und Arbeitswicklung bilden zusammen einen kurzgeschlossenen Transformator, durch den der Netzstrom auf den Läufer übertragen wird. Das Übersetzungsverhältnis hängt vom Verstellwinkel α ab. Da das Feld in der Erregerachse zeitlich mit dem induzierten Ankerstrom

in Phase ist, liegen gute Bedingungen für ein starkes Anzugsmoment vor. Der Fluß in der Querachse ist nur ein Streufluß. Er liegt in Phase mit dem Strom. An der Arbeitswicklung liegt nur die Streuspannung von Arbeits- plus Ankerwicklung, die etwa der Spannung an Kompensations- plus Wendepol- plus Ankerwicklung des Einphasenreihenschlußmotors entspricht. Der größte Teil der Netzspannung liegt an der Erregerwicklung, an der die volle, dem Drehmomentfluß in Längsachse entsprechende Blindspannung auftritt.

Bei beginnender *Drehung* ändern sich die Verhältnisse grundlegend gegenüber dem Bahnmotor. Durch die Rotation der Ankerleiter im Feld in der Längsachse wird in diesen eine EMK induziert, die sich wegen des Bürstenkurzschlusses nicht als meßbare Spannung im Ankerkreis bemerkbar machen kann. Sie hat aber einen zusätzlichen Strom

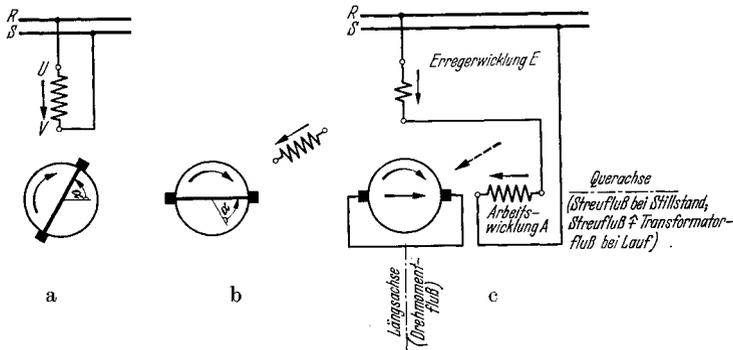


Abb. 179. Gedachte oder tatsächliche Aufspaltung der Ständerwicklung in eine Erreger- und eine Arbeitswicklung. Motor mit um α geschwenkter Bürstenachse (a); um α rückwärts gedrehte Darstellung (b) und durchgeführte Aufspaltung der Ständerwicklung (c).

in der Ankerwicklung zur Folge, der gegen den induzierten Kurzschlußstrom bei Stillstand stark phasenverschoben ist. Er ruft einen Fluß in Richtung der Bürstenachse hervor, der aber gegen den Ständerstrom um fast 90° zeitlich verschoben ist. Dieser Fluß heißt der Transformatorfluß, der die Rotationsspannung des Läufers auf die Arbeitswicklung überträgt. Dort erscheint sie also als praktisch phasengleich mit dem Netzstrom. Sie addiert sich vektoriell zu der Streuspannung. Da die Gesamtspannung beider Ständerwicklungen durch die Netzspannung gegeben ist, muß die Spannung an der Erregerwicklung sinken. Mithin nimmt der Fluß in Längsachse mit zunehmender Drehzahl ab. Diese bedeutet also Reihenschlußverhalten des Motors, da das Drehmoment mit steigender Geschwindigkeit sinkt.

Der laufende Motor besitzt mithin drei verschiedene Flüsse. Der Fluß in der Längsachse ist in Phase mit dem Netzstrom. Das Ankerquerfeld kann sich bis auf einen kleinen Streufluß nicht ausbilden. Es ist ebenfalls in Phase mit dem Netzstrom. Der Transformatorfluß ist ebenfalls ein Querfluß. Er ist um fast 90° zeitlich gegen den Netzstrom verschoben. Da er räumlich um 90° gegen den Fluß der Längsachse versetzt ist, bildet er mit diesem zusammen ein unvollkommenes elliptisches

Drehfeld aus. Dies ist der grundsätzliche Unterschied gegenüber dem Bahnmotor, wo ein reines Wechselfeld vorhanden ist.

Das Stromdiagramm des Motors ist bei konstanter Netzspannung ein Kreis, dessen Mittelpunkt unterhalb der Abszisse liegt. Die Geschwindigkeitsverteilung ist die gleiche wie beim Bahnmotor.

Die drei Ausführungsarten des Bürstenkurzschlusses. Der Motor mit einfachem Bürstensatz und Durchmesserkurzschluß und der Motor mit Sehnenkurzschluß unterscheiden sich nicht im Verhalten. Im Stillstand tritt in der von der Bürste kurzgeschlossenen Spule die vom pulsierenden Erregerfeld induzierte Transformatorspannung auf, die die Bürste zum Aufglühen bringen kann. Beide Motorenarten dürfen daher auch in Leerlaufstellung nicht unter Spannung stehenbleiben. Der Unterschied zwischen ihnen besteht darin, daß der Motor mit Sehnenkurzschluß ein von Oberfeldern freieres Feld und daher bessere Stromwendebedingungen besitzt. Er wird für größere Einheiten bevorzugt.

Der Motor mit doppeltem Bürstensatz hat drei Vorteile. Erstens ist der Verstellwinkel der beweglichen Bürsten doppelt so groß wie bei den anderen Maschinen. Hierdurch wird eine feinere Regelung erreicht. Zweitens zeigt er das bessere Drehzahlverhalten. Drittens tritt bei Stillstand in der Anfahrstellung unter den Bürsten keine transformatorische Spannung auf. Der Motor kann daher unter Spannung in dieser Stellung stehenbleiben und ist mithin für häufiges Anlaufen und für Umkehrbetrieb besonders gut geeignet. Seiner häufigeren Verwendung steht allerdings die beachtliche Komplikation durch das feste und das bewegliche Joch entgegen.

Die Einstellung der Bürstenbrücke. Der Motor mit einfachem Bürstensatz wird an verringerte Spannung gelegt und die Brücke so lange verstellt, bis bei kleinster Stromaufnahme keine Drehung mehr erfolgt. Diese Stellung des Joches wird markiert. Bei Verdrehung der Bürsten aus dieser Lage muß der Motor sanft im entgegengesetzten Sinn anlaufen. Läuft er dagegen kräftig im gleichen Sinn an, so wurde irrtümlich die Kurzschlußstellung gefunden, die um 90° el von der Leerlaufstellung entfernt liegt. Sie ist außerdem an der erheblich größeren Kurzschlußstromaufnahme zu erkennen.

Beim Dérimotor sucht man zuerst die Kurzschlußstellung auf. Die nicht durch die Kurzschlußleitungen miteinander verbundenen Bürsten der beiden Brücken stehen räumlich nebeneinander, die Stromaufnahme ist ein Maximum, das Drehmoment Null. In dieser Stellung wird das eine Joch für dauernd belassen, während man das bewegliche daraus um 180° el verstellt, also um eine Bürstenteilung weiterschiebt. Der Netzstrom muß dann ein Minimum sein, das Drehmoment wiederum Null werden und nunmehr die miteinander verbundenen Bürsten beider Joche räumlich nebeneinander stehen. Dies ist die zu kennzeichnende Leerlaufstellung.

Zum Einlaufen der Bürsten verdreht man nunmehr das Joch um ein geringes, bis der leer laufende Motor Nenndrehzahl annimmt. Man läßt ihn einige Stunden leer laufen.

Magnetisierung und Kurzschluß. Die Magnetisierung wird im Stillstand bei abgehobenen Bürsten durchgeführt. Im Kurzschlußversuch

wird am stillstehenden Motor der Verlauf des Drehmomentes, des Netzstromes, der aufgenommenen Leistung in Abhängigkeit der Verschiebung der Bürstenachse aus der Leerlaufstellung möglichst nahe bis zur Kurzschlußstellung aufgenommen. Bei größeren Motoren müssen diese Messungen sehr schnell durchgeführt werden.

Lastversuche. Motoren ohne Drehzahlregelung, die mit konstanter Bürstenstellung arbeiten, werden mit Nennmoment belastet und die Brücke wird bis zur erreichten Nenndrehzahl verstellt. Diese Betriebsstellung, die bei rund 70° Entfernung von der Leerlaufstellung liegt, wird gekennzeichnet. Ebenfalls wird die Stellung für die andere Drehrichtung, die auf der anderen Seite der Nullage liegt, markiert. Die Belastungsablesungen werden in Abhängigkeit vom veränderlichen Drehmoment gemacht.

Bei Motoren mit Drehzahlregelung werden weitere Kennlinien für geänderte Bürstenstellungen im Bereich der höchsten und der tiefsten Drehzahlen aufgenommen. Bei Neuausführungen macht man auch Versuche mit erhöhter und verringerter Spannung, um deren Bestwert bezüglich Wirkungsgrad und Leistungsfaktor festzustellen.

Anschläge sperren die Verschiebung der Brücke über 80° in die Kurzschlußstellung hinein.

Einige Hersteller nennen die Kurzschlußstellung die „wahre Neutralstellung“ und die Leerlaufstellung die „falsche Neutralstellung“. Sie betrachten die Verschiebung von der Kurzschlußstellung aus, welche nicht gesperrt wird. Die Marken für Links- und Rechtslauf liegen daher dicht nebeneinander.

Der Wirkungsgrad wird wie in allen anderen Wechselstromkommutatormaschinen durch eine geeichte Belastungsmaschine oder durch die Pendelbremse bestimmt.

Drehrichtungsumkehr. Diese erfolgt durch Verstellen der Bürstenbrücke im entgegengesetzten Sinn. Nur bei Motoren mit zwei Wicklungen im Ständer, die wahlweise an das Netz gelegt werden können, kann man hiervon absehen. Bei Motoren mit Dreiphasenwicklung speist man UV für die eine Richtung, UW für die andere. Die Bürstenachse ist dann um $\pm 60^\circ$ gegen die Magnetisierungsstellung verdreht.

g) Die eigenerregte, ständerlose Drehstromerregemaschine.

Aufbau und Wirkungsweise. Die eigenerregte, ständerlose Drehstromerregemaschine besteht aus einem Gleichstromanker mit geschlossenen Nuten, deren hohe Stege in magnetischer Hinsicht den fehlenden Ständer ersetzen. Der Kommutator besitzt auf je 360° el drei Bürstenreihen, die zu den drei Ankerklemmen $U_0V_0W_0$ führen (Abb. 180). Diese Klemmen werden in der Schaltung nach Abb. 89 (S. 152) mit den drei Schleifringen des in der Phase zu verbessernden Asynchronmotors verbunden.

Die Erregermaschine wird von einem kleinen Motor angetrieben, der nur die Reibungsverluste zu überwinden hat. Sein Anzugsmoment muß allerdings ausreichen, um die Erregermaschine entgegen dem hohen Moment der Ruhe anzufahren.

Die Wirkung der Erregermaschine wird an Hand ihres in Abb. 181 dargestellten *Diagrammes* verstanden. \Im bezeichnet den zufließenden Strom, der je nach Belastung des Asynchronmotors zwischen Null und dem vollen Wert schwanken kann. In Phase mit \Im liegt der Ohmsche

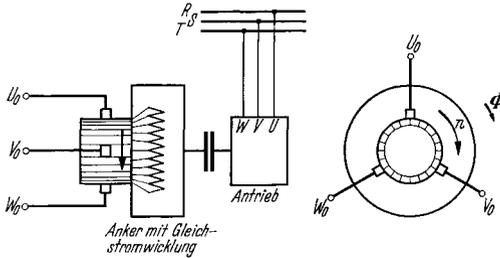


Abb. 180. Ständerlose, eigenerregte Drehstromerregmaschine. Drehsinn im Sinne des Drehfeldes. Geschwindigkeit etwa 10- bis 20facher Übersynchronismus.

Spannungsabfall $\Im \cdot R + 1,0$. R ist der Widerstand einer gedachten Sternphase zwischen Bürste und Ankermittelpunkt. Er beträgt $\frac{4}{9}$ des in Polteilung zu messenden Gleichstromwiderstandes. 1,0 berücksichtigt den Spannungsabfall einer Bürste. 90° voreilend zu \Im liegt der induktive Abfall $2\pi f_2 \cdot L \cdot j\Im$, der an der ruhenden — wie eine Drossel-

pule wirkenden — Erregermaschine zu messen wäre. 90° nacheilend liegt die durch Rotation *im Sinne* des Drehfeldes erzeugte Nutzspannung $2\pi f_{rot} \cdot L \cdot (-j)\Im$. Es bedeutet f_2 die Schlupffrequenz des Stromes, f_{rot} die durch die Polzahl und die Drehzahl der Erregermaschine gegebene Rotationsfrequenz und L die Induktivität der Erregermaschine je Sternphase. Diese hängt wegen der hohen Sättigung der Maschine im starken Maße

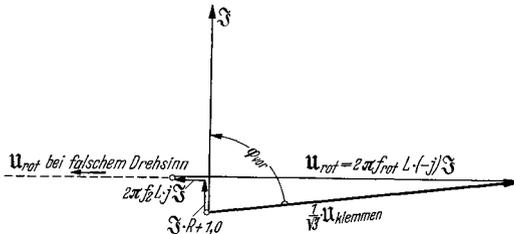


Abb. 181. Diagramm der eigenerregten Erregermaschine für eine gedachte Sternphase gezeichnet.

vom Strome \Im ab. Die Schlupffrequenz beträgt etwa 3 bis 4 Hz, die Rotationsfrequenz rund 30 bis 50 Hz, so daß eine nutzbare Frequenz der Leiter im Drehfeld von 27 bis 46 Hz verbleibt.

Die Gesamtklemmenspannung liegt stark nacheilend zum Strom \Im oder, anders ausgedrückt, die Erregermaschine wirkt wie ein Verbraucher, der bei angelegter Spannung U einen stark voreilenden Strom aufnimmt, also kapazitiven Charakter besitzt. Ein solcher wirkt aber phasenverbessernd auf den Asynchronmotor, an dessen Schleifringe er angeschlossen ist.

Es ist aber zu beachten, daß die Erregermaschine sich doch anders als ein Kondensator verhält, da die Abhängigkeit ihres Widerstandes von der Frequenz eine ganz andere ist. Es gilt:

$$\text{Erregermaschine (ohne Verluste)} \quad \frac{U}{I} = 2\pi L(f_{rot} - f_2) \quad \text{und}$$

$$\text{Kondensator (ohne Verluste)} \quad \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi f_2 C},$$

woraus hervorgeht, daß der Kondensator bei konstanter Spannung Ströme führt, die linear mit der Frequenz ansteigen, während die

Stromaufnahme der Erregermaschine erst in zweiter Linie von der Frequenz f_2 , in erster Linie aber von ihrer Antriebsdrehzahl abhängt, da $f_{\text{rot}} \gg f_2$ gemacht wird.

Die Prüfung der Erregermaschine besteht, nach Messung ihres Ankerwiderstandes in Polteilung, in der Aufnahme ihrer *Magnetisierungskennlinie* $U_{\text{blind}} = f(I)$ und in *gemeinsamer Probe* mit dem Vordermotor.

Man führt der Maschine die veränderliche Spannung U bei Schlupffrequenz f_2 und der Antriebsdrehzahl n zu. Gemessen wird der aufgenommene Strom I und die aufgenommene Leistung N . Diese dient der Deckung der Stromwärmeverluste im Anker, der Zusatzverluste, der Eisenverluste und der Bürstenübergangsverluste. Außerdem mißt man die Leistungsaufnahme des Antriebsmotors, die voll und ganz zu den Verlusten der Erregermaschine geschlagen wird. Die kommutatorseitig umgesetzte Leistung ist allerdings nicht bequem zu messen. Man benutzt am besten einen Leistungsmesser in 2-Geräteschaltung, dessen beide Meßsysteme auf einer gemeinsamen Achse sitzen, da man auf diese Weise einen zeitlich konstanten Ausschlag erhält. Aus $U \cdot \sin \varphi$ erhält man die Blindspannung U_{bl} , die man, da der $\cos \varphi$ praktisch 0,20, der $\sin \varphi$ also 0,98 beträgt, zu 98% der Klemmenspannung ansetzen darf.

Man stellt U_{bl} als Funktion des Stromes I dar. Wenn man die Aufnahmen bei veränderlicher Schlupffrequenz f_2 und veränderlicher Antriebsdrehzahl n gemacht hat, kann man das Ergebnis auf Schlupffrequenz Null und Drehzahl n_0 umrechnen nach der Gleichung:

$$U_{\text{bl}_0} = 0,98 \cdot U \cdot \frac{n_0}{n - \frac{120 \cdot f_2}{2p}}$$

Die Bürstenstellung der Erregermaschine ist eine ganz beliebige. Nur die *Phasenfolge der Bürsten* muß richtig eingehalten werden, und zwar folgen sich, in der Drehrichtung gesehen, die Bürsten U_0, V_0, W_0 . Nur wenn ein Asynchrongenerator kompensiert werden sollte, müßte man zwei Phasen vertauschen.

Wenn die **Verlustbestimmung** schwierig durchzuführen ist, kann man auch darauf verzichten. Man errechnet dann die Gesamtverluste des Hauptasynchronmotors im Ankerkreis aus Luftspaltleistung und Schlupf. Hierin sind dann die Verluste der Erregermaschine bis auf die Reibungsverluste enthalten. Diese ergeben sich zusammen mit den Eigenverlusten des kleinen Antriebsmotors aus dessen Netzaufnahme.

h) Der Frequenzwandler.

Aufbau und Wirkungsweise. Der Frequenzwandler besteht in seiner einfachsten Ausführung aus einem Gleichstromanker, dessen Wicklung zu einem Kommutator und zu drei oder sechs Schleifringen geführt ist. Hohe, geschlossene Nuten ersetzen wie bei der ständerlosen Erregermaschine den Ständer. Die Anschlüsse der drei Ringe UVW liegen unter sich um 120° el versetzt. Sind sechs Ringe vorhanden, so liegen UVW und XYZ jeweils 120° el voneinander entfernt, während der Winkel

zwischen U und X , V und Y und W und Z entweder 180° el oder 150° el betragen kann. Die Sehnung bezweckt ein von Oberwellen freieres Feld und somit verbesserte Stromwendung. (Abb. 182.)

Die Wirkung des Frequenzwandlers ist die eines asynchronen Einankerumformers. Die Schleifringe liegen über einen Transformator am Netz. Es wird ihnen eine konstante Spannung aufgedrückt. Diese erscheint in voller Höhe auf der Kommutatorseite, wenn man als Schleifringspannung die zwischen U und V zugrunde legt. Bei unbelastetem Kommutator nehmen die Schleifringe nur den kleinen Magnetisierungsstrom auf. Sobald der Kommutator belastet wird, erhöht sich der Schleifringstrom um den entsprechenden Betrag. Die Drehzahl ist ohne Einfluß auf die Höhe der Spannung. Nur die Frequenz hängt von ihr ab; der untersynchron gegen sein Drehfeld umlaufende Frequenzwandler gibt an den Kommutatorbürsten Schlupffrequenz ab.

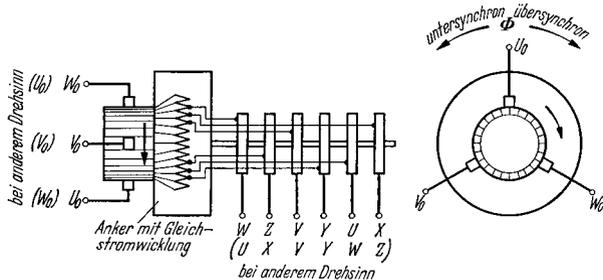


Abb. 182. Ständerloser Frequenzwandler. Der Schlupf muß gleich dem der zugehörigen Haupt-Asynchronmaschine sein. Die Spannung zwischen den Bürsten $U_0V_0W_0$ ist — von den Spannungsabfällen abgesehen — unabhängig von der Drehzahl gleich der zwischen den Schleifringen UVW . Die angegebene Phasenfolge der Bürsten gilt für untersynchronen Lauf. Das Drehfeld ϕ rotiert untersynchron gegen den mechanischen Drehsinn, übersynchron im gleichen Sinn.

Die *Phasenfolge der Bürsten* auf dem Stromwender lautet untersynchron $U_0V_0W_0$ entgegen der Drehrichtung. Die Stellung des Joches entscheidet über die Phasenlage der Spannungen. Diese werden in der Phase vorgeschoben, wenn man das Joch in der Drehrichtung bewegt, sie erscheinen verspätet, wenn man das Joch entgegen der Drehrichtung verschiebt. Die Schaltung mit einer in der Phase oder in der Drehzahl zu regelnden Asynchronmaschine ist auf S. 146, Abb. 85 dargestellt.

Die *Prüfung* besteht in der *Aufnahme der Magnetisierungskennlinie* von der Schleifringseite aus. Der richtige Drehsinn wird an der Frequenz am Stromwender erkannt. Läuft der Wandler fast synchron, so muß ein dort angelegtes Gleichstromvoltmeter langsam im Takt der Schlupffrequenz ausschlagen. Schwirrt der Zeiger des Gerätes dagegen mit einem kleinen Ausschlag hin und her, so deutet dies auf die fast doppelte Erregerfrequenz hin. Die Phasenfolge auf der Schleifringseite ist dann durch Tausch zweier Phasen zu ändern. Wenn man den Wandler belasten kann, mißt man auch seinen Spannungsabfall bei Stromentnahme auf der Kommutatorseite.

Die *Ankerkupferverluste* errechnen sich nicht aus $I^2 \cdot R$, da sich die Ströme im Innern der Ankerwicklung überlagern und teilweise auf-

heben. Es gelten ähnliche Überlegungen wie beim Einankergleichstromumformer. Praktisch kann man mit etwa den halben Verlusten rechnen, die sich aus den normalen Formeln ergeben würden¹.

Der kompensierte Frequenzwandler. Dieser besitzt einen ruhenden Ständer, in dessen Nuten eine Kompensationswicklung zur Auslöschung des Ankerfeldes untergebracht ist. Auch können Wendepole vorgesehen werden. Die Bürstenstellung ist durch die Achse der Kompensationswicklung vorgeschrieben. Während der unkompensierte Wandler wie ein Umformer arbeitet, stellt der kompensierte Wandler eine läufererregte Drehstromkommutatormaschine dar. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß die kommutatorseitige Spannung U nicht mehr von der Drehzahl unabhängig ist; sie beträgt bei der Schleifringspannung U_{schl} :

$$U = U_{\text{schl}}(1 - s),$$

ist also vom Schlupf s abhängig. Dies rührt daher, daß sich von der konstanten Spannung zwischen den Bürsten die vom Schlupf abhängige Spannung der Kompensationswicklung subtrahiert. Ein weiterer Unterschied ist der, daß die Schleifringe unabhängig von der Belastung nur den Magnetisierungsstrom führen. Der Transformator oder etwaige Spannungsquellen anderer Art (Drehregler) sind also nur für die geringe Magnetisierungsleistung zu bemessen.

Die Kupferverluste sind wesentlich höher als beim unkompensierten Wandler, da zu den nunmehr vollen Verlusten in der Ankerwicklung die fast gleich großen in der Kompensationswicklung treten.

Die Prüfung wird wie beim unkompensierten Wandler vorgenommen. Die Bürstenbrücke wird so eingestellt, daß bei erregter Maschine die Spannung an den Klemmen der Kommutatorseite im Stillstand ein Minimum wird. Bei Betrieb muß man allerdings gelegentlich, um unter Umständen Selbsterregungserscheinungen zu verhindern, die Brücke etwas in Drehrichtung verschieben. Die neutrale und die Betriebsstellung des Joches wird gekennzeichnet.

i) Die ständererregte Drehstromkommutatormaschine.

Aufbau und Wirkungsweise. Zur Aufnahme der Schlupfleistung der großen, regelbaren Asynchronmaschinen finden — an deren Schleifringe angeschlossene — Drehstromkommutatormaschinen Verwendung. Sie verwandeln bei untersynchronem Lauf des Vordermotors die Schlupfleistung in mechanische Leistung und geben diese entweder an die Welle des Asynchronmotors selbst oder aber an eine besondere Maschine ab. Bei übersynchronem Lauf arbeitet die Kommutatorhintermaschine dagegen als Generator, der mechanische Leistung zugeführt werden muß. Strom und Spannung besitzen Schlupffrequenz, die bei Synchronlauf der Vordermaschine zu Null wird. Dann arbeitet die Hintermaschine mit Gleichstrom.

Seltener wird die ständererregte Kommutatormaschine auch als selbständiger Motor oder Generator betrieben, letzteres z. B. zum An-

¹ SEIZ: Arbeiten aus dem ETI. Karlsruhe III S. 216. — WEILER: ETZ 1924 S. 1080.

trieb von Asynchronmotoren, deren Drehzahl durch bloße Änderung der Erregerfrequenz der Kommutatormaschine geregelt wird.

Der Aufbau gleicht im wesentlichen dem einer kompensierten Gleichstrommaschine. Der geblätterte Ständer besitzt Hauptpole mit konzentrierter oder verteilter Erregerwicklung, Hilfspole und eine am Umfang in regelmäßig verteilten Nuten liegende Kompensationswicklung. Die Erregung ist in den meisten Fällen als Fremd-, seltener als Selbst-

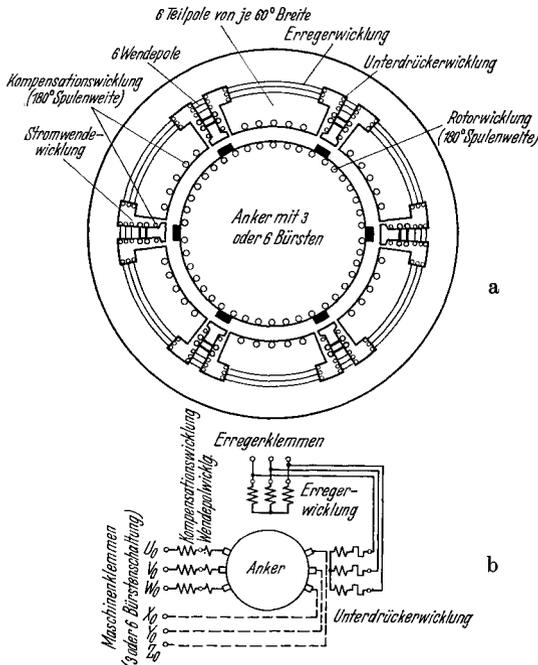


Abb. 183. Schematische Darstellung (a) und Schaltungs-schemata (b) einer ständererregten Drehstromkommutatormaschine für Schlupffrequenz (einschließlich Gleichstrom) mit sechs Teilpolen und sechs Stromwendezonen für Drei- oder Sechsbürstenschaltung. Das — unvollkommene — Drehfeld kann im Sinne oder gegen den Sinn der mechanischen Drehung rotieren. Die Phasenfolge der Bürsten entspricht dem Drehsinn des Drehfeldes.

Schlupfperiodenzahlen von rund 3 bis 5 Perioden. Bei kleineren Leistungen von einigen hundert kVA werden die Maschinen für höhere Frequenzen bis etwa 15 Perioden gebaut.

Grundsätzlich im Aufbau, wenig in der Wirkungsweise unterscheiden sich die Maschinen mit sechs Teilpolen und die sog. Scherbiusmaschine.

Die Drehstromkommutatormaschine mit sechs Teilpolen¹. In Abb. 183 ist schematisch eine zweipolige Maschine dargestellt.

Man erkennt insgesamt sechs Teilpole, von denen jeweils zwei sich gegenüberliegende den „Nordpol“ und den „Südpol“ einer Phase bilden. Senkrecht zu ihnen liegen die beiden zugehörigen Wendepole.

¹ Bauart AEG.

erregung geschaltet. Reine

Reihenschlußerregung

kommt praktisch nicht

vor, doch kann zur Neben-

schlußwicklung noch eine

Hauptstromzusatzwick-

lung treten. Diese wirkt

in der Regel feldverstär-

kend bei Motor-, feld-

schwächend bei Genera-

torbetrieb. Die Wendepole

werden vom Anker-

strom einer oder mehrerer

Phasen erregt. Eine zu-

sätzliche Hilfserrgung

sorgt für die teilweise Auf-

hebung der von der kom-

mutierenden Spule kurz-

geschlossenens Transfor-

matorspannung.

Der Anker hat durch-

weg Dreibürstenschal-

tung, kann aber in der

Bauart mit sechs Teilpolen

auch für sechsphasigen Be-

trieb mit Sechsbürsten-

schaltung ausgerüstet

werden.

Die Leistungen gehen

bis etwa 1500 kVA bei

In den Nuten des Hauptpolbogens und zuunterst in den angrenzenden fremden Wendepolnuten liegt die Kompensationswicklung. Die Wendepolwicklung liegt in den eigenen Wendepolnuten. Darüber befindet sich die dünndrätige, nur den Wendezahn umschlingende Hilfserrerger- oder Unterdrückerwicklung. Diese ist an die Erregerklemmen über einen hohen Widerstand angeschlossen, so daß der in ihr fließende Strom um fast 90° zeitlich gegenüber dem Erregerstrom verschoben ist. Das von ihr hervorgerufene Wendefeld induziert in der kommutierenden Spule eine Rotationsspannung, die der durch das pulsierende Feld induzierten Transformatorspannung möglichst das Gleichgewicht halten soll. Die Transformatorspannung hängt quadratisch vom Fluß ab, da dieser selbst praktisch linear von der Frequenz abhängig ist. Dies gilt für den wichtigen Fall, daß die Spannung an den Ankerklemmen linear mit zunehmender Frequenz ansteigt, während die Drehzahl völlig oder doch nahezu konstant bleibt. Die Rotationsspannung steigt linear mit der Frequenz an, da die Erregerspannung, von der unmittelbaren Nachbarschaft des Synchronismus abgesehen, ebenfalls dem Fluß proportional ist. Es gelten folgende Beziehungen, wenn der Anker eine Windung je Segment hat:

$$\begin{aligned} \text{Transformatorspannung } e_{\text{tr}} &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot (s \cdot f) \cdot \frac{\Phi}{100} \\ &= K_1 \cdot s^2, \text{ da } \Phi \text{ prop. } s \text{ ist.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rotationsspannung } e_{\text{rot}} &= 2 \cdot l_e \cdot v_a \cdot B_{w_{\text{hi}}} \cdot 10^{-6} \\ &= K_2 \cdot s, \text{ da } B_{w_{\text{hi}}} \text{ prop. } s \text{ ist.} \end{aligned}$$

Φ ist der Fluß in Megamaxwell je 180° el Umfang, s der Schlupf, f die Erregerfrequenz, l_e die Eisenlänge in cm, v_a die Ankerumfangsgeschwindigkeit in m/sec und $B_{w_{\text{hi}}}$ die Induktion unter dem Wendepolschuh, die von der Unterdrückerwicklung hervorgerufen wird. Aus Abb. 184 ersieht man, daß die Aufhebung der transformatorischen Spannung nur bei einem bestimmten Schlupf gelingt, während bei anderen Werten geringe Restwerte verbleiben. Diese beanspruchen die Bürsten und rufen Kurzschlußströme unter denselben hervor, die aber in durchaus erträglichen Grenzen bleiben.

Die Reaktanzspannung der kommutierenden Spule wird wie bei der Gleichstrommaschine oder beim Bahnmotor durch das Stromwendefeld aufgehoben, welches von der eigentlichen hauptstromdurchflossenen Wendepolwicklung hervorgerufen wird. Im Gegensatz zur Scherbiusmaschine geschieht die Erregung jedes Wendepoles nur durch den Strom einer einzigen Phase.

Die Nebenschlußerregewicklung liegt in den großen Wendepolnuten gemeinsam mit der etwa vorgesehenen Kompoundwicklung. Die

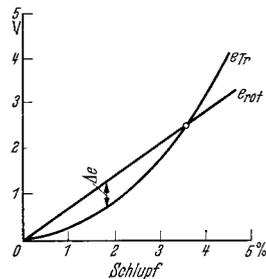


Abb. 184. Transformatorspannung und durch Unterdrückerwicklung hervorgerufene Rotationsspannung über dem Schlupf. Die größte verbleibende Restspannung ist rund $\frac{1}{8}$ der höchsten Transformatorspannung.

zwischen ihnen bestehende magnetische Kopplung schadet in den meisten Fällen nicht, kann aber durch besondere Maßnahmen vermieden werden.

Wie gestrichelt angedeutet, enthält man durch Aufsetzen der doppelten Bürstenzahl aus der Drei- die Sechsbürstenschaltung.

Die Prüfung beginnt mit der *Widerstandsmessung*, die für die hauptstromdurchflossenen Wicklungen meistens nur gemeinsam erfolgen kann, da wegen der einfacheren Schaltung diese unlösbar miteinander verbunden werden. Im Erregerkreis sind die Nebenschluß- und die Unterdrückerwicklung zu trennen. Der Ankerwiderstand wird in Polteilung und zwischen zwei Segmenten gemessen. Wenn die Maschine jedoch Widerstandsverbinder besitzt, darf nicht am Stromwender, sondern nur an den blank gemachten Wickelköpfen gemessen werden.

Anschließend wird die *Bürstenbrücke* eingestellt, nachdem schon vorher die richtige Folge der Pole im Ständer durch Gleichstromspeisung der einzelnen Phasen und mit Magnetnadel kontrolliert worden ist. Man erregt die Erregerwicklung dreiphasig mit schlupffrequenter Spannung und mißt die Spannung an den Hauptstromklemmen. Die Maschine steht still und es werden in der Ankerwicklung und in der Kompensationswicklung fast gleich große, jedoch entgegengesetzt gerichtete Spannungen induziert. Die richtige Stellung der Bürstenbrücke ist gefunden, wenn die Spannung an den Hauptstromklemmen ein Minimum wird. Man kann aber auch das induktive Verfahren wie bei der Gleichstrommaschine anwenden. Die Bürstenstellung wird vorerst angezeichnet und erhält ihre endgültige Markierung erst nach den Lastversuchen. Die genaue Stellung ist von besonderer Wichtigkeit, weil die Anker-*AW* wesentlich größer als die Erreger-*AW* sind und daher die geringste Verschiebung des Joches bereits einen sehr starken Einfluß auf den Fluß nimmt. Zweckmäßigerweise wird anschließend auch die Teilung der Bürsten nachgemessen, wobei Abweichungen von über 0,5 mm bereits zu beseitigen sind.

Leerlaufversuche. Die mittels Hilfsmotor auf Nenndrehzahl hochgefahrenen Maschine wird erregt und bei konstanter Erregerfrequenz die Sättigungskurve und die aufgenommene Antriebs- und Erregerleistung bestimmt. Die Phasenfolge im Erregerkreis ist ohne Einfluß auf die Höhe der Spannung. Nur an den Bürsten selbst kann man feststellen, ob das Erregerfeld mit oder gegen die Drehrichtung umläuft. Im ersten Fall ist die Bürstenspannung kleiner als die Klemmenspannung, im zweiten Fall größer.

Lastversuche. Steht die Vordermaschine zur gemeinsamen Prüfung zur Verfügung, so erfolgt die Belastung am besten auf diese in der richtigen Schaltung. Andernfalls müssen Widerstände, unter Umständen zusammen mit großen Asynchronmaschinen, die Belastung darstellen. Durch Erregung mit Gleichstrom, indem nur U und V der Erregerwicklung gespeist werden, kann die Maschine auch mit Gleichstrom geprüft werden. Dabei beachtet man, daß der Gleichstrom um $\sqrt{1,5} = 1,23$ mal größer gewählt werden muß, als der gleichwertige Wechselstrom. 100 A Wechselstrom sind also 123 A Gleichstrom gleichzusetzen.

Der Belastungsversuch gibt durch Aufnahme der Klemmenspannungskennlinie bei konstanter Erregung Aufschluß über den richtigen Anschluß der Compoundwicklung. Bei Maschinen ohne Compoundwicklung zeigt die Gleichheit der Spannungskennlinie für Rechts- und Linkslauf die richtige neutrale Stellung der Bürsten an.

Kommutierung. Bei Gleichstrombetrieb schaltet man die Unterdrückerwicklung ab und untersucht die Stromwendung wie bei einer Gleichstrommaschine. Man nimmt also die Bürstenspannung an den stromführenden Bürsten auf und ändert durch Zu- oder Abschalten einer halben oder einer ganzen Wendepolwindung nötigenfalls den Kompensationsgrad. Wegen der geringen Periodenzahlen können auch Wendepolschuhe vorgesehen werden, die eine Änderung des Wendeluftspaltes ermöglichen.

Die Unterdrückerwicklung wird bei Leerlauf und einer Erregerfrequenz, die knapp unter der höchsten Betriebsfrequenz liegt, eingestellt. Man verändert den Vorschaltwiderstand so lange, bis das von der transformatorischen Spannung hervorgerufene prickelnde Feuern unter den Bürsten verschwindet. Man beachte den richtigen Anschluß der Unterdrückerwicklung, deren Feld zeitlich und räumlich um 90° hinter dem Feld der zugehörigen Haupterregerwicklung nacheilen muß. Der Strom in der Unterdrückerwicklung eilt dem Erregerstrom um fast 90° voraus, deshalb müssen Anfang und Ende der Unterdrückerwicklung gegenüber dem Anschluß der Erregerwicklung vertauscht sein. Dies ist unter Umständen nachzuprüfen.

Kurzschlußversuch. Dieser Versuch ist wichtig, da er die Neigung der Maschine zur Selbsterregung erkennen läßt. Die Bürsten werden kurzgeschlossen und die Maschine erregt. Der Kurzschlußstrom darf keinesfalls von selbst ansteigen, sondern es muß zu jedem Wert des Erregerstromes ein ganz bestimmter Kurzschlußstrom gehören. Insbesondere darf bei unerregter Maschine der wegen der Remanenz fließende Strom nicht größer als 5 bis 10% des Nennstromes werden. Notfalls ist durch einen geringen Bürstenvorschub für die notwendige Stabilität Sorge zu tragen. Man verschlechtert allerdings dadurch unter Umständen die Stromwendung, da die kommutierenden Spulen aus dem Wendebereich austreten können.

Die Scherbiusmaschine. Aufbau: Die Scherbiusmaschine unterscheidet sich von der vorigen Maschine durch folgende wesentliche Merkmale: Der Anker besitzt eine Gleichstromwicklung, deren Spulen nicht 180° , sondern nur 120° Weite haben. Die Sehnung um 60° hat zur Folge, daß statt der sechs Wendezonen nur drei vorhanden sind. Deshalb werden auch nur drei Wendepole auf je 360° el benötigt. Zwischen diesen liegen die Teilpole, von denen nur ein einziger auf jede Phase entfällt. Man hat also nur einen „Nordpol“, der „Südpol“ fehlt und der magnetische Rückschluß geschieht durch die beiden Pole der anderen Phasen. Drei Teilpole bilden zusammen einen sog. Polsatz.

Die Erregung der Teilpole geschieht durch schlupffrequenten Strom, wobei durch geeignete Überlappung eine gewünschte Phasenlage zwischen Erregerspannung und Klemmenspannung erreicht werden

kann. Im übrigen ist ebenfalls Nebenschluß-, Doppelschluß-, Hauptschluß- und Fremderregungsschaltung des Erregerkreises möglich.

Die Kompensationswicklung dient der restlosen Aufhebung des Ankerfeldes. Hierzu ist, im Gegensatz zur Maschine mit sechs Teilpolen, eine Durchflutung der einzelnen Kompensationsnuten durch Ströme aller drei Phasen nötig.

Der Wendepol besitzt drei Wicklungen. Zwei werden von den Strömen verschiedener Phasen gespeist, während die dritte wiederum eine Unterdrückerwicklung darstellt. Durch Spaltung des Wendepoles in axialer Richtung können die beiden Spulengruppen entkoppelt werden.

Die Sechsbürstenschaltung ist naturgemäß bei der Scherbiusmaschine nicht möglich.

Die Prüfung geschieht nach den gleichen Gesichtspunkten wie bei der vorher beschriebenen Maschine. Die richtige Schaltung der wesentlich komplizierter angeordneten Wicklungen wird am besten vor Einbau des Ankers kontrolliert.

Abschnitt III.

Die Meßgeräte und Verfahren.

A. Die Messung der elektrischen Größen.

a) Allgemeines.

Die Messung der elektrischen Größen im Prüffeld geschieht vorwiegend nach dem indirekten Verfahren. Die Meßgeräte besitzen einen einzigen Meßbereich, und die Erweiterung desselben für die in Frage kommenden sehr weiten Bereiche erfolgt durch Neben- und Vorwiderstände oder Strom- und Spannungswandler. Allerdings besitzen manche Strom- und Leistungsmesser eine Umschaltvorrichtung auf Teilstromstärken, und die Vorwiderstände in Spannungs- und Leistungsmessern sind oft unmittelbar mit dem Gehäuse zusammengebaut.

Die Ablesung der Meßgeräte erfolgt in Skalenteilen und nicht unmittelbar in Volt, Ampere oder Watt. Die Prüfungsnachweise besitzen daher stets zwei Spalten, in deren erste die Anzeige in Skalenteilen und in deren zweite der durch Multiplikation mit der Meßkonstanten C rechnerisch ermittelte Betrag in Volt, Ampere oder Watt eingetragen wird. Die Meßkonstante wird über der zweiten Spalte angegeben und in der nachstehenden Weise berechnet. Es empfiehlt sich erfahrungsgemäß, die Berechnung der Konstanten mit allen Zahlen hinzuschreiben, da ein bei ihrer Bestimmung etwa begangener Fehler auf diese Weise leichter nachträglich noch ermittelt und beseitigt werden kann.

Die Auswahl der Meßgeräte nach ihrer Meßgenauigkeit wird durch die bei der Prüfung der Maschine verlangte Genauigkeit bestimmt. Für die übliche Prüfung genügen durchaus die billigeren und robusteren Geräte mit einem Anzeigefehler von 1,5%, welche der früheren Be-

zeichnung G entsprechen. Für Abnahmeversuche und wichtige Messungen im Versuchsfeld verwendet man dagegen die genaueren Geräte mit einem Fehler von 0,2 bis 0,5%, welche die Genauigkeit der früheren Klasse E bzw. F besitzen.

Die Aufstellung der Geräte erfolgt möglichst unter Ausschluß aller störenden Fremdeinflüsse und in der auf dem Gerät angegebenen Lage. Insbesondere ist zu beachten, daß sie nicht in unmittelbare Nähe stromführender Leitungen aufgestellt werden oder daß diese gar eine Schleife um den Instrumententisch herum bilden. Ebenfalls ist das Aufsetzen auf Widerstandsgehäuse oder andere sich erwärmende Körper zu vermeiden, und weiterhin sind Erschütterungen durch benachbarte Maschinen fernzuhalten. Der gegenseitige Geräteabstand soll mindestens 30 cm betragen.

Die Nachprüfung der Geräte durch Präzisionsinstrumente oder durch den Kompensator erfolgt in regelmäßigen Zeiträumen; dies gilt auch für die Vor- und Nebenwiderstände, von denen besonders letztere infolge ihrer meist offenen Bauart besonders leicht mechanischen Beschädigungen ausgesetzt sind. Strom- und Spannungswandler können in größeren Abständen kontrolliert werden. Stromwandler, welche irrtümlich sekundär bei primärem Stromdurchgang geöffnet worden sind, können einen merklichen Fehler infolge des remanenten Magnetismus erhalten. Sie müssen aus der Meßanordnung herausgenommen und vor der Weiterverwendung entmagnetisiert und nachgeprüft werden.

Vor Beginn der Messungen wird die Nullstellung des Gerätezeigers überprüft und gegebenenfalls eine Einstellung mittels der Nullstellschraube vorgenommen.

In den folgenden Abschnitten b—c und in den zugehörigen Abbildungen 186—206 bedeutet:

- α = Ausschlag des Meßgerätes in Skalenteilen,
- α_{gesamt} = Gesamtzahl aller Skalenteile,
- C = Meßkonstante in V, A, W, VA je Skalenteil,
- u_g = Nennspannung bzw. Nennspannungsabfall des Gerätes in V,
- i_g = Nennstrom des Gerätes in A,
- U_n = Nennspannungsabfall des Nebenwiderstandes in V,
- I_n = Nennstrom des Nebenwiderstandes in A,
- U_{pr}/U_{sec} = Primärnennspannung/Sekundärnennspannung des Spannungswandlers,
- I_{pr}/I_{sec} = Primärnennstrom/Sekundärnennstrom des Stromwandlers.

b) Die Messung von Strom, Spannung und Leistung bei Gleichstrom.

Für **Strommessungen** werden im Prüffeld fast ausschließlich *Drehspulgeräte* mit permanentem Magneten verwendet. Der Aufbau des Meßsystems geht aus Abb. 185 hervor. Im ringförmigen Luftspalt zwischen den zylindrisch ausgedrehten Polschuhen des Magneten und dem konzentrisch dazu liegenden, ruhenden Eisenzylinder kann sich die stromdurchflossene Drehspule gegen die Kraft der beiden gleichzeitig als Stromzuleitung dienenden Spiralfedern drehen. Der Ver-

drehungswinkel α ist ein Maß für die Stärke des Stromes. Er wird durch einen Zeiger auf die Skala übertragen, die meist in 100 oder 150 gleichmäßige Skalenteile unterteilt ist.

Das *Strommeßgerät* besitzt eine in Millivolt eingeteilte Skala. Üblich sind Geräte mit einem Endwert von 60, 100, 150 oder 300 mV. Sie nehmen nur einige Milliampere Strom auf und werden nach Abb. 186

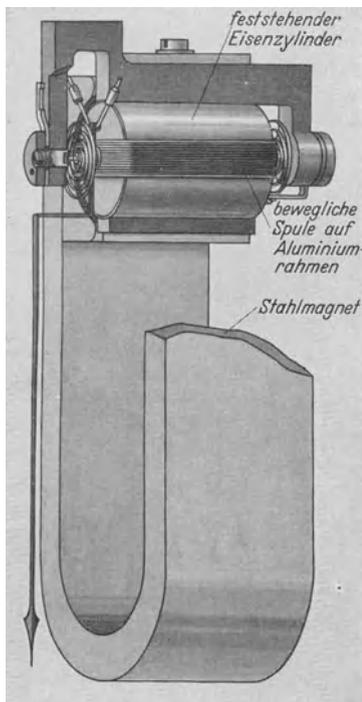


Abb. 185. Aufbau eines Drehspulgerätes.

immer in Verbindung mit einem Nebenwiderstand benutzt. Dieser nimmt infolge seines wesentlich geringeren Widerstandswertes nahezu den vollen Strom auf, während das Millivoltmeter den an seinen Klemmen auftretenden Spannungsabfall mißt. Die Nebenwiderstände tragen die Angabe des Nennstromes und des Spannungsabfalles, also z. B. die Angabe 75 A und 150 mV. Sie können in Verbindung mit Millivoltmetern verschiedenen Eigenwiderstandes benutzt werden, sofern deren Eigenstromaufnahme nicht mehr als 0,1% des zu messenden Stromes ausmacht. Bei der Messung kleiner Ströme darf das Millivoltmeter nur in Verbindung mit seinem zugehörigen Nebenwiderstand benutzt werden. Außerdem ist zu beachten, daß die Meßleitungen zum Gerät, die es mit den Spannungsanschlüssen des Nebenwiderstandes verbinden, mit ihm gemeinsam abgeglichen werden müssen, also nicht etwa durch behelfsmäßige Drahtverbindungen ersetzt werden dürfen.

Unbedingt zu vermeiden sind Zuleitungen aus verschiedenen Werkstoffen, da sonst durch auftretende Thermokräfte grobe Meßfehler entstehen können.

Neuerdings erhalten die Nebenwiderstände auch die Angabe der bei ihrer Abgleichung berücksichtigten Stromaufnahme des zugehörigen Meßgerätes, sofern diese 0,1% des Nennstromes überschreitet.

Die Meßkonstante des Millivoltmeters in Verbindung mit seinem Nebenwiderstand wird berechnet zu:

$$\text{Meßkonstante } C = \frac{\text{Nennstrom des Nebenwiderstandes}}{\text{Gesamtzahl der Skalenteile}}.$$

Beispiel: Millivoltmeter mit 150 Skalenteilen für 60 mV, Nebenwiderstand für 75 A und ebenfalls 60 mV

$$C = \frac{75}{150} = 0,5 \text{ A je Skalenteil.}$$

Die Millivoltmeter müssen, wenn die Stromrichtung wechselt, oft während der Messung umgeschaltet werden, wobei die Gefahr der Berührung spannungsführender Leitungen besteht. Infolge des sehr geringen eigenen Widerstandes kann das Gerät dabei explodieren. In der Praxis ist es daher üblich, die Geräte und den Ablesenden durch Einbau von Sicherungen zu schützen, deren zusätzlicher Widerstand bei der Abgleichung allerdings zu berücksichtigen ist. Der entstehende zusätzliche Temperaturfehler kann meist vernachlässigt werden.

Treten während der Prüfung kurzzeitig höhere Ströme als der Nennstrom des verwendeten Nebenwiderstandes auf, so vermag man durch die Reihenschaltung zweier gleicher Millivoltmeter doch den Meßwert zu ermitteln. Die Anzeige beider Geräte wird addiert, die Meßkonstante

a) Meßkonstante: $C = \frac{i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \left(1 + \frac{r_{\text{gerät}}}{R_{\text{neben}}} \right) = \frac{I_n}{\alpha_{\text{gesamt}}}$

wobei: i_g = Nennstrom des Strommessers,
 I_n = Nennstrom in Verbindung mit Nebenwiderstand ist.

b) Der Wert des Nebenwiderstandes R_{neben} , der zur Messung des Nennstromes I_n bei Vollausschlag benötigt wird, errechnet sich zu:

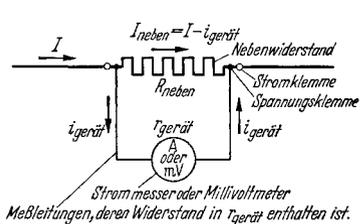
$R_{\text{neben}} = \frac{r_{\text{gerät}}}{\frac{I_n}{i_g} - 1}$ bei Verwendung eines ausgesprochenen Strommessers mit Nennstrom i_g und Widerstand $r_{\text{gerät}}$;

$R_{\text{neben}} = \frac{u_g}{I_n - i_g} \approx \frac{u_g}{I_n}$ bei Verwendung eines Millivoltmeters, mit Nennspannungsabfall u_g und Nennstromaufnahme $i_g = u_g / r_{\text{gerät}}$.

c) Bei Verwendung eines Millivoltmeters für 150 mV bei 5 Ohm Widerstand gehen durch den Nebenwiderstand bzw. durch das Meßgerät die folgenden prozentualen Ströme:

I_n	1,5	3,0	7,5	15	30	75	150	300	750	1500 A
$I_{\text{neben}} \%$	98,0	99,0	99,6	99,8	99,9	99,96	99,98	99,99	99,996	99,998 %
$i_{\text{gerät}} \%$	2	1	0,4	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	0,004	0,002 %

Abb. 186. Gleichstrommessung mit Nebenwiderstand. Bei der — seltenen — Verwendung eines ausgesprochenen Strommessers geht noch ein nennenswerter Teil des zu messenden Stromes durch das Gerät, der Rest durch den Nebenwiderstand. Bei der üblichen Verwendung eines Millivoltmeters geht praktisch der volle Strom durch den Nebenwiderstand. Das Gerät mißt eigentlich den vom Strom hervorgerufenen Spannungsabfall.



bleibt dieselbe. Wenn der zu messende Strom sich während der Versuchsreihe in weiten Grenzen ändert, so können zwei oder mehr verschiedene Nebenwiderstände in Reihe gelegt werden. Das Millivoltmeter wird jeweils von einem Widerstand auf den anderen umgelegt. Die Nebenwiderstände mit den kleineren Nennstromstärken werden zu ihrem Schutz durch einen einpoligen Schalter überbrückt, sobald der Strom zu groß wird.

Da die Millivoltmeter stets eine genaue Bezeichnung der Polarität ihrer Klemmen besitzen, kann mit ihrer Hilfe die Richtung des Stromes ermittelt werden. Bei richtigem Ausschlag des Gerätes geht der Strom von der (+)-Klemme nach der (-)-Klemme.

Unter Umständen muß die Durchführung einer Messung auch dann erfolgen, wenn nicht die zum Gerät gehörenden Nebenwiderstände vorhanden sind, wohl aber solche anderer Herkunft beschafft werden können. Für den allgemeinsten Fall, daß der zur Verfügung stehende Nebenwiderstand einen anderen Nennspannungsabfall U_n als das Gerät besitzt und bei seiner Abgleichung ein anderer Gerätestrom

i'_g berücksichtigt worden ist, errechnet sich die genaue Meßkonstante zu:

$$C = \frac{I_n}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{u_g}{U_n} + \frac{i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \left(1 - \frac{i'_g}{i_g} \cdot \frac{u_g}{U_n} \right).$$

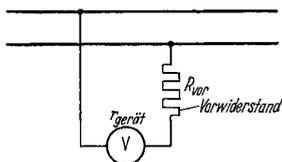
Meist sind derartige Messungen nur für größere Ströme von über 10 A durchzuführen. Dann kann in guter Annäherung gesetzt werden:

$$C \approx \frac{I_n}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{u_g}{U_n}.$$

Gleichstromspannungsmessung. Zur Messung der Gleichspannung wird das Drehspulgerät in Verbindung mit geeigneten Vorwiderständen benutzt. Meist sind diese im Gerät mit eingebaut und durch mehrere Klemmen am Gehäuse zugänglich gemacht; sie tragen eine dem Meßbereich entsprechende Bezeichnung in Volt. Die Meßkonstante C bestimmt sich zu:

$$C = \frac{\text{Spannungsangabe der benutzten Klemme in Volt}}{\text{Gesamtzahl aller Skalenteile}} = \frac{u_g}{\alpha_{\text{gesamt}}}.$$

Als zweite Klemme wird die mit 0 bezeichnete Nullklemme benutzt. Bei Verwendung äußerer getrennter Vorwiderstände ist eine Verbindung zwischen Gerät und besonders gekennzeichnete Vorwiderstandsklemme



- a) Meßkonstante: $C = \frac{u_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{R_{\text{vor}} + r_{\text{gerät}}}{r_{\text{gerät}}}$, wobei u_g die Nennspannung des Spannungsmessers ist.
 b) Der Wert des zur Messung der Spannung U bei Vollausschlag erforderlichen Vorwiderstandes ist:

$$R_{\text{vor}} = \left(\frac{U}{u_g} - 1 \right) \cdot r_{\text{gerät}}.$$

Abb. 187. Spannungsmessung mit Vorwiderstand bei Gleich- und Wechselstrom.

zu legen. Gelegentlich ist auch die Nullklemme zu verbinden. Die Meßkonstante berechnet sich wie oben. Allgemein erhöht sich die Meßkonstante $C_{\text{gerät}}$ eines Gerätes mit dem Eigenwiderstand $r_{\text{gerät}}$ bei Verwendung eines Vorwiderstandes von R_{vor} nach Abb. 187 auf:

$$C_{\text{vor}} = C_{\text{gerät}} \cdot \frac{r_{\text{gerät}} + R_{\text{vor}}}{r_{\text{gerät}}}.$$

Üblicherweise gehen die Geräte mit Vorwiderstand bis 600 V. Für die selteneren Messungen darüber schaltet man zwei gleiche Geräte mit ihren Vorwiderständen in Reihe. Die Angaben beider werden addiert. Für isolierte Aufstellung ist Sorge zu tragen.

Gleichstromleistungsmessung. Die Gleichstromleistung wird nicht mit einem Leistungsmesser bestimmt, sondern als Produkt aus Strom und Spannung errechnet. Nur die Eichung der Leistungsmesser wird mit Gleichstrom vorgenommen.

e) Die Messung von Strom, Spannung und Leistung bei Wechselstrom technischer Frequenz (15—100 Hz).

Strommessung. Als Meßgerät findet heute vorzugsweise das *Dreh-eisengerät* Verwendung, dessen Aufbau aus Abb. 188 zu erkennen ist. Der zu messende Strom durchfließt eine feste Spule, in welcher ein festes

und ein bewegliches Eisenblättchen angeordnet sind, die sich infolge ihrer gleichpoligen Magnetisierung voneinander abstoßen. Die Gegenkraft wird von einer Feder aufgebracht, die aber nicht wie beim Drehspulgerät für die Stromzufuhr dient. Durch geeignete Legierung und Formgebung wird eine Skala erhalten, deren Teilung ab 10 bis 20% des Endwertes angenähert gleichmäßig verläuft. Geräte anderer Bauart besitzen nur ein einziges bewegliches Blättchen, welches in die stromdurchflossene Spule hineingezogen wird.

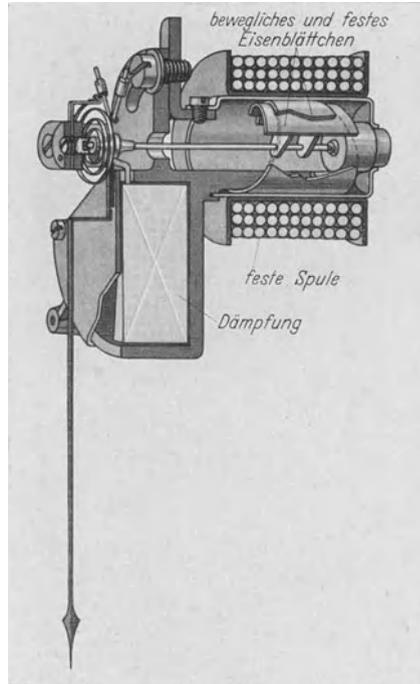


Abb. 188. Aufbau eines Dreheisengerätes.

Direkte Messungen werden praktisch nur selten durchgeführt. Fast immer wird ein *Stromwandler* benutzt, der sekundär für 5 A und primär für die Größe des zu messenden Wechselstromes gewickelt ist (Abb. 189). Üblich sind Primärnennstromstärken von 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 usw. A. Die Meßkonstante des Wechselstrommessers in Verbindung mit einem Stromwandler errechnet sich zu:

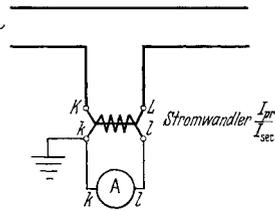
$$C = \frac{\text{Nennstrom des Gerätes}}{\text{Gesamtzahl der Skt.}} \cdot \frac{\text{Primärnennstrom des Wandlers}}{\text{Sekundärnennstrom des Wandlers}}$$

Die Primärnennstromstärke kann bei manchen Wandlern durch Umschalten der Primärwicklung geändert werden. Sehr praktisch, besonders bei Messungen außerhalb des Prüffeldes, sind die Lochstromwandler nach Abb. 190. In der gezeigten Ausführung besitzt ein solcher

Meßkonstante: $C = \frac{i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sec}}$. i_g = Nennstrom des Gerätes (unter Berücksichtigung der Schaltung der Stromspulen).

$$\frac{I_{pr}}{I_{sec}} = \frac{\text{Primärnennstrom des Stromwandlers}}{\text{Sekundärnennstrom des Stromwandlers}}$$

Abb. 189. Strommessung mit Stromwandler bei Wechselstrom.



Wandler drei Primärklemmen für Stromstärken von 15 und 50 A. Sekundär fließen 5 A. Für höhere Stromstärken wird nicht mehr die vorhandene Primärwicklung, sondern ein mehrfach oder nur einfach durch das Loch des Wandlers geführter Primärstromleiter benutzt. Er

wird durchgeführt: 6 mal für 100 A, 4 mal für 150 A, 3 mal für 200 A, 2 mal für 300 A und 1 mal für 600 A. Als Primärwindungen zählen nur die Gänge im Inneren des Loches. Der Anschluß der Wandler erfolgt derart, daß die Primärklemme K mit der vom Erzeuger (Kraftwerk) kommenden Leitung, die Klemme L mit der zum Verbraucher gehenden Leitung verbunden wird bzw. bei Benutzung des Lochwandlers die mit K bezeichnete Seite desselben nach dem Erzeuger und die mit L bezeichnete

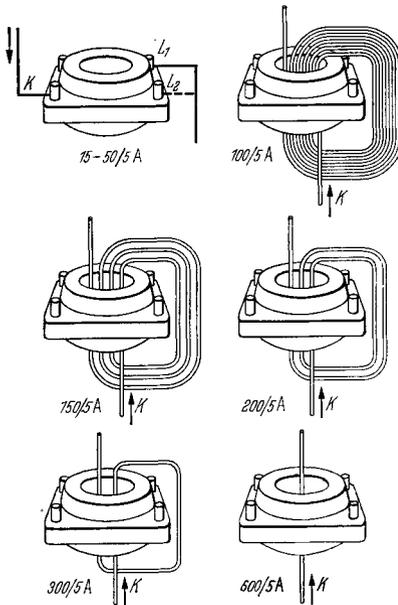


Abb. 190. Lochstromwandler.

Schaltungen für die verschiedenen Übersetzungsverhältnisse.

- 15/5 A Primärer Anschluß an K und L_1
- 50/5 A Primärer Anschluß an K und L_2
- 100/5 A Primärleiter 6 mal durchführen
- 150/5 A Primärleiter 4 mal durchführen
- 200/5 A Primärleiter 3 mal durchführen
- 300/5 A Primärleiter 2 mal durchführen
- 600/5 A Primärleiter 1 mal durchführen

nach dem Verbraucher zu liegt. Die Sekundärklemmen k und l gehen an die gleichbezeichneten Klemmen des Strommessers. Bei umgekehrtem Anschluß ändert sich nichts an der Anzeige des Gerätes. Da aber meist ein Leistungsmesser mit angeschlossen wird, dessen Ausschlagrichtung vom richtigen Klemmenanschluß abhängt, richtet man sich auch beim Strommesser nach den angegebenen Bezeichnungen.

Der Stromwandler arbeitet im Kurzschluß. Die primär und sekundär an seinen Klemmen auftretende Spannung ist sehr klein. Wird er dagegen im Betrieb versehentlich sekundär geöffnet, so wirken die primären Amperewindungen voll und ganz magnetisierend, da ihnen keine sekundären Gegenamperewindungen entgegenwirken. Die Folge ist eine Magnetisierung des Eisenkernes bis zur Sättigung und das Auftreten eines starken Spannungsabfalles auf der Primärseite. Da die Sekundärwindungszahl ein Vielfaches der primären beträgt, herrscht an den Sekundärklemmen eine noch wesentlich

höhere Spannung, welche zur Gefährdung des Bedienenden führen kann. Außerdem treten hohe schädliche Eisenverluste auf und es bleibt unter Umständen ein remanenter Magnetismus im Wandler nach dem Abschalten zurück, der seine Genauigkeit stark beeinträchtigt. Alle Stromwandler müssen daher, sofern sie nicht auf Geräte belastet sind, kurzgeschlossen werden. Dieser Kurzschluß kann primär- oder sekundärseitig erfolgen.

Bei Messungen in Hochspannungsnetzen wird eine Klemme des Wandlers auf der Sekundärseite geerdet. Meßgeräte, die am gleichen Stromwandler angeschlossen werden, sind in *Reihe* zu schalten, damit sie vom gleichen Strom durchflossen werden. Ihr Gesamtverbrauch darf den Wert der zulässigen Wandlerbelastung in VA nicht überschreiten.

Wechselstromspannungsmessung. Die Messung der Wechselspannung findet ebenfalls vorwiegend mit dem Dreheisengerät statt. Die Spule besitzt viele Windungen dünnen Drahtes. Vorschaltwiderstände ermöglichen wie beim Drehspulgerät die Messung aller Spannungen bis zu 600 V. Die Meßkonstante wird auf gleiche Weise wie beim Drehspulgerät errechnet. Bei höheren Spannungen werden fast ausschließlich *Spannungswandler* benutzt, die die Messung bis zu den höchsten Werten erlauben. Die Sekundärspannung der Wandler betrug früher 110 V, heute meist 100 und 110 V, d. h. es finden sich Anschlüsse für beide Spannungen am gleichen Wandler. Die Schaltung mit Wandler zeigt Abb. 191. Die Meßkonstante errechnet sich zu:

$$C = \frac{\text{Nennspannung des Gerätes}}{\text{Gesamtskalenteile}} \cdot \frac{\text{Primärnennspannung des Wandlers}}{\text{Sekundärnennspannung des Wandlers}}$$

Als Nennspannung des Gerätes ist diejenige zu verstehen, die sich unter Berücksichtigung eines etwa vorgeschalteten Vorwiderstandes ergibt.

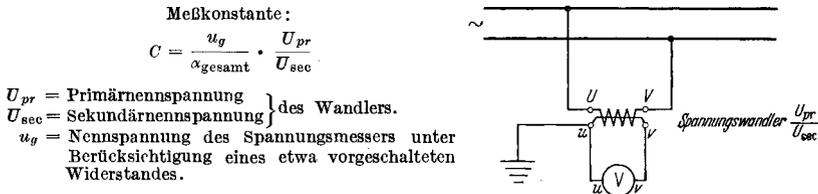


Abb. 191. Spannungsmessung mit Spannungswandler bei Wechselstrom.

Der Spannungswandler besitzt primär die Klemmenbezeichnung UV und sekundär die Bezeichnung uv . Beide Wicklungen haben den gleichen Wickelsinn. Die Sekundärklemmen werden mit den gleichbezeichneten Klemmen des Spannungsmessers verbunden. Der Ausschlag ändert sich bei vertauschtem Anschluß nicht. Wie beim Stromwandler ist der richtige Anschluß nur beim Leistungsmesser von Bedeutung. Mehrere Geräte werden am gleichen Wandler in *Parallelschaltung* angeschlossen. Ihr Gesamtverbrauch darf die zulässige Belastung in VA nicht überschreiten.

Wechselstromleistungsmessung. Als Leistungsmesser wird das *elektrodynamische Gerät* benutzt, bei dem eine feste Spule vom Strom und eine darin drehbare Spule von einem der Spannung verhältnis- und phasengleichen Strom durchflossen werden. Die bewegliche Spule erfährt ein Drehmoment und sucht sich gegen die Rückstellkraft der gleichzeitig als Stromzuleitung dienenden Federn in gleichachsige Lage mit der festen Spule zu verdrehen. Den inneren Aufbau zeigt Abb. 192. Bei Gleichstrom ist der Ausschlag vom Produkt Spannung mal Strom, bei Wechselstrom vom Produkt Spannung mal Strom mal Leistungsfaktor abhängig. In beiden Fällen wird also die Wirkleistung gemessen. Bei Wechselstrom kann der Leistungsfaktor sehr klein oder auch Null werden. Im letzteren Fall zeigt das Gerät keinen Ausschlag, auch wenn ihm volle Spannung und voller Strom zugeführt werden. Während

bei den Geräten für Strom- und Spannungsmessung bei kleinem Ausschlag stets der nächstkleinere Meßbereich gewählt werden darf, um einen möglichst großen Ausschlag zu erhalten, trifft dies beim Leistungsmesser keinesfalls zu. Die Stromstärke ist daher stets durch einen Strommesser und die Spannung durch einen Spannungsmesser zu überwachen und nur der ihren Anzeigen entsprechende Meßbereich für Strom

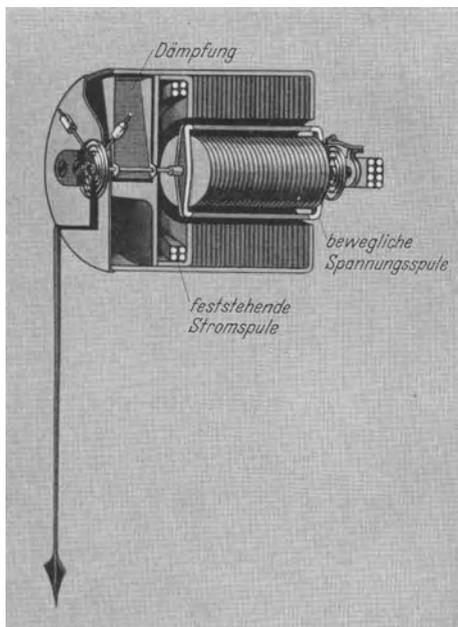


Abb. 192. Aufbau eines eisengeschlossenen elektrodynamischen Gerätes (Leistungsmesser).

und für Spannung am Leistungsmesser anzuschließen. Nur Sondergeräte zur Messung von Leistungen mit sehr kleinem Leistungsfaktor besitzen Endausschlag bei $\cos\varphi = 0,1$ oder $0,3$. Spannung und Strom dürfen aber auch bei ihnen nicht die angegebenen Höchstwerte überschreiten.

Die Stromspule des Leistungsmessers ist meist für 5 A, mitunter umschaltbar auf 2,5 A vorgesehen. Die Nennspannung des Gerätes selbst ist fast immer 30 V bei einem Widerstand des Spannungspfad von 1000Ω . Vorwiderstände von je 1000Ω für weitere 30 V erlauben Messungen bis 600 V. Darüber hinaus werden Spannungswandler benutzt. Die Stromspule wird fast nie unmittelbar in den Stromkreis

gelegt, sondern über Wandler angeschlossen. Die Meßkonstante des normalen Gerätes für Vollausschlag bei $\cos\varphi = 1,0$ berechnet sich zu:

$$C_{\text{Gerät}} = \frac{\text{Nennspannung des Gerätes} \cdot \text{Nennstrom des Gerätes}}{\text{Gesamtskalenteile}} .$$

Unter Nennspannung und Nennstrom sind die Werte zu verstehen, die der benutzten Spannungsklemme und der Schaltung der Stromspule (Reihe oder Parallel) entsprechen. Bei Verwendung von Strom- und Spannungswandlern wird die Meßkonstante bestimmt zu:

$$C = \frac{\text{Nennspannung des Gerätes} \cdot \text{Nennstrom des Gerätes}}{\text{Gesamtskalenteile}}$$

$$\frac{\text{Primärnennstrom des Stromwandlers}}{\text{Sekundärnennstrom des Stromwandlers}}$$

$$\frac{\text{Primärnennspannung des Spannungswandlers}}{\text{Sekundärnennspannung des Spannungswandlers}} .$$

Bei Verwendung eines Gerätes für 150 V und 2,5 A mit 150 Skalenteilen, eines Stromwandlers von 200/5 A und eines Spannungswandlers von 6000/110 V bestimmt sich die Konstante daher zu:

$$C = \frac{150 \cdot 2,5}{150} \cdot \frac{200}{5} \cdot \frac{6000}{110} = 5470 \text{ W je Skalenteil.}$$

Die Leistungsmesser dienen der Messung der Wirkleistung und der Blindleistung in Ein- und Mehrphasennetzen, wobei je nach den vorliegenden Bedingungen eine der nachstehend beschriebenen Schaltungen benutzt werden kann.

Messung der Wirkleistung bei Einphasenstrom. Bei Messung der Leistung in einphasigen Netzen wird der Leistungsmesser nach Abb. 193

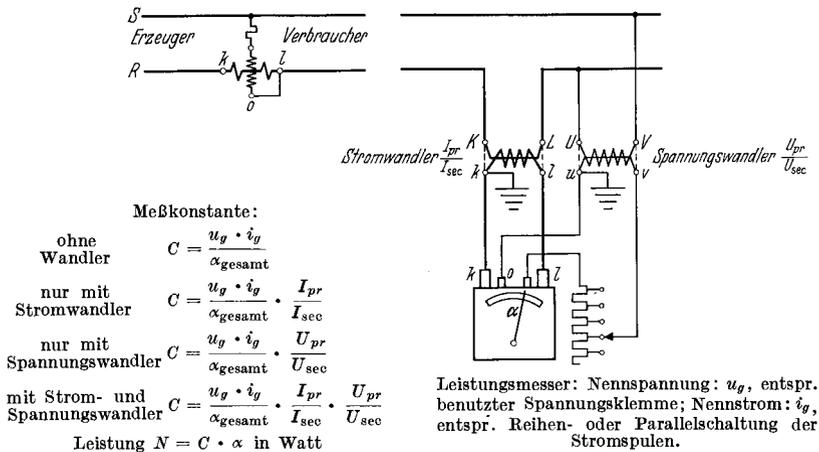


Abb. 193. Leistungsmessung bei Einphasenstrom. (Links das Schema und rechts die Schaltung der Wandler und der Geräte. Die Verbindungen gelten bei Nichtbenutzung des entsprechenden Wandlers. Die Erdung fällt dann fort. Gleiche Bemerkung bei den folgenden Abbildungen.)

geschaltet. Das Gerät zeigt positiven Ausschlag, wenn die Energie in Richtung von K nach L fließt. Schlägt bei umgekehrtem Energiefluß der Zeiger verkehrt aus, so wird die Spannungsspule durch einen eingebauten Umschalter umgepolt. Dasselbe bewirkt die Vertauschung des Anschlusses der Stromzuleitungen, jedoch ist diese Maßnahme nur möglich, wenn der Stromwandler kurzgeschlossen werden kann.

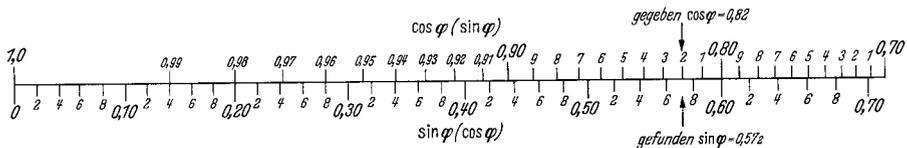


Abb. 194. $\sin \varphi = f(\cos \varphi)$ und umgekehrt. (Beispiel $\cos \varphi = 0,82$; $\sin \varphi = 0,572$.)

Blindleistungsmessung bei Einphasenstrom. Sie kann mit einem Leistungsmesser erfolgen, bei dem durch eine besondere Schaltung des Spannungspfades der darin fließende Strom um 90° gegenüber der

angelegten Spannung geschwenkt wird. Infolge der Verwendung von vorgeschalteten Drosseln ist die Angabe eines solchen Gerätes von der

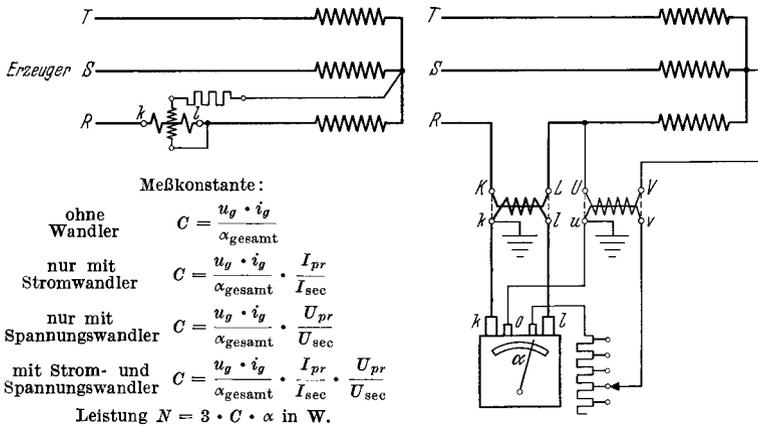
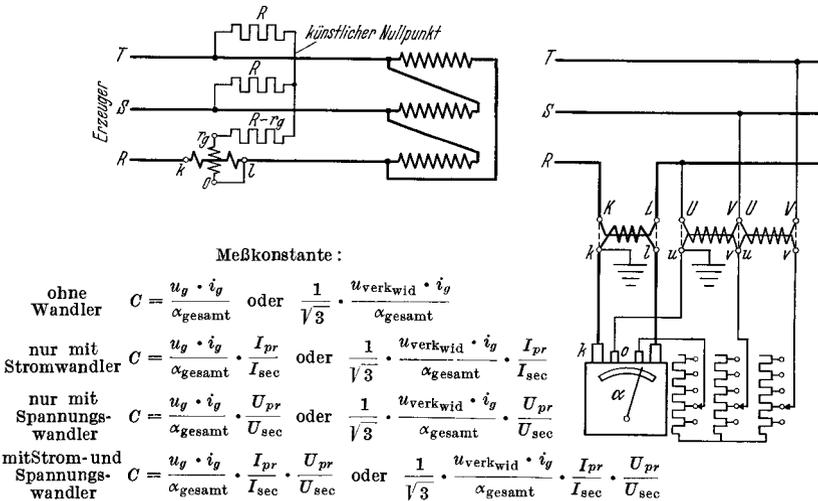


Abb. 195. Leistungsmessung bei Drehstrom gleicher Phasenbelastung mit zugänglichem Nullpunkt.

Frequenz abhängig. Es wird bei der praktischen Maschinenprüfung kaum verwendet. Die Bestimmung der Blindleistung erfolgt meist



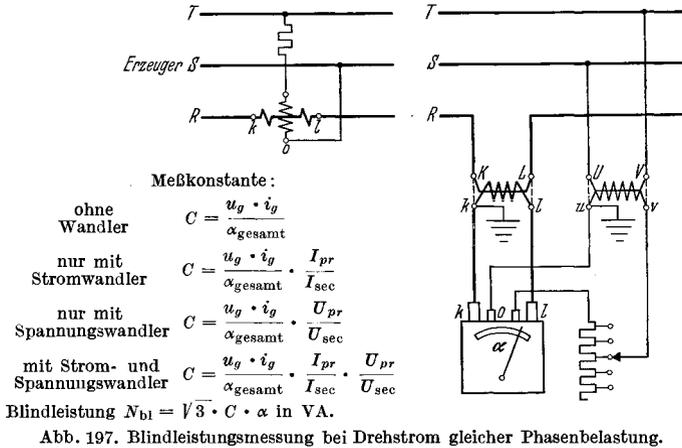
u_g = Nennspannung des Gerätes unter Berücksichtigung des bis zum Sternpunkt vorgeschalteten Widerstandes (meist 1000 Ω je 50 Volt).

$u_{\text{verkwid}} = \sqrt{3} \cdot u_g$ = Nennspannung an den Klemmen des dreiphasigen Widerstandes. Achtung, da dieser Wert manchmal abgerundet angegeben wird; in diesem Fall angegebenen Wert für C benutzen, welcher dann für alle drei Phasen gilt. Leistung $N = 3 \cdot C \cdot \alpha$ in W.

Abb. 196. Leistungsmessung bei Drehstrom gleicher Phasenbelastung mit künstlichem Nullpunkt.

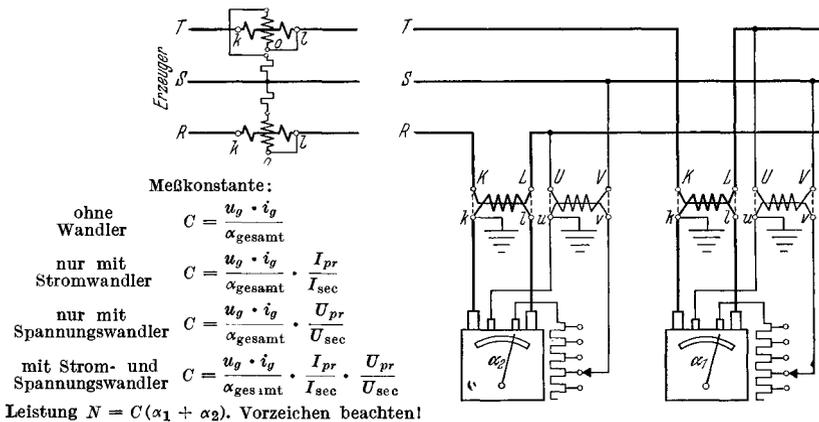
rechnerisch aus dem Produkt Spannung mal Strom mal $\sin \varphi$. Dieser letztere ergibt sich aus dem $\cos \varphi$ zu $\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$ oder ist einer Leiter $\sin \varphi = f(\cos \varphi)$ zu entnehmen (Abb. 194).

Wirkleistungsmessung bei Drehstrom gleicher Phasenbelastung mit zugänglichem Nullpunkt. Diese Meßanordnung benötigt nur ein einziges Meßgerät. Die Gesamtleistung aller drei Phasen wird gleich der drei-



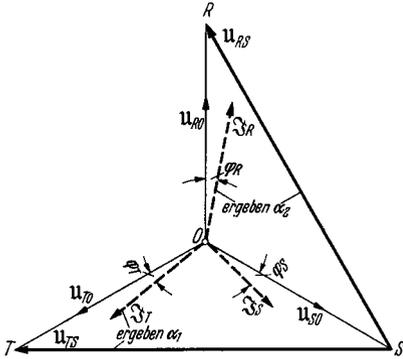
fachen Leistung, die das Gerät anzeigt, gesetzt. Schaltung und Berechnung der Meßkonstanten nach Abb. 195.

Wirkleistungsmessung bei Drehstrom gleicher Phasenbelastung mit künstlichem Nullpunkt. In der Schaltung nach Abb. 196 wird durch



die Sternschaltung dreier Widerstände ein künstlicher Nullpunkt gebildet. Der Wert des Widerstandes, der in Reihe mit der Spannungsspule des Leistungsmessers liegt, ist um den Eigenwiderstand des Spannungspfad es kleiner als der Widerstand in den beiden anderen Phasen zu bemessen. Wiederum ist die Gesamtleistung gleich der dreifachen Angabe des Gerätes. Die Meßkonstante errechnet sich nach Abb. 196, ist aber meist auf dem zugehörigen Nullpunktswiderstand vermerkt.

Blindleistungsmessung bei Drehstrom gleicher Phasenbelastung. Nach Abb. 197 wird die Stromspule vom Strom einer Phase und die Spannungsspule von der verketteten Spannung der beiden anderen Phasen



Drehstromsystem (ohne Nullleiter!) mit ungleicher Phasenbelastung.

Da aber $i_R + i_S + i_T = 0$; also $(-i_R - i_T) = i_S$ ist, folgt: $(u_{RS} \cdot i_R + u_{TS} \cdot i_T) = u_{RO} \cdot i_R + u_{SO} \cdot i_S + u_{TO} \cdot i_T = n$. Es ist also $C(\alpha_1 + \alpha_2) = N$.

Ableitung A. Meßkonstante = C.

Es sind die Augenblickswerte der

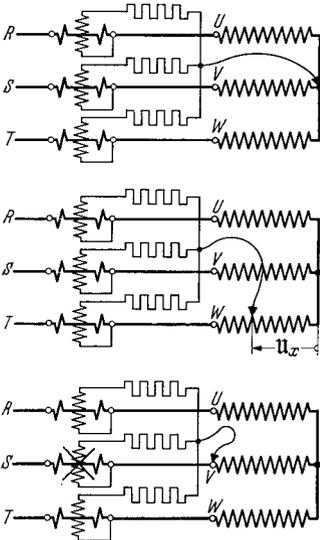
Verketteten Spannungen: u_{RS} u_{ST} u_{TR}
 Phasenspannungen: u_{RO} u_{SO} u_{TO}
 Phasenströme: i_R i_S i_T

wobei $i_R + i_S + i_T = 0$,
 Phasenleistungen: $u_{RO} \cdot i_R$ $u_{SO} \cdot i_S$ $u_{TO} \cdot i_T$,
 deren Summe = dem Augenblickswert n der Gesamtleistung N ist.

Das Gerät in Phase T (Abb. 198) mit Ausschlag α_1 zeigt an den zeitlichen Mittelwert von $(u_{TS} \cdot i_T) \cdot \frac{1}{C}$, das Gerät in Phase R mit Ausschlag α_2 den zeitlichen Mittelwert von $(u_{RS} \cdot i_R) \cdot \frac{1}{C}$. Die Summe $\alpha_1 + \alpha_2$ ist also gleich dem Mittelwert von $(u_{RS} \cdot i_R + u_{TS} \cdot i_T) \cdot \frac{1}{C}$. Durch Zerlegung der verketteten Spannungen u_{RS} und u_{TS} in die entsprechenden Phasenspannungen ergibt sich:

$$(u_{RS} \cdot i_R + u_{TS} \cdot i_T) = (u_{RO} - u_{SO}) i_R + (u_{TO} - u_{SO}) \cdot i_T = u_{RO} \cdot i_R + u_{SO}(-i_R - i_T) + u_{TO} \cdot i_T$$

Ableitung B:



1. 3-Leistungsmesserschaltung; jede Spannungsspule liegt an der zur Stromspule gehörigen Phasenspannung. Leistung = (Anzeige aller 3 Geräte) $\cdot C = (\alpha_R + \alpha_S + \alpha_T) \cdot C$.

2. 3-Leistungsmesserschaltung; jede Spannungsspule liegt an der Summe von der Phasenspannung und einer beliebigen Zusatzspannung U_X . Die einzelnen Anzeigen ändern sich, jedoch bleibt die gesamte Summe erhalten, da U_X mit den drei Strömen i_R, i_S und i_T zusammen keine Leistung geben kann, weil die Stromsumme Null ist.

3. 3-Leistungsmesserschaltung, wo z. B. $U_X = U_{SO}$ gemacht wurde. Wie ersichtlich, liegt Spannungsphase des Leistungsmessers in Phase S an Spannung Null; das Gerät zeigt nichts mehr an, es kann entriert werden. Es entsteht dann die gewünschte 2-Leistungsmesserschaltung. Wie oben ergibt sich Leistung aus der Summe aller Geräteanzeigen zu Leistung = (Anzeige des Gerätes in Phase R) $\cdot C + 0 +$ (Anzeige des Gerätes in Phase T) $\cdot C = (\alpha_R + \alpha_T) \cdot C$. In gleicher Weise kann Anzeige eines der anderen Geräte zu Null gemacht werden.

Die restlichen Geräte kommen immer in die Zweileistungsmesserschaltung nach Abb. 198 und 202 zu liegen.

Abb. 199. Zwei Ableitungen für die Zweileistungsmesserschaltung nach Abb. 198 und 202.

gespeist. Die Angabe des Gerätes ist also eigentlich verhältnismäßig dem Produkt $I \cdot U_{ph} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi$. Um die gesamte dreiphasige Blindleistung zu erhalten, ist daher die Anzeige des Gerätes mit $\sqrt{3}$ malzunehmen bzw. mit einer im Verhältnis $\sqrt{3}/1$ erhöhten Meßkonstanten zu rechnen.

Wirkleistungsmessung bei Drehstrom gleicher oder ungleicher Phasenbelastung mit zwei Leistungsmessern. Abb. 198 gibt die in den weit-aus meisten Fällen verwendete Meßanordnung mit zwei Geräten wieder. Die Stromspulen werden von den Strömen zweier beliebiger Phasen durchflossen und die zugehörigen Spannungsspulen an die eigene und an die dritte Phase gelegt. Die Gesamtleistung der drei Phasen ergibt sich aus der Summe der beiden Ausschläge entsprechend der in Abb. 199 gegebenen Ableitung zu $N = C \cdot (\alpha_1 + \alpha_2)$, wobei das Vorzeichen der Einzelausschläge zu berücksichtigen ist.

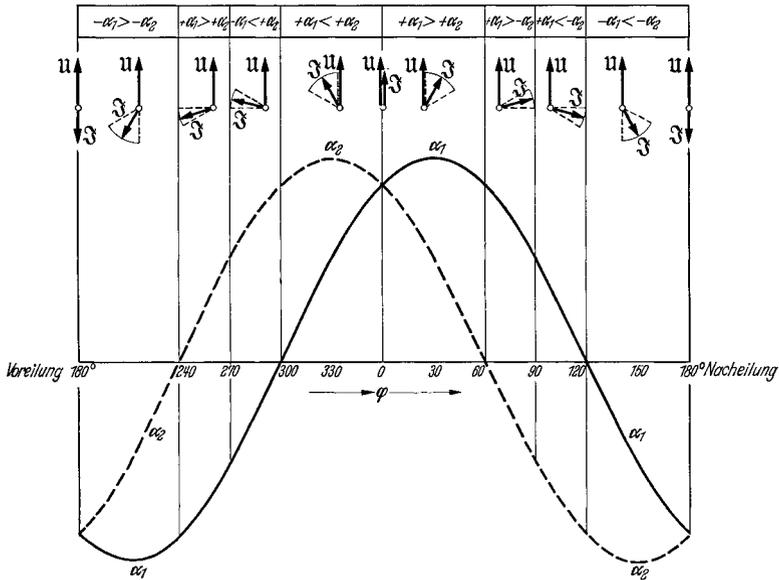


Abb. 200. Abhängigkeit der Leistungsmesserausschläge α_1 und α_2 vom Phasenverschiebungswinkel φ zwischen Phasenspannung u und Strom i bei der Zweileistungsmesserschaltung nach Abb. 198. (Gleiche Phasenbelastung!)

Bei gleicher Belastung aller drei Phasen hängen die Ausschläge α_1 des ersten und α_2 des zweiten Gerätes von dem Winkel φ zwischen Spannung und Strom ab. Abb. 200 gibt diese Veränderlichkeit wieder. Man erkennt, daß α_1 und α_2 alle Werte zwischen dem positiven und negativen Höchstwert annehmen. Umgekehrt kann aus dem Vorzeichen und dem Größenverhältnis des kleineren zum größeren Ausschlag in einfacher Weise auf den Phasenverschiebungswinkel φ bzw. den $\cos\varphi$ geschlossen werden. Abb. 201 stellt den Zusammenhang zwischen Winkel φ , seinem \cos und \sin und dem Verhältnis der Leistungsmesserausschläge dar. Unter α_{klein} ist der jeweils kleinere und unter $\alpha_{\text{groß}}$ der jeweils größere Ausschlag zu verstehen. Welcher „Oktant“ in Frage kommt, hängt davon ab, ob α_1 oder α_2 den größeren Wert hat und welches das beobachtete Vorzeichen von beiden ist. Ein in Abb. 201 angegebenes Beispiel erläutert dieses. Natürlich müssen über die Bezeichnung mit α_1 oder α_2 Vereinbarungen getroffen werden. Abb. 202

gibt die Bezeichnungen wieder, welche den Darstellungen zugrunde liegen. Allgemein ist zu sagen, daß mit α_2 derjenige Leistungsmesserausschlag zu bezeichnen ist, den das in der zeitlich späteren Phase ein-

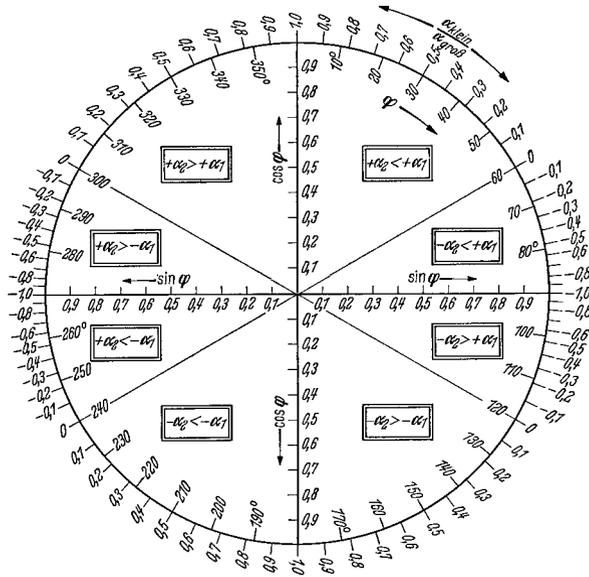


Abb. 201. Zusammenhang zwischen Phasenwinkel φ , Verhältnis der Leistungsmesserausschläge $\alpha_{\text{klein}}/\alpha_{\text{groß}}$, Leistungsfaktor $\cos \varphi$ und Blindleistungsfaktor $\sin \varphi$ bei gleicher Phasenbelastung (Beispiel $\alpha_1 = +88$, $\alpha_2 = +22$; also $+\alpha_2 < +\alpha_1$ und $\alpha_{\text{klein}}/\alpha_{\text{groß}} = +0,25$. Hierzu ergibt sich $\varphi = 46^\circ$, $\cos \varphi = 0,69$, $\sin \varphi = 0,72$).

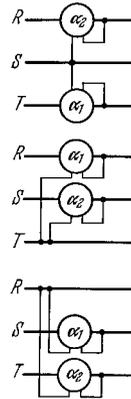


Abb. 202. Bezeichnung der Leistungsmesserausschläge mit α_1 und α_2 bei den drei möglichen Geräteanordnungen in zwei der drei Netzphasen. α_1 ist der Ausschlag in der zeitlich früheren Phase, α_2 der Ausschlag in der zeitlich späteren Phase. Die zeitliche Folge zweier Phasen ist RS , ST und TR .

geschaltete Gerät hat. Bei leer laufenden Asynchronmotoren, bei unbelasteten Transformatoren oder Drosseln, die ihren Magnetisierungsstrom dem Netz entnehmen, ist α_1 der positive und größere, α_2 der negative und kleinere Ausschlag.

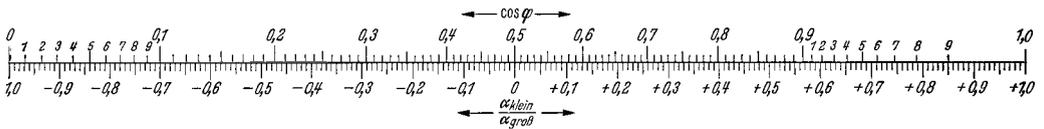


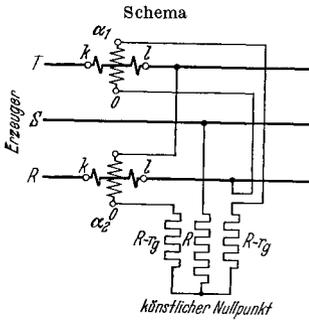
Abb. 203. Zusammenhang zwischen dem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ und dem Verhältnis des kleinen zum großen Leistungsmesserausschlag $\alpha_{\text{klein}}/\alpha_{\text{groß}}$. Das Verhältnis ist positiv, wenn die Ausschläge gleiches Vorzeichen, negativ, wenn sie verschiedenes Vorzeichen haben.

Zur schnellen Ermittlung des $\cos \varphi$ bedient man sich im Prüffeld einer Skala nach Abb. 203, die den Leistungsfaktor auf der einen und das Verhältnis der Leistungsmesserausschläge auf der anderen Seite trägt.

Blindleistungsmessung bei Drehstrom gleicher oder ungleicher Phasenbelastung mit zwei Leistungsmessern. Die Anordnung nach Abb. 204 erlaubt die Messung der Blindleistung auch bei ungleich belasteten Phasen. Sie wird in der Praxis der Maschinenprüfung kaum angewendet,

da dort immer mit nahezu gleicher Belastung der Phasen zu rechnen ist. Bei Messungen außerhalb findet sie Anwendung. Durch einen geeigneten Mehrfachwiderstand in Verbindung mit einem Umschalter kann die Schaltung durch Umlegen desselben schnell aus der Zweileistungsmesserschaltung gebildet werden. Die Meßkonstante ist auf diesen kombinierten Widerständen angegeben oder wird nach den Angaben der Abb. 204 berechnet. Im Prüffeld berechnet man die Blindleistung wie bei den Einphasenmessungen mit Hilfe des aus dem $\cos\varphi$ bestimmten $\sin\varphi$. Es gilt:

$$N_{\text{blind}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{verk}} \cdot I \cdot \sin\varphi \quad \text{mit} \quad \sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}.$$



	Meßkonstante:
ohne Wandler	$C = \sqrt{3} \cdot \frac{u_g \cdot i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}}$
	oder $= \frac{u_{\text{verkwid}} \cdot i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}}$
nur mit Stromwandler	$C = \sqrt{3} \cdot \frac{u_g \cdot i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sec}}$
	oder $= \frac{u_{\text{verkwid}} \cdot i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sec}}$
nur mit Spannungswandler	$C = \sqrt{3} \cdot \frac{u_g \cdot i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sec}}$
	oder $= \frac{u_{\text{verkwid}} \cdot i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sec}}$

mit Strom- und Spannungswandler $C = \sqrt{3} \cdot \frac{u_g \cdot i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sec}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sec}}$ oder $= \frac{u_{\text{verkwid}} \cdot i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sec}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sec}}$

Blindleistung $N_{bl} = C (\alpha_1 + \alpha_2)$ in VA. Vorzeichen beachten!

Bezeichnungen wie in Abb. 193, insbesondere bedeutet u_g = Nennspannung des Leistungsmessers unter Berücksichtigung des bis zum Nullpunkt vorgeschalteten Widerstandes, und u_{verkwid} = verkettete Nennspannung an den benutzten Widerstandsklemmen, also $u_{\text{verkwid}} = u_g \cdot \sqrt{3}$.

Abb. 204. Blindleistungsmessung bei Drehstrom beliebiger Phasenbelastung mit zwei Leistungsmessern.

Behelfsmäßige Leistungsmessung bei Drehstrom mit einem Leistungsmesser. Oft findet man bei Hochspannungsmaschinen an Ort und Stelle nur einen einzigen Stromwandler und einen einphasigen Spannungswandler vor, der entweder an die beiden anderen Phasen oder an die Stromwandlerphase und eine der beiden anderen Phasen angeschlossen ist. In diesen Fällen kann man ebenfalls Leistungsmessungen durchführen, wozu die Anleitung in Abb. 205 und 206 gegeben ist.

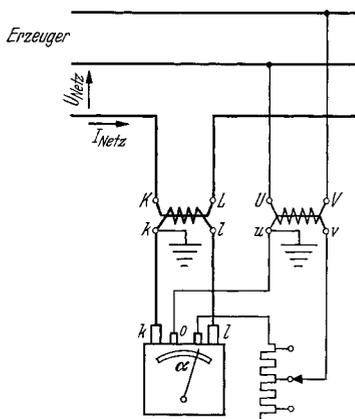
d) Leistungsfaktormesser.

Im Prüffeld erfolgt die Bestimmung des Leistungsfaktors fast ausschließlich aus dem Verhältnis Wirkleistung/Scheinleistung und bei Drehstrommessungen zusätzlich aus dem Verhältnis der Leistungsmesserausschläge $\alpha_{\text{klein}}/\alpha_{\text{groß}}$ in Zweileistungsmesserschaltung mit Hilfe einer entsprechenden Skala (Abb. 203).

Im Betriebe bevorzugt man die Verwendung unmittelbar anzeigender Meßgeräte, welche bei Einphasenstrom den Leistungsfaktor des Netzes

und bei Drehstrom den Leistungsfaktor einer Phase anzeigen. Bei gleicher Phasenbelastung stimmt letzterer mit dem Leistungsfaktor der beiden anderen Phasen überein.

Zur Anwendung kommen Geräte, welche als Kreuzspul- oder Kreuz-eiseninstrumente gebaut sind und eisenlos oder eisengeschlossen ausgeführt werden. Zwei gegeneinander versetzte Spannungsspulen bilden mit einer Stromspule entgegenwirkende Drehmomente, deren Größe vom Verstellwinkel abhängig ist. Da keinerlei rückführende Feder-



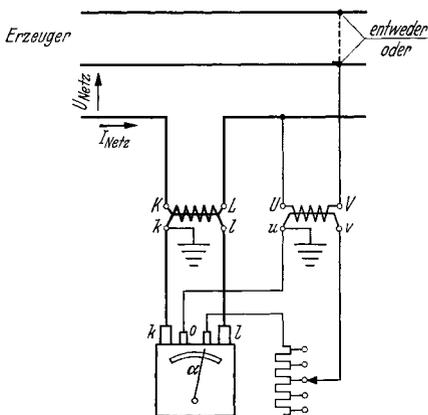
Meßkonstante:

$$C = \frac{u_g \cdot i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sec}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sec}}$$

Gesamtleistung }
$$N = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Netz}} \cdot I_{\text{Netz}} \cdot \cos \varphi,$$

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{C \cdot \alpha}{U_{\text{Netz}} \cdot I_{\text{Netz}}} \right)^2} \text{ in W.}$$

Abb. 205. Behelfsmäßige Leistungsmessung in Hochspannungsnetzen mit einem Stromwandler und einem Spannungswandler, der nicht an die Stromwandlerphase angeschlossen ist.



Meßkonstante:
$$C = \frac{u_g \cdot i_g}{\alpha_{\text{gesamt}}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sec}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sec}}$$

Gesamtleistung

$$N = 1,5 \cdot C \cdot \alpha \left[1 \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{U_{\text{Netz}} \cdot I_{\text{Netz}}}{C \cdot \alpha} \right)^2 - 1} \right] \text{ in W.}$$

Es ist der Absolutwert zu nehmen; über das Vorzeichen des zweiten Gliedes entscheidet meist die Größe von I_{Netz} , bzw. die Größe des mutmaßlichen $\cos \varphi$, die zu der höheren oder tieferen Leistung gehören.
 Abb. 206. Behelfsmäßige Leistungsmessung in Hochspannungsnetzen mit einem Stromwandler und einem Spannungswandler, der mit einer Klemme an der Stromwandlerphase liegt.

kräfte vorhanden sind, stellt sich das drehbare Organ in diejenige Winkelstellung ein, in welcher die beiden einander entgegenwirkenden Momente sich das Gleichgewicht halten. Entweder ist die Stromspule fest und die beiden Spannungsspulen beweglich (Kreuzspulgerät) oder die Stromspule dreht sich in einem vierpoligen Eisenkörper, der von den Spannungsspulen erregt wird (Kreuzeisengerät).

Allen $\cos \varphi$ -Messern ist eigentümlich, daß sie keine eigentliche Nullstellung besitzen, in welcher der Zeiger des nichtangeschlossenen Gerätes zurückkehrt. Ihre Meßgenauigkeit liegt etwa bei 1 bis 2 Winkelgraden und sinkt mit fallender Stromstärke. Die Abhängigkeit von der Frequenz ist bei allen Geräten, welche mit Vorschaltdrosseln arbeiten, groß, dagegen ist der Einfluß der zugeführten Spannung wesentlich geringer.

Die Skala ist in $\cos \varphi$ eingeteilt; auf einer zweiten Skala findet sich gelegentlich auch der Winkel φ angegeben. Geräte in Anlagen, bei denen neben Leistungsbezug auch Rückgabe erfolgt, erhalten eine

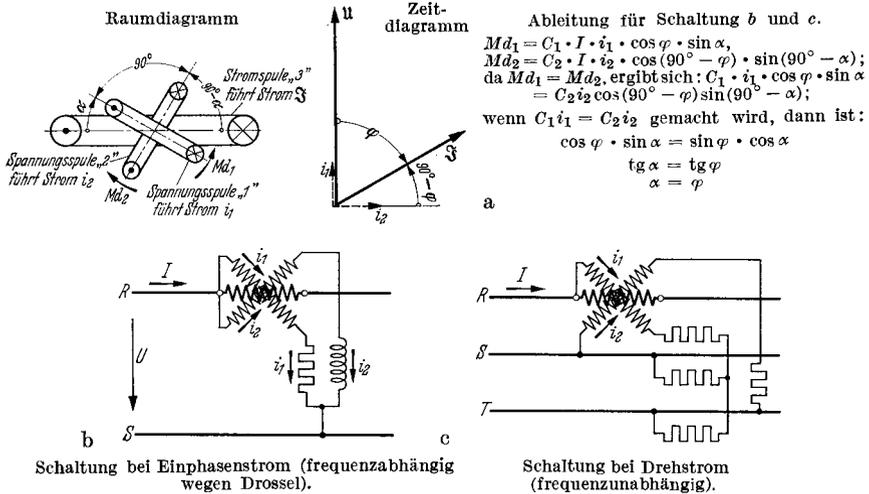


Abb. 207. Kreuzspulgerät zur $\cos \varphi$ -Messung bei Ein- und Dreiphasenstrom (Ströme in Spannungsspulen sind um 90° gegeneinander phasenverschoben.)

360° -Skala, auf der in jedem Viertel eine Unterteilung von $\cos \varphi = 0$ bis 1,0 vorhanden ist. Der Zustand der Über- und Untererregung, des Leistungsbezuges oder der Abgabe ist aus der Stellung des Zeigers innerhalb der einzelnen Viertel zu erkennen.

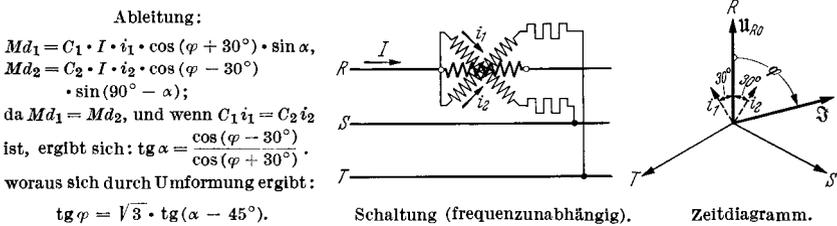


Abb. 208. Kreuzspulgerät zur $\cos \varphi$ -Messung bei Drehstrom. (Ströme in den Spannungsspulen sind um 60° gegeneinander phasenverschoben.)

Außer zur Anzeige werden Leistungsfaktormesser oft zur Registrierung benutzt.

Messungen im Einphasennetz. Kreuzspulgerät: Nach Abb. 207 a, b durchfließt der Netzstrom I die feststehende Stromspule 3, während die beiden Spannungsspulen am Netz liegen. Durch Verwendung von vorgeschalteten Drosseln und Widerständen wird erreicht, daß die Spule 1 einen der Spannung verhältnis- und phasengleichen Strom i_1 führt und die Spule 2 einen ebenfalls verhältnisgleichen, aber um 90° nachteilenden Strom i_2 aufnimmt. Beide Spannungsspulen sind um 90° räumlich gegen-

einander versetzt und drehbar angeordnet. Die Ableitung ergibt $\operatorname{tg} \alpha = C \cdot \operatorname{tg} \varphi$, d. h. also, daß der Zeigerverstellwinkel eine Funktion des Phasenwinkels ist.

Je nach Wahl des konstanten Beiwertes C kann eine mehr oder weniger gestreckte Skala erhalten werden. Für $C = 1$ wird $\alpha = \varphi$. Das Gerät besitzt eine starke Frequenzabhängigkeit.

Messungen im Drehstromnetz. Kreuzspulgerät: Abb. 207c und 208 geben die Schaltung und die Ableitung des Kreuzspulgerätes für Dreh-

strom wieder. Die Spannungsspulen liegen über Ohmsche Vorwiderstände an den verketteten Spannungen und führen Ströme i_1 und i_2 die um 60 oder um 90° gegeneinander phasenverschoben sind. Besondere Drosseln entfallen, wodurch die Frequenzabhängigkeit des Gerätes stark verringert wird. Abb. 209 zeigt den Aufbau eines Kreuzspulgerätes.

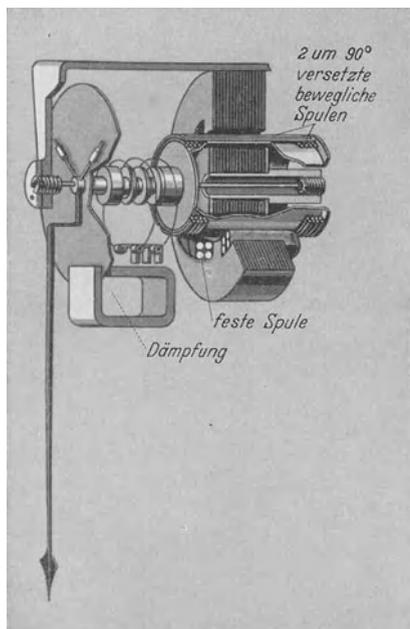


Abb. 209. Aufbau eines Kreuzspulgerätes.

e) Frequenzmesser.

Bei Benutzung eines Netzes, welches an die großen Kraftverordnungen angeschlossen ist, erübrigt sich meist die Messung der Frequenz, da diese mit einer Genauigkeit von 0,1 bis 0,2% gehalten wird. Fährt man dagegen von Prüffeldumformern mit Gleichstrommotorantrieb aus, so ist es üblich, parallel zum Spannungsmesser auch einen Frequenzmesser anzuschließen, der die Einhaltung der gewünschten Fre-

quenz bequemer und auch genauer abzulesen gestattet, als dies mit einem der üblichen Drehzahlmesser möglich ist. Im Prüffeld kommt vorzugsweise der Zungenfrequenzmesser zur Verwendung, dessen meist großer Meßbereich eine allgemeine Anwendung des Gerätes ermöglicht. In festen Anlagen kommen daneben häufig Induktions- und Kreuzspul- bzw. Kreuzeisengeräte zum Einbau, deren Bereich nur wenig über und unter die zu haltende Nennfrequenz hinausgeht und deren Ablesegenauigkeit infolgedessen wesentlich größer ist.

Zungenfrequenzmesser. Der Zungenfrequenzmesser beruht auf dem Resonanzprinzip. Ein vom Netz aus erregter Magnet wirkt entweder unmittelbar (HARTMANN-KEMPF) oder — über die sie tragende Leiste — mittelbar (FRAHM) auf eine Reihe von einseitig eingespannten Stahlblatfedern ein. Die Federn besitzen von 0,5 zu 0,5 Hz steigende Eigenschwingungszahlen, und es kommt bei Erregung des Magneten jene Feder

in starke Schwingungen, deren Eigenschwingungszahl mit der doppelten Netzfrequenz übereinstimmt. Bei Benutzung eines polarisierten Magneten, die durch wahlweise Umschaltung meist möglich ist, schwingt die Feder, die in Resonanz mit der Netzfrequenz selbst steht. Die Ablesung erfolgt, wenn eine Feder allein sehr stark schwingt, auf der darüberstehenden Skala. Wenn zwei Federn gleichmäßig stark schwingen, schätzt man die Frequenz als Mittelwert aus den den beiden

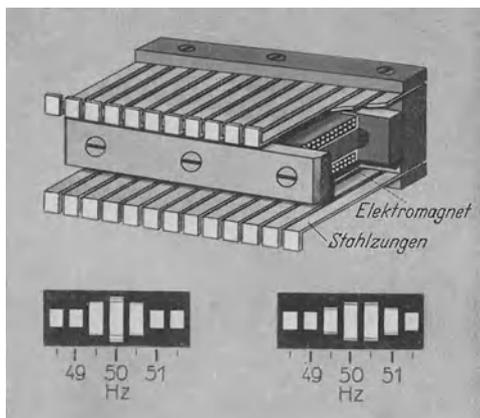


Abb. 210. Aufbau eines Zungenfrequenzmessers.
(Angabe links = 50 Hz, Angabe rechts = 50,25 Hz.)

zugehörigen Frequenzen. Unter 0,25 Hz kann die Ablesegenauigkeit kaum getrieben werden. Eingebaute Vorwiderstände gestatten den Anschluß an verschiedene Spannungen. Die Anzeigegenauigkeit ändert sich weder bei Spannungs- noch bei Temperaturschwankungen. Mit der Zeit tritt unter Umständen eine geringe Veränderung der Eigenschwingungszahl der Federn auf, die durch zeitweiliges Nachprüfen zu überwachen ist. Abb. 210 zeigt eine übliche Ausführung nach HARTMANN-KEMPF (Schnitt und Skala).

Induktionsfrequenzmesser. Auf eine exzentrisch gelagerte Aluminiumscheibe wirken im entgegengesetzten Sinne zwei Triebkerne, deren Wicklungen über einen Ohmschen Widerstand bzw. einen Schwingungskreis an der Netzspannung liegen. Der Strom im zweiten Kern ist in starkem Maße von der Frequenz abhängig. Die Drehmomente ändern sich mit der Stellung der Scheibe, welche sich so einstellt, daß beide einander das Gleichgewicht halten. Gegenkräfte sind nicht vorhanden. Eine Dämpfung sorgt für schwingungsfreie Einstellung des Zeigers. Die Anzeige ist in den Spannungsgrenzen $\pm 20\%$ von deren Schwankungen nahezu unabhängig. Abb. 211 zeigt die Ausführung eines solchen Gerätes.

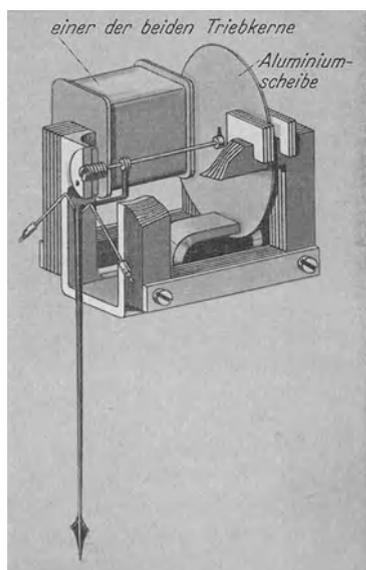
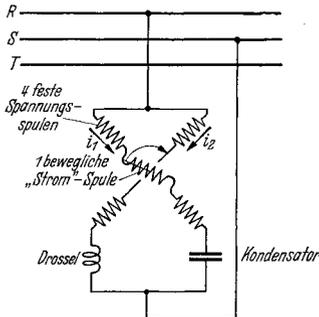


Abb. 211. Aufbau eines Induktionsfrequenzmessers.

Kreuzisenfrequenzmesser. Abb. 212 zeigt die Schaltung des Kreuzisenengerätes, das in seinem Aufbau dem Leistungsfaktormesser gleicht. Der Strom i_1 in dem einen Zweig durchfließt die Spulen auf zwei Polen des Kreuzisens und die bewegliche Spule. Er wächst mit steigender Frequenz wegen des vorgeschalteten Kondensators an. Der Strom i_2 im anderen Zweig durchfließt die beiden anderen Spulen und fällt mit steigender Frequenz wegen der vorgeschalteten Drosselspule ab. Die Anzeige des Gerätes steht in Abhängigkeit vom Verhältnis beider Ströme und entspricht somit der Frequenz, während sie von Schwankungen der Spannung in gewissen Grenzen unabhängig ist. Rückführende Federkräfte fehlen.



Ableitung:

$$M d_1 = C_1 \cdot i_1 \cdot i_1 \cdot \cos \alpha, \quad i_1 = U \cdot 2\pi f \cdot C, \quad \alpha = \angle \text{zwischen}$$

$$M d_2 = C_2 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \sin \alpha, \quad i_2 = \frac{U}{2\pi f \cdot L},$$

da $M d_1 = M d_2$, wird

$$C_1 \cdot U \cdot 2\pi f \cdot C \cdot \cos \alpha = C_2 \cdot \frac{U}{2\pi f \cdot L} \cdot \sin \alpha, \text{ und wenn } C_1 = C_2$$

$$\text{wird,} \quad \text{tg } \alpha = (2\pi)^2 \cdot L \cdot C \cdot f^2 = C_3 \cdot f^2.$$

Abb. 212. Kreuzisen-Frequenzmesser für Ein- oder Dreiphasenstrom.

f) Die Messung von Ohmschen Widerständen.

Die Messungen Ohmscher Widerstände erfolgt in der Praxis vornehmlich nach drei verschiedenen Verfahren. Das Strom-Spannungsverfahren wird für Widerstände unter $1/1000 \Omega$ bevorzugt, aber auch bis zu Werten von einigen 100Ω angewendet. Die Thomsonbrücke dient für den Meßbereich von $1/1000 \Omega$ aufwärts bis zu etwa 10Ω und die Wheatstonebrücke, welche baulich gelegentlich mit der Thomsonbrücke vereinigt ist, der Messung der Werte ab $1,0$ bis zu 1000Ω .

Strom-Spannungsverfahren. Bei diesem Verfahren wird ein Gleichstrom in der Größe von 1 bis 75 A durch den zu messenden Widerstand geschickt und der an diesem auftretende Spannungsabfall mit einem Spannungsmesser gemessen. Eine Korrektur mit Rücksicht auf den Eigenverbrauch des Spannungsmessers ist in der Schaltung nach Abb. 213 meist nicht erforderlich, da die Stromaufnahme des Gerätes (Millivoltmeter mit Vorschaltwiderständen) nur etwa 30 mA bei Endauschlag beträgt. Die Abbildung zeigt eine Meßeinrichtung, welche den praktischen Bedürfnissen besonders gut angepaßt ist. Der Meßstrom wird einem besonderen Maschinensatz entnommen und über Regelwiderstände mittels Strommeßbleinen zum Widerstand geführt. Der Spannungsabfall wird über getrennte Spannungsmessbleinen abgegriffen und am Spannungsmesser abgelesen. Ein Umschalter erlaubt die wahlweise Einschaltung der verschiedenen Nebenwiderstände für Werte zwischen $3,0$ und 75 A und ein zweiter Umschalter die wahlweise Vorschaltung verschiedener Vorwiderstände vor den Spannungsmesser für Meßbereiche zwischen $0,150$ und 150 V . Die Meßstromstärke läßt sich

mittels des Regelwiderstandes W zwischen 0 und 75 A einstellen. Die Messung der fast immer mit hoher Induktivität behafteten Maschinenwicklungen verlangt einige besondere Vorsichtsmaßnahmen. Die Strommeßleinen dürfen nur in fast stromlosem Zustand aufgelegt und vor allen Dingen wieder getrennt werden, da andernfalls der entstehende Lichtbogen zu einer Blendung und Gefährdung des Bedienenden führen kann. Zu diesem Zwecke ist eine Handlampe b vorgesehen, welche nur

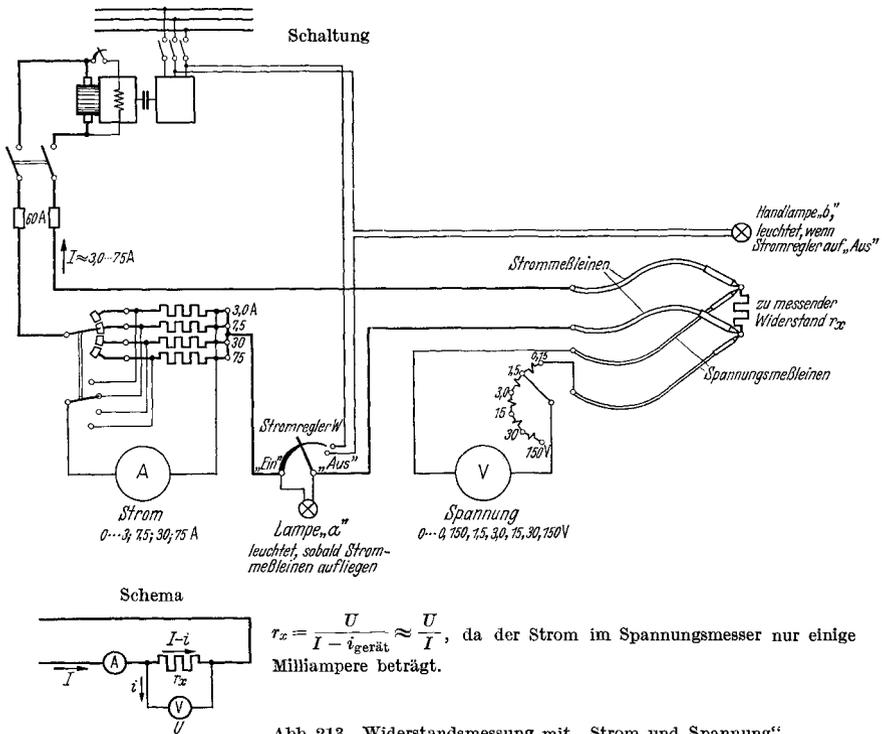
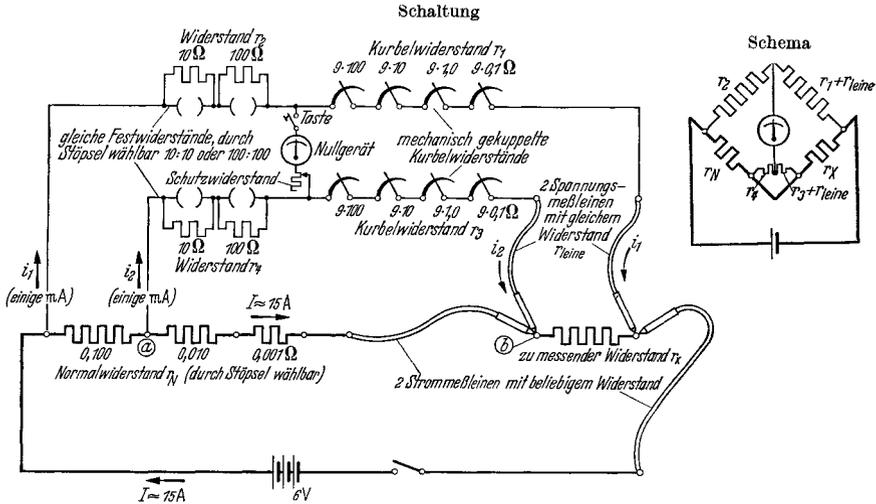


Abb. 213. Widerstandsmessung mit „Strom und Spannung“.

in Nullstellung des Stromregelwiderstandes aufleuchtet und das Zeichen für das Auflegen der Meßleinen gibt. Sobald diese auf den Klemmen des Widerstandes aufliegen, wird über denselben der Stromkreis einer Lampe a am Meßtisch geschlossen, deren Aufleuchten das Zeichen gibt, daß nunmehr der starke Meßstrom durch den Meßkreis geschickt werden darf. Die Handlampe b erlischt, sobald der Regelwiderstand W betätigt wird und zeigt dann an, daß die Meßleinen nicht mehr abgehoben werden dürfen. Sobald Strom und Spannung abgelesen worden sind, wird der Stromregler W in die Nullstellung zurückgeführt und der Meßstrom hierdurch unterbrochen. Im gleichen Augenblick leuchtet die Handlampe b an der Meßstelle wieder auf und zeigt an, daß die Messung beendet ist und die Leinen abgehoben werden können. Es ist zu beachten, daß der Meßstrom keinesfalls von der Größenordnung des

Nennstromes der zu messenden Wicklung sein darf, da sonst eine unzulässige Erwärmung während des Messens auftreten würde. Angemessen ist ein Meßstrom von 0,1 bis 0,25 des Nennstromes bei nicht zu langer Dauer der Messung.

Thomsonbrücke. Die Thomsonbrücke wird am häufigsten angewendet, da die meisten Wicklungswiderstände im Bereich von 1,000 bis 0,001 Ω liegen. Abb. 214 gibt eine Schaltung für den praktischen Gebrauch wieder. Der einem Akkumulator von 6 V entnommene Meßstrom durchfließt die in Reihe geschalteten Normalwiderstände r_N



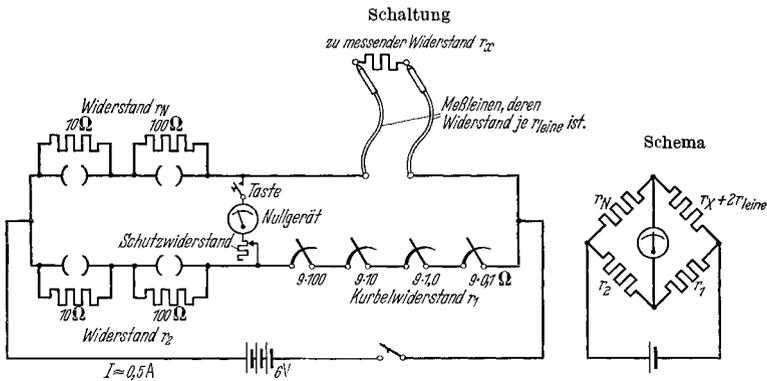
$$r_X = r_N \cdot \frac{r_1 + r_{1eine}}{r_2}, \text{ wenn } \frac{r_1 + r_{1eine}}{r_3 + r_{1eine}} = \frac{r_2}{r_4} \text{ gemacht wird. Dies geschieht durch Gleichheit der Widerstände } r_1 \text{ und } r_3, \text{ sowie } r_2 \text{ und } r_4.$$

Abb. 214. Thomsonbrücke. Praktischer Meßbereich $r_X = 0,001 - 10,0 \Omega$.

von 0,1, 0,01 und 0,001 Ω und wird über zwei Strommeßleinen dem zu messenden Widerstand r_X zugeführt. Der Spannungsabfall an einem der eingebauten Normalwiderstände (durch Stöpsel zu wählen) und am zu messenden Widerstand (über besondere Spannungsmeßleinen abgegriffen) wird der eigentlichen Brücke zugeführt, die aus zwei völlig gleich aufgebauten Ästen besteht. Diese setzen sich aus zwei völlig gleich aufgebauten Ästen zusammen. Diese setzen sich aus zwei Festwiderständen r_2 und r_4 von je 10 plus 100 Ω und den vierkurbeligen Einstellwiderständen r_1 und r_3 zusammen. Mit den Bezeichnungen der Abb. 214 ergibt sich $r_X = r_N \cdot \frac{r_1 + r_{1eine}}{r_2}$, wenn $\frac{r_1 + r_{1eine}}{r_3 + r_{1eine}} = \frac{r_2}{r_4}$ gemacht wird. r_1 ist wegen der Kupplung der Kurbeln immer gleich r_3 , während r_2 durch Ziehen des entsprechenden Stöpsels gleich r_4 zu machen ist. r_{1eine} ist der meistens zu vernachlässigende Widerstand einer Spannungsmeßleine.

Bei der wiedergegebenen Brücke entstehen vier Meßbereiche. Die Korrektur, die praktisch nur selten vorgenommen wird, besteht also

darin, daß dem Widerstandwert r_1 des Kurbelwiderstandes in obiger Formel noch der Widerstand einer Spannungsmeßleine zuzufügen ist. Da der Kurbelwiderstand zwischen 100 und 999,9 Ω liegt und der Widerstand einer Spannungsmeßleine nur etwa 0,1 Ω ausmacht, ist die Korrektur sehr klein. Die Meßstromstärke beträgt zwischen 1,0 und 20,0 A. Die Brücke wird durch Beobachtung des Nullgerätes abgeglichen, dem ein hochohmiger Stufenwiderstand zum Schutze gegen Überlastung bei noch nicht oder nur grob abgeglichener Brücke vorgeschaltet ist. Dieser Widerstand wird in gleichem Maße, wie die feinere Abstimmung fortschreitet, abgeschaltet. Erst bei nahezu vollkommener Abstimmung wird mit dem Nullgerät allein gearbeitet. Abheben der Meßleinen während des Abstimmens gefährdet das Nullgerät und darf daher nur nach Öffnen des Querzweiges, in welchem das Gerät liegt, auf besonderes Zeichen (Glocke) hin erfolgen.



$$r_X = r_N \cdot \frac{r_1}{r_2} - 2r_{leine} \quad \frac{r_N}{r_2} \text{ kann durch Stöpseln gebracht werden auf } \frac{100}{10}, \frac{100}{100} \text{ und } \frac{10}{100}, r_1 \text{ ist durch Kurbeln einstellbar zwischen } 0,1 \text{ und } 999,9 \Omega.$$

Abb. 215. Wheatstone-Brücke. Praktischer Meßbereich $r_X = 10 \dots 9999 \Omega$.

Wheatstonebrücke. Die Wheatstonebrücke ist in Abb. 215 dargestellt. In bekannter Weise ergibt sich bei ihr der unbekannte Widerstand zu:

$$r_X = r_N \cdot \frac{r_1}{r_2} - 2r_{leine}.$$

Durch Verändern des Wertes r_N von 10 auf 100 Ω und des Wertes r_2 von 10 auf 100 Ω ergeben sich drei verschiedene Meßbereiche von 10 bis 9999 Ω . Die Korrektur ist konstant und besteht im Widerstand der beiden Meßleinen. Das Nullgerät kann wie bei der Thomsonbrücke durch Abheben der Meßleinen während der Messung beschädigt werden, weshalb diese auch hier nur nach besonderem Signal vom Widerstand getrennt werden dürfen.

Da der Meßstrom nur Werte bis etwa 0,5 A annimmt, ist im übrigen ein Abheben unter Strom für die Bedienenden nicht gefährlich, sollte aber doch vermieden werden. Immer zu empfehlen ist eine gute Beleuchtung der Meßstellen, die das richtige Aufsetzen und Anhalten der

Meßkleinen wesentlich erleichtert. Alle Meßeinrichtungen zu Widerstandsbestimmungen sollen von Zeit zu Zeit mittels eines Normalwiderstandes nachgeprüft werden.

g) Messung des induktiven Widerstandes und der Induktivität.

Der induktive Widerstand und die Induktivität stehen in dem von der Frequenz abhängigen Verhältnis:

$$\text{Induktiver Widerstand} = 2\pi \cdot \text{Frequenz} \cdot \text{Induktivität}$$

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L,$$

wobei der Widerstand in Ohm, die Frequenz in Hertz und die Induktivität in Henry einzusetzen sind. Die Messung des Widerstandes erfolgt mit Strom und Spannung bei bekannter Frequenz. Diese Bestimmung reicht für die Erfordernisse der Maschinenprüfung aus. Die genauere Bestimmung mit Brücken wird bei Maschinenprüfungen nur selten durchgeführt.

Die Messung erfolgt bei verschiedenen, steigenden Werten der Spannung. Abgelesen werden Strom, Spannung und Leistung. Da meist der Leistungsfaktor sehr klein ist, muß entweder ein Leistungsmesser mit Endausschlag bei $\cos\varphi = 0,1 \dots 0,3$ benutzt oder auf die Genauigkeit der Verlustmessung verzichtet werden. Das Ergebnis wird praktisch hierdurch nicht beeinflußt.

Der induktive Widerstand berechnet sich zu:

$$X_L = \frac{U}{I} \cdot \sin\varphi,$$

wobei U die angelegte Klemmenspannung, I der aufgenommene Strom, $\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$ bedeuten.

Infolge der Kleinheit von $\cos\varphi$ kann in den meisten Fällen in guter Annäherung gesetzt werden:

$$X_L \approx \frac{U}{I} \quad \text{und} \quad L \approx \frac{U}{I} \cdot \frac{1}{2\pi f}.$$

Der Wert von X_L und von L hängt in bekannter Weise vom Sättigungszustand des Eisens ab und ist daher bei eisenhaltigen Induktivitäten (sämtliche Maschinenwicklungen) in Abhängigkeit von der Spannung oder besser vom aufgenommenen Strom zu ermitteln und in Kurvenform aufzutragen. Induktiver Widerstand und Induktivität sind bei kleinen Strömen am größten und fallen mit zunehmender Stromstärke stark ab.

Wenn der Fluß $\Phi = f(I)$ bekannt ist, kann man die Induktivität und den induktiven Widerstand errechnen zu:

$$\text{(bei Gleichstrom)} \quad L = \Phi \cdot \frac{w}{100I} \quad \text{und} \quad X_L = 2\pi \cdot f \cdot \Phi \cdot \frac{w}{100I},$$

$$\text{(bei Wechselstrom)} \quad L = \frac{\Phi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{w}{100I} \quad \text{und} \quad X_L = 2\pi \cdot f \cdot \frac{\Phi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{w}{100I}.$$

Der Zusammenhang $\Phi = f(I)$ kann in vielen Fällen aus der Sättigungskurve gewonnen werden, indem man mit Hilfe der entsprechenden

Spannungsformeln den Fluß aus der EMK errechnet. Der Unterschied obiger Formeln für Gleichstrom und Wechselstrom ist nur ein scheinbarer. In beiden Fällen ist mit Φ wie üblich der Höchstwert des Flusses bezeichnet, aber I bedeutet bei Wechselstrom nicht den zugehörigen Höchstwert des Stromes, sondern den um $1/\sqrt{2}$ kleineren Effektivwert. Für den Strom ist daher bei Wechselstrom der Wert $\sqrt{2} \cdot I$ zu setzen. Der Fluß Φ ist — wie in den übrigen Formeln — in 10^6 Maxwell einzusetzen.

h) Der kapazitive Widerstand und die Kapazität.

Beide stehen in folgendem Zusammenhang:

$$\text{Kapazitiver Widerstand} = \frac{1}{2\pi \cdot \text{Frequenz} \cdot \text{Kapazität}},$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C},$$

wobei X_C in Ohm, f in Hertz und C in Farad einzusetzen sind.

Die Bestimmung, die praktisch selten vorgenommen wird, erfolgt als einmalige Messung mit Strom und Spannung, aus welcher sich ergibt:

$$X_C = \frac{U}{I} \quad \text{und} \quad C = \frac{I}{2\pi \cdot f \cdot U},$$

wobei die sehr kleinen Verluste vernachlässigt werden.

Oft ist die Leistung des Kondensators bei gegebener Spannung bekannt. Dann errechnet sich Widerstand und Kapazität zu:

$$X_C = \frac{U^2}{N}, \quad C = \frac{N}{2\pi f \cdot U^2}.$$

Bei Drehstromkondensatoren ist für $N^{1/3}$ der Gesamtleistung und für U bei Sternschaltung $U_{\text{netz}}/\sqrt{3}$ und bei Dreieckschaltung U_{netz} einzusetzen. N muß in Watt eingesetzt werden.

B. Die Messung der mechanischen Größen.

Die Messung der Drehzahl. Sie erfolgt bei der Maschinenprüfung meistens mit einem sog. Tachometer, welches entweder nach dem Drehpendel- oder nach dem Wirbelstromprinzip arbeitet. Die Meßgenauigkeit liegt etwa bei 0,5 bis 1%. Genauere Messungen, wie sie insbesondere bei der Bestimmung des Wirkungsgrades aus Drehzahl und Drehmoment benötigt werden, sind möglich mit Umlaufzählern in Verbindung mit Stoppuhren. Sie setzen gleichbleibende Drehzahl innerhalb der meist nur wenige Sekunden betragenden Meßzeit voraus. Tiefe Drehzahlen werden am besten über eine genau bekannte Übersetzung ins Schnelle auf den Drehzahlmesser übertragen. Häufig baut man bei Langsamläufern eine kleine „Tourendynamo“ an, deren fremderregte Spannung sehr genau mit Hilfe eines Drehspulspannungsmessers abgelesen und nach Eichung eines Punktes in Drehzahl umgerechnet werden kann. Bei Auslaufversuchen ist dieses Verfahren bequem und zuverlässig.

Maschinen, die ihre Drehzahl nur in mäßigen Grenzen ändern oder mit gleichbleibender Geschwindigkeit laufen sollen (Prüffeldumformer), erhalten einen kleinen Frequenzgeber, der auf einen Frequenzmesser geschaltet ist. Die Skala zeigt die Drehzahl an. Bei kleinen Maschinen vermeidet man die verhältnismäßig starke zusätzliche Belastung durch den gebräuchlichen Drehzahlmesser durch Benutzung eines auf die Grundplatte aufgesetzten Zungenfrequenzmessers, welcher die sekundliche Drehzahl der Maschine anzeigt. Ebenfalls werden skroboskopische Verfahren benutzt. Bei diesen kann z. B. durch Einstellen der Lichtblitzfrequenz die Welle der Probemaschine zum scheinbaren Ruhen gebracht werden, wobei die Frequenz der Lichtblitze ein unmittelbares Maß für die Drehzahl ist.

Genauere Messungen mit den Tachometern sind möglich, wenn man sie kurz vorher an einem nicht zu kleinen, leer laufenden Asynchronmotor oder an einer Synchronmaschine „eicht“. Wenn diese Maschinen an einem Netz genau gehaltener Frequenz liegen, kann ihre Drehzahl mit nur kleinem Fehler gleich der synchronen Drehzahl angenommen werden. Man beobachtet den Anzeigenfehler des Meßgerätes und berücksichtigt ihn bei den nachfolgenden Ablesungen, die bei gleicher Geschwindigkeit vorgenommen werden.

Die Messung der Schwingungen. Unbalanz und magnetische Unsymmetrien können zu unruhigem Lauf der Maschinen führen, der besonders dann verschlechtert wird, wenn eine der Eigenschwingungszahlen der Maschine gleiche oder fast gleiche Frequenz mit der erregenden Frequenz hat. Im allgemeinen kann man einige wenige $\frac{1}{100}$ mm Schwingungsweite als zulässig annehmen. Die Beobachtung erfolgt in einfachster Weise subjektiv durch Berühren von Hand; die Beurteilung setzt allerdings eine gewisse Erfahrung voraus. Eine Reihe von Meßgeräten erlaubt die objektive Anzeige oder Aufschreibung der Schwingungen. Die eine Gruppe beruht in ihrer Wirkungsweise auf den Beschleunigungskräften einer trägen Masse, die andere arbeitet nach dem seismographischen Prinzip. Behelfsmäßig kann man eine Meßuhr verwenden, deren Stativ auf einem nicht mitschwingenden Grund aufgestellt wird und deren Tastfinger an die schwingende Maschine herangeführt wird. Der Zeiger schwingt hin und her und die doppelte Weite der Schwingungen kann abgelesen werden. Voraussetzung für richtige Anzeige ist, daß die Eigenschwingungszahl der Uhr wesentlich über der zu messenden Schwingungen liegt. Man kann auch die Meßuhr mit einer schweren Masse verbinden und diese dann mit der Hand halten. Die sehr geringe Eigenschwingungszeit von Handfederkraft und zusätzlicher Masse stört die Messung nicht. Genaue Messungen und Schwingungsschriften erhält man mit den in der Praxis gut eingeführten und leicht zu bedienenden Geräten, wie z. B. mit dem Schwingungsmesser von SCHENCK, mit dem Vibrographen von GEIGER und dem Tastschwingungsschreiber von ASKANIA. Diese Geräte haben den Vorzug, ohne weiteres Zubehör, also insbesondere ohne Verstärker zu arbeiten.

Die Geräuschmessung. In der Prüffeldpraxis kommen vornehmlich folgende Geräte bzw. Verfahren zur Anwendung:

1. Der subjektive Geräuschmesser nach BARCKHAUSEN. In diesem Gerät wird von einer in der Stärke regelbaren Geräuschquelle ein Vergleichsgeräusch erzeugt, welches mit dem einen Ohr abgehört wird, während das andere Ohr die Geräusche der zu untersuchenden Maschine aufnimmt. Wenn beide Geräusche gleich stark erscheinen, liest man auf einer Skala die Lautstärke in Phon ab. Zur Kontrolle wird die Beobachtung auch mit dem anderen Ohr durchgeführt. Gute Ergebnisse erhält man natürlich nur, wenn die Geräusche einander ähnlich sind.

2. Der objektive Geräuschmesser von Siemens & Halske. Bei diesem Apparat wird das Maschinengeräusch von einem Mikrophon aufgenommen und einem Verstärker, dessen Frequenzgang dem des Ohres angepaßt ist, zugeleitet. Ein an die letzte Röhre angelegtes Meßgerät zeigt die Lautstärke in Phon an. An seine Stelle kann ein Oszillograph oder ein schreibendes Gerät treten.

3. Beim Suchtonverfahren wird dem von einem Mikrophon aufgenommenen Geräusch ein reiner Ton veränderlicher Frequenz überlagert. Aus der Überlagerung wird entweder die Summe oder die Differenz der einzelnen Teilschwingungen des Geräusches und des Suchtones herausgesiebt, verstärkt und einem entsprechenden Meßgerät oder einem Oszillographen zugeleitet. Die Aufnahme geschieht, indem man innerhalb weniger Sekunden den Suchton von der tiefsten auf die höchste Frequenz einregelt. Man erhält als Ergebnis die Teiltöne nach Größe und Frequenz, also das sog. Geräuschspektrum, und kann somit wichtige Rückschlüsse auf die Geräuschenstehung ziehen.

Die Messung der Temperatur. Die Bestimmung der Temperatur der einzelnen Maschinenteile während des Dauerlaufes geschieht mit Flüssigkeitsthermometern, Thermoelementen und, seltener, mit eingebauten Widerstandsthermometern.

Flüssigkeitsthermometer für den elektrischen Prüfbetrieb enthalten vorzugsweise eine Alkoholfüllung; Quecksilberthermometer haben den Nachteil, daß es beim Zerbrechen des Gerätes leicht zur Verdampfung des Quecksilbers oder zur Schlußbildung spannungsführender Teile kommen kann. Außerdem ist die Entfernung der Quecksilbertropfen aus der Maschine nur schwer möglich.

Wichtig für eine einwandfreie Messung ist guter Wärmekontakt mit der Meßstelle, der durch Umhüllen der Flüssigkeitskugel mit Stanniol verbessert werden kann. Die Abstrahlung nach außen und der Zutritt von Kühlluft wird durch Überkleben der Meßstelle mit Filz verhindert. Zu beachten ist die leichte Ablesbarkeit der Skala, weshalb der Thermometerhals von vornherein in eine entsprechend günstige Stellung zu bringen ist. Wenn das Thermometer dagegen bei jedem Ablesen herausgenommen und wieder zurückgesteckt werden muß, ist keine Gewähr für gleichbleibenden Wärmekontakt gegeben und die einzelnen Ablesungen streuen stark.

Thermoelement. Die Temperaturmessung mittels Thermoelement beruht auf dem Auftreten einer Thermokraft genannten EMK an den Enden zweier verschiedener Metalle, die durch Löten oder Schweißen am anderen Ende verbunden sind und deren Verbindungsstelle einer

erhöhten Temperatur ausgesetzt wird. Abb. 216 veranschaulicht die Schaltung. An einem etwa 5 mm breiten und 20 mm langen Kupferblättchen sind z. B. ein Draht aus Kupfer und aus Rheotan durch eine Lötperle befestigt. Beide Drähte werden — am besten unmittelbar — einem empfindlichen Millivoltmeter zugeführt. Bei entfernter Aufstellung dürfen zur Verlängerung nur dieselben Metalle oder solche

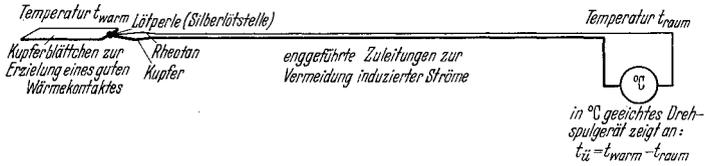


Abb. 216. Thermoelement aus Rheotan und Kupfer (Thermokraft 3,5 mV bei 80° Übertemperatur).

gleicher Thermokraft verwendet werden, damit Fehler durch weitere Thermokräfte an den Verbindungsstellen vermieden werden. Das Gerät mißt eine Spannung, die der Differenz der Temperaturen an der Lötstelle und in der Umgebung des Meßgerätes verhältnisgleich ist. Man erhält also, wenn die Skala in °C geeicht ist, die Übertemperatur der Meßstelle gegen den Raum. Wenn das Thermoelement neben das Gerät gelegt wird, muß die Anzeige Null werden. Bei den obenerwähnten Metallen beträgt die Thermokraft bei 80° Übertemperatur etwa 3,5 mV.

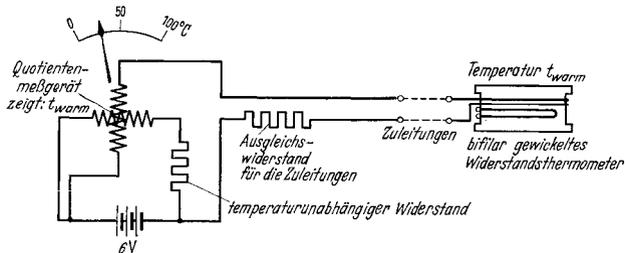


Abb. 217. Widerstandsthermometer mit Quotientenmeßgerät, dessen Skala in 0° C eingeteilt ist.

Im praktischen Gebrauch bevorzugt man die Anwendung der Thermolemente in all jenen Fällen, wo das Einstecken von Glasthermometern Schwierigkeiten bereitet. Dies gilt z. B. besonders bei vollständig gekapselten Maschinen, bei denen die Thermolemente gut am Wickelkopf der Ständerwicklung und am Ständerisen anzubringen sind, während die Zuleitungen durch ein kleines Bohrloch nach außen geführt werden.

Die Induzierung von Wirbelströmen im Kupferblättchen muß vermieden werden, jedoch sind im allgemeinen keine großen Bedenken in dieser Richtung vorhanden. Bei Verwendung mehrerer Elemente nimmt man praktischerweise eine Klemmleiste in Verbindung mit einem Umschalter, wodurch die Ablesung mit einem einzigen Drehspulgerät ermöglicht wird.

Widerstandsthermometer. Bei diesem Verfahren wird die Widerstandserhöhung eines an die erwärmte Stelle eingebrachten Metall-

drahtes gemessen, die ein Maß für die dort herrschende höhere Temperatur ist. Im Prüffeld macht man hiervon wenig Gebrauch, jedoch werden große Maschinen zum Zwecke der laufenden Temperaturüberwachung häufig mit Widerstandsthermometern ausgerüstet. Die Bestimmung der Widerstandszunahme kann in einer der verschiedenen Brückenschaltungen, mit Quotientenmeßgeräten (z. B. Kreuzspulgerät Abb. 217) oder mittels Kompensator erfolgen. Man erhält die Temperatur entweder mit Hilfe einer Eichkurve $t^\circ = f(R_{\text{warm}})$ oder man eicht zweckmäßigerweise die Skala unmittelbar in $^\circ\text{C}$.

Als Metalle finden vorzugsweise Nickel und Platin Verwendung, deren Widerstandsänderung je 1°C rund 0,68 bzw. 0,395% beträgt. Der Meßstrom durch das Widerstandsthermometer darf einige 10 mA nicht überschreiten, damit unzulässige zusätzliche Erwärmungen vermieden werden. Der Widerstand der Thermometer beträgt 100 oder $10\ \Omega$ bei 20°C . Das Platinthermometer hat bei einer Temperaturzunahme von 100° , also bei 120° , einen Widerstand von 139,5 bzw. $13,95\ \Omega$ und das Nickelthermometer einen solchen von 168 bzw. $16,8\ \Omega$. Abb. 218 gibt eine Eichkurve für Platin wieder.

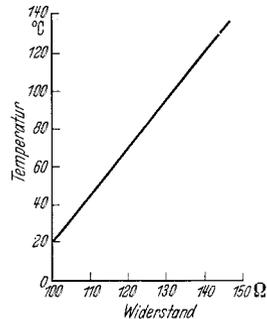


Abb. 218. Eichkurve eines Platin-Widerstandsthermometers.

Luftdruck und Luftgeschwindigkeit. Man unterscheidet den statischen Druck p_{stat} , den dynamischen Druck p_{dyn} und den Gesamtdruck p_{gesamt} .

Der *statische Druck* tritt als Druck auf die Wandungen bei parallel vorbeiströmender Luft auf. Er kann gemessen werden als absoluter Druck durch Barometer oder als Überdruck durch Manometer, an deren gut abgerundeten Entnahmeöffnungen die Luft unbehindert vorbeistreicht. Der statische Überdruck der Luft in elektrischen Maschinen liegt etwa zwischen 30 und 50 mm W.-S.; bei sehr energisch belüfteten Maschinen kann er bis zu 120 mm W.-S. und darüber betragen.

Der *dynamische Druck* ist gleich dem Druck, der nötig ist, um der ruhenden Luft ihre Geschwindigkeit zu erteilen; es gilt

$$p_{\text{dyn}} = \frac{v^2 \gamma}{2g} \approx \frac{v^2}{16} \text{ in mm W.-S.},$$

wobei

v = Luftgeschwindigkeit in m/sec,

γ = spez. Luftgewicht in kg/m^3 ,

$g = 9,81 \text{ m/sec}^2$

ist.

Der *Gesamtdruck* setzt sich aus diesen beiden Drücken zusammen zu:

$$p_{\text{gesamt}} = p_{\text{stat}} + p_{\text{dyn}}.$$

Er tritt auf vor Hindernissen, die der strömenden Luft entgegengehalten werden und ist zu messen als der höchste Druck an jener Stelle des getroffenen Hindernisses, wo sich die Luftströmung teilt. Dorthin wird also die Entnahmeöffnung des Druckmessers verlegt.

Als Meßgeräte werden u. a. benutzt das Staurohr nach PRANDTL und das Manometer nach KRELL. Mit diesen können sowohl der statische, der gesamte als auch der dynamische Druck gemessen werden.

Nur der Bestimmung des dynamischen Druckes dienen die sehr bequemen Staudruckgeräte, deren Skala unmittelbar die *Luftgeschwindigkeit* angibt. Diese hängt mit dem dynamischen Druck zusammen nach der Gleichung:

$$v = \sqrt{16 \cdot p_{\text{dyn}}}$$

Die unmittelbare Bestimmung der Luftgeschwindigkeit erfolgt mit Schalenkreuz- oder Flügelradanemometern, deren Umläufe in der Zeiteinheit gemessen werden.

Messung des Drehmomentes. Die unmittelbare mechanische Bestimmung des Drehmomentes, das an der Welle der Probemaschinen

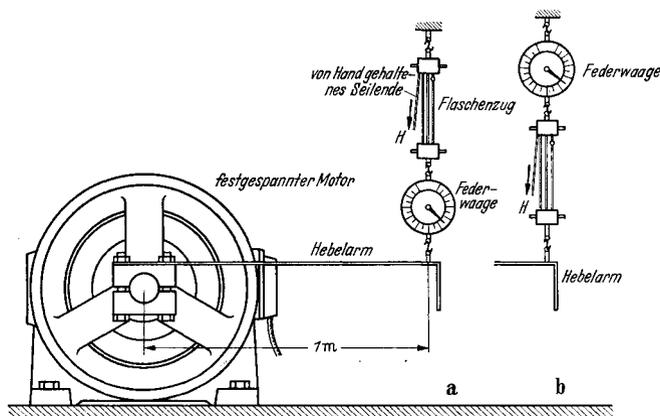


Abb. 219. Drehmomentmessung im Stillstand.

Anordnung *a* vermeidet Fehler durch Handkraft *H* am freien Seilende.
Anordnung *b* zeigt Fehler, wenn freies Seilende nicht waagrecht gehalten wird.

auftritt, wird der mittelbaren Bestimmung aus Strom und Fluß (Erregerstrom) oder aus Leistung und Drehzahl bei laufenden Maschinen vorgezogen. Neben dem in Abschnitt I. beschriebenen Verfahren mit elektrischen und mechanischen Bremsen bestimmt man das Drehmoment im Stillstand mit dem einfachen Hebelarm, der fest auf die Maschinenwelle aufgesetzt wird, oder bei Lauf mit dem Torsionsstab nach VIEWEG.

Drehmomentmessung mit Hebelarm. Ein auf die Welle der Maschine aufgesetzter Hebelarm von genau bestimmter Länge zwischen Wellenmitte und Angriffspunkt der Kraft drückt entweder auf eine Tafelwaage oder zieht, wie Abb. 219 zeigt, über einen Flaschenzug an einer Federwaage. Das vom Motor ausgeübte Drehmoment ergibt sich zu:

$$\text{Drehmoment in mkg} = (\text{Hebelarmlänge in m}) \cdot (\text{Kraft in kg})$$

$$Md = l \cdot P.$$

Zu beachten ist, daß die Kraft senkrecht am waagrecht liegenden Arm angreifen muß. Als diese darf nur die wirklich vom Motor ausgeübte Kraft eingesetzt werden. Vor der eigentlichen Messung ist daher der

von den einseitigen Gewichten der Anordnung herrührende Ausschlag abzulesen und entsprechend zu berücksichtigen. Diese Übergewichte müssen, um bei der Federwaage meßbar zu sein, in Richtung des Motordrehmomentes wirken; bei Verwendung eines zweiarmigen Hebels, die sich aus Sicherheitsgründen (verkehrte Motordrehrichtung) empfiehlt, ist unter Umständen durch ein zusätzliches Übergewicht auf der Waagen-*seite* hierfür zu sorgen. Der Flaschenzug ermöglicht es, während der Messung durch langsames Durchziehenlassen des Seiles den Motorläufer in verschiedene Stellungen zu bringen, um sein etwa schwankendes Drehmoment bestimmen zu können. Man begnügt sich mit der Feststellung des Höchst- und des Kleinstwertes und nimmt als richtigen Betrag des ausgeübten Drehmomentes den Mittelwert aus beiden Ablesungen. Zu beachten ist, daß in Anordnung *b* das freie Seilende nicht in Richtung auf den Hebelarm zu mit der Hand geführt werden darf, da sonst die von ihr auszuübende Haltekraft *H* mitgemessen würde. Bei waagrechter Führung oder durch die Anordnung *a* kann dieser Fehler ohne weiteres vermieden werden. Die Wirkung der Reibungskraft wird ausgeschieden, wenn man das Moment einmal beim Heben und einmal beim Sinkenlassen des Armes an der gleichen Stelle mißt und den Mittelwert beider Angaben nimmt. Bei Asynchronmotoren mit Wälzlagern, die am häufigsten zur Probe kommen, spielt die Reibung eine untergeordnete Rolle; ihr Einfluß ist geringer als der natürliche Fehler der Federwaage.

Die Verwendung von Tafelwaagen erlaubt eine genauere Bestimmung der Kraft, jedoch ist die Drehmomentbestimmung bei verschiedenen Läuferstellungen nicht leicht durchzuführen; außerdem ist die Waage bezüglich des ersten Stoßes beim Einschalten des Motors wesentlich empfindlicher als die Federwaage.

Drehmomentmessung mit Torsionsstab nach VIEWEG. Diese Meßmethode empfiehlt sich besonders bei der Aufnahme der Drehmoment-Drehzahlkurven von Gleichstrommaschinen in Sonderschaltungen, wie sie z. B. für Schiffshilfsmaschinen und Hebezeuge verwendet werden. Das Torsionsdynamometer besteht im wesentlichen aus einem schlanken Stahlstab hoher Güte, der in die mechanische Kraftübertragung eingeschaltet wird. Beim Auftreten eines Drehmomentes verdrehen sich die Stabquerschnitte gegeneinander. Diese Verdrehung ist, wenn die Proportionalitätsgrenze nicht überschritten wird, dem Drehmoment verhältnismäßig. Z. B. durch eine optische Vorrichtung kann die Verdrehung der beiden Einspannquerschnitte gegeneinander beobachtet werden, zu der sich aus der statisch ermittelten Eichkurve des verwendeten Stabes der zugehörige Wert des Drehmomentes in mkg ergibt. Für die einzelnen Meßbereiche müssen verschieden starke Stäbe verwendet werden. Für Prüffeldzwecke ergibt sich eine sehr praktische Anordnung, wenn das Torsionsdynamometer für sich allein zwischen zwei Lagerböcken auf einer eigenen Grundplatte aufgebaut wird. Die antreibende Welle wird auf der einen, die angetriebene Welle auf der anderen Seite besonders angekuppelt. Der geringe, durch die zusätzlichen Lager- und Kupplungsverluste entstehende Fehler kann meist ohne weiteres vernachlässigt werden.

Formelanhang¹.

Gleichstrommaschine

Induzierte Spannung.

$$U = z \cdot \frac{2p}{2a} \cdot \frac{n}{6000} \cdot \Phi.$$

Drehstromkommutatormaschine, ständergespeist

$$U_{\varnothing} = \frac{z}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2p}{2a} \cdot \frac{n_{\text{syn}}}{6000} \cdot \Phi \cdot s.$$

Drehstromkommutatormaschine, läufergespeist

$$U_{\varnothing} = \frac{z}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2p}{2a} \cdot \frac{n_{\text{syn}}}{6000} \cdot \Phi.$$

Einphasenkommutatormaschine

$$U = \frac{z}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2p}{2a} \cdot \frac{n}{6000} \cdot \Phi.$$

Drehstromwicklungen (für Lochzahlen pro Pol und Phase > 2)

$$U = 4,24 \cdot w \cdot \frac{f}{100} \cdot \Phi_1 \cdot f_s, \quad f_s = \sin\left(\frac{W}{t_p} \cdot 90^\circ\right),$$
$$4,24 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{3}{\pi}.$$

Transformator

$$U = 4,44 \cdot w \cdot \frac{f}{100} \cdot \Phi, \quad 4,44 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}}.$$

Widerstand.

$$R = \frac{l}{q \cdot L}, \quad L = L_{20^\circ} \cdot \frac{20 + T}{t_{\text{warm}} + T}, \quad \frac{R_{\text{warm}}}{R_{\text{kalt}}} = \frac{t_{\text{warm}} + T}{t_{\text{kalt}} + T}, \quad L \text{ und } T \text{ siehe Tabelle.}$$

Erwärmung.

Auswertung des Dauerlaufes bei Kupferwicklungen

$$t_u = \frac{R_{\text{warm}} - R_{\text{kalt}}}{R_{\text{kalt}}} (235 + t_{\text{kalt}}) - (t_{\text{raumwarm}} - t_{\text{kalt}}),$$

$$t_u = \frac{R_{\text{warm}} - R_{\text{kalt}}}{R_{\text{kalt}}} (235 + t_{\text{kalt}}) - (t_{\text{kühlmittel}} - t_{\text{kalt}}),$$

Reine Wärmespeicherung (z. B. im Kurzschluß)

$$t_{\text{ii}} = \frac{j^2 \cdot t}{\frac{c}{1000} \cdot \gamma \cdot L}, \quad c, \gamma, L \text{ siehe Tabelle.}$$

¹ Bezeichnungen siehe S. 346.

Wicklungsverluste

aus Widerstand und Strom

$$V = I^2 \cdot R,$$

aus Stromdichte und Gewicht

$$V = \frac{j^2 \cdot G \cdot 10^3}{\gamma \cdot L} \approx 2j^2 \cdot G \text{ bei Kupfer von } 20^\circ,$$

$$\approx 2,4j^2 \cdot G \text{ bei Kupfer von } 75^\circ.$$

Hochlauf.

$$Md = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}, \quad 375 = \frac{4 \cdot 9,81 \cdot 60}{2\pi}.$$

Auslauf.

$$GD^2 = \frac{N_{\text{Brems}} \cdot T_1}{\left(\frac{n_1}{604}\right)^2}, \quad 604 = \frac{600 \sqrt{10}}{\pi},$$

Drehmoment.

$$\frac{Md}{(\text{in mkg})} = \frac{973}{n} \cdot N_{(kW)} = \frac{716}{n} \cdot N_{(PS)}, \quad 973 = \frac{60000}{9,81 \cdot 2\pi}, \quad 716 = \frac{4500}{2\pi},$$

Kinetische Energie.

Bewegte Masse $\frac{E}{(\text{in Ws})} = \frac{1}{2} Gv^2,$

Drehende Masse $\frac{E}{(\text{in Ws})} = \frac{GD^2 \cdot n^2}{730}, \quad 730 = 8 \left(\frac{60}{2\pi}\right)^2,$

Umrechnung der Einheiten für Arbeit und Leistung.

$$\text{Arbeit} \begin{cases} 1 \text{ mkg} = 9,81 \text{ Ws} = \frac{1}{427} \text{ kcal}, & 1 \text{ PSh} = 632 \text{ kcal}, \\ 1 \text{ Ws} = 0,102 \text{ mkg} = \frac{1}{4180} \text{ kcal}, & 1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}. \\ 1 \text{ kcal} = 4180 \text{ Ws} = 427 \text{ mkg}. \end{cases}$$

$$\text{Leistung} \begin{cases} 1 \text{ mkg/s} = 9,81 \text{ W}, \\ 1 \text{ PS} = 75 \text{ mkg/s} = 0,736 \text{ kW} \\ 1 \text{ kW} = 102 \text{ mkg/s} = 1,36 \text{ PS}. \end{cases}$$

Tabelle.

	Spezifisches Gewicht γ	Spezifische Wärme Ws/kg c	Leitwert m/Ω mm ² L		Negative Temperatur, wo Wid. fast zu Null wird T
			bei 20°	bei 75°	
Kupfer	8,90	390	57	46,8	235
Aluminium	2,70	920	36	29,8	245
Messing (Me 63)	8,45	385	15	13,9	760
Walzisen	7,86	480	7	5,5	184

Bezeichnungen.

- $2a$ = Zahl der parallelen Zweige = 2 bei eingängiger Wellenwicklung.
 = $2p$ bei eingängiger Schleifenwicklung.
- c = spezifische Wärme in $\text{Ws}/^\circ\text{kg}$.
 E = Kinetische Energie in Ws .
 f = Frequenz in Hz .
 f_s = Sehnungsfaktor.
 G = Gewicht in kg .
 GD^2 = Schwungmoment in kgm^2 .
 j = Stromdichte in A/mm^2 .
 I = Stromstärke in A .
 L = Leitwert in $\frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2}$.
 L_{20° = Leitwert bei 20° .
 l = Länge in m .
 Md = Drehmoment in mkg .
 N_{Brems} = Bremsende Leistung (beim Auslauf) in kW .
 $N_{(\text{kW})}$ = Leistung in kW .
 $N_{(\text{PS})}$ = Leistung in PS .
 n = Drehzahl in U/min .
 n_1 = Auslaufdrehzahl, gehörend zur gedachten Auslaufzeit T_1 , in U/min .
 n_{syn} = synchrone Drehzahl in $\text{U}/\text{min} = \frac{120 \cdot f}{2p}$.
 $\frac{dn}{dt}$ = Beschleunigung, bzw. Verzögerung in $\frac{\text{U}/\text{min}}{\text{sec}}$.
 $2p$ = Polzahl.
 q = Querschnitt in mm^2 .
 R = Widerstand in Ω .
 R_{warm} = Widerstand bei t_{warm}° .
 R_{kalt} = Widerstand bei t_{kalt}° .
 s = Schlupf = $\frac{s\%}{100} = \frac{n_{\text{syn}} - n}{n_{\text{syn}}}$.
 t = Zeit in sec .
 t_{kalt} = Wicklungstemperatur bei kalter Widerstandsmessung in $^\circ$.
 t_{warm} = Wicklungstemperatur bei warmer Widerstandsmessung in $^\circ$.
 $t_{\text{Raum,warm}}$ = Raumtemperatur bei warmer Widerstandsmessung in $^\circ$.
 $t_{\text{Kühlmittel}}$ = Eintrittstemperatur des Kühlmittels in $^\circ$.
 t_u = Übertemperatur in $^\circ$.
 T_1 = Gedachte Auslaufzeit in s zur Drehzahl n_1 .
 t_p = Polteilung in cm .
 \bar{T} = negative Temperatur, bei der der Widerstand fast zu Null wird.
 U = induzierte Spannung einer Phase, bzw. zwischen den Bürsten in V .
 U_\emptyset = induzierte Durchmesserspannung zwischen Bürsten in Entfernung einer Polteilung in V .
 V = Verluste in W .
 v = Geschwindigkeit in m/sec .
 W = Spulenweite in cm .
 w = wirksame Windungszahl je Phase.
 z = gesamte Leiterzahl eines Gleichstromankers.
 γ = spezifisches Gewicht.
 Φ = magnetischer Kraftfluß in 10^6 Maxwell.
 Φ_1 = Grundwelle von Φ .

Sachverzeichnis.

- Abzweigen von Ankerstrom, Wendpolwicklung, Einankerumformer 256.
—, Einphasenreihenschlußmotor 294.
—, Gleichstrommaschine 215.
Ankerkupferverluste, Einankerumformer 251, 252.
— s. Lastverluste.
Ankerleerlaufstrom 270, 283.
Ankermindeststrom 272, 283.
Ankerrückwirkung, Einphasenreihenschlußmotor 293, 294.
—, Gleichstrommaschine 193 ff.
—, Synchronmaschine 177.
Anlassen, Einankerumformer 253.
Anlaßwiderstand, Asynchronmotor 106.
Anzugsdrehmoment 25.
—, Asynchronmotor 77.
—, Einphasensynchronmotor mit Hilfsphase 116.
— s. Kurzschlußdrehmoment.
—, Meßgerät 342.
—, Messung 25.
—, Synchronmaschine 163, 186.
Arbeitswelle 129.
Askania-Tastschwingungsschreiber 338.
Asynchrongenerator 110.
Asynchronmaschinen 76 ff.
— mit Drehzahl- und Phasenregelung 145 ff.
— — mit Erregermaschine, eigenregler 152.
— — mit Frequenzwandler 147.
—, polumschaltbare 107 ff.
—, synchronisierte 121 ff.
Asynchronmotor, Drehstrom- 80 ff.
—, Einphasen- 111 ff.
Ausgleichssätze 243.
Ausgleichswelle 130.
Auslaufversuch 33 ff.
—, Auswertung 33.
—, GD^2 -Bestimmung 34.
—, Verlustmessung 37.
—, Verlusttrennung 37.
—, Zusatzverluste, Synchronmaschine 159.
Ausmessung von Spannungen 11 ff.
—, Asynchronmaschinen mit Drehzahl- und Phasenregelung 146.
— s. Einstellung.
Außertrittfallmoment 188.
Bahnmotor s. Einphasenreihenschlußmotor.
Barckhausen, subjektiver Geräuschmesser 339.
Belastungseinstellung, Synchronmaschinen 166.
Belastungskennlinien, allgemein 17.
—, Asynchronmotor 94.
—, Drehstromnebenschlußmotor 275.
—, Einphasenreihenschlußmotor 298.
—, Gleichstrommaschine 196.
—, Synchronmaschinen 168.
Belastungsmaschinen, Drehmoment-Drehzahlkennlinien 53.
—, Eichung 229.
Belastungsverfahren 46.
Belastungsversuch, allgemein 17 ff.
—, Asynchronmotor 90.
—, Drehregler, dreiphasiger 140.
—, Drehstromnebenschlußmotor 272.
—, Drehstromreihenschlußmotor 290.
—, Einankerumformer 256.
—, Einphasenreihenschlußmotor 298.
—, elektrische Welle 133.
—, Gleichstrommaschine 223.
—, Periodenwandler 121.
—, Repulsionsmotor 303.
—, ständererregte Kommutatormaschine 310.
—, Synchronmaschine 163.
Belüftung 22.
— s. Luft-
Blindleistungsmessung s. Leistungsmessung.
Bremsen 47.
—, Pendel- 47.
Bremsverluste 34.
Brücke, Thomson- 334.
—, Wheatstone- 335.
Bürstenkurzschluß, doppelter Bürstenschutz 302.
—, Durchmesser- 302.
—, Sehnen- 302.
Bürstenspannungskurve, Einankerumformer 256.
—, Einphasenreihenschlußmotor 294.
—, Gleichstrommaschine 210.
— —, Aufnahme 214.
Bürstenstellung, neutrale 19.
—, Gleichstrommaschine 224.

- Bürstenüberdeckung 217.
 Bürstenverschiebung, Gleichstrom-
 maschine 194.
 Bürstenstellwinkel, Drehstromneben-
 schlußmotor, ständergespeister 280.
 —, Drehstromreihenschlußmotor 284.
 —, Repulsionsmotor 299.
 —, Schragemotor 280.
 Bürstenspannungsabfall 4, 154, 222.
 Bürstenübergangswiderstand 4.
 Bürstenverluste 190, 228, 257.
- Charakteristische Größen, Synchron-
 maschine 177 ff.
 $\cos \varphi = 0$ -Linie 168.
- Dahlanderschaltung 109.
 Dämpferwicklung, Einankerumformer
 245, 254.
 —, Synchronmaschine 155, 161.
 Dauerkurzschlußstrom 161.
 Dauerlauf, allgemein 17 ff.
 —, Asynchronmotor 95.
 —, Drehregler 140.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 299.
 —, Gleichstrommaschine 225.
 —, praktische Durchführung 19.
 —, Synchronmaschine 188.
 Dérimotor s. Repulsionsmotor.
 Diagramm, Asynchronmaschine 101 ff.
 — —, mit Drehstromerregmaschine,
 ständerloser 154.
 — —, mit Frequenzwandler 150.
 —, Doppeldrehregler 142.
 —, Dreiphasendrehregler 135.
 —, Drehstromasynchronmaschine 101 ff.
 —, Drehstromerregmaschine, ständer-
 lose 304.
 —, Drehstromnebenschlusmotor, mit
 Einfachdrehregler 273.
 —, Drehstromreihenschlußmotor, ohne
 Zwischentrafo 287.
 — —, mit Zwischentrafo 288.
 —, Einankerumformer 252.
 —, Einphasenasynchronmotor 113.
 — —, Kurzschluß, mit Hilfsphase 115.
 —, Einphasendrehregler 144.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 292.
 —, elektrische Welle 127.
 —, Gleichstrommaschine 196 ff.
 —, Periodenwandler 119.
 —, Schragemotor 283.
 —, Synchronmaschine 173—177.
 —, synchronisierte Asynchronmaschine
 122.
 —, Transformator 61.
 — —, Kappsches 63.
 Doppelnutläufer 83, 86, 87, 90.
 Doppelschlußgenerator 232, 233.
 Doppelschlußmotor 240.
- Doppeltgespeister Asynchronmotor 80.
 Dreheisengerät 316.
 Drehmoment, Drehregler 141.
 —, Formel 345.
 —, Gleichstrommaschine 204.
 —, Synchronmaschine 186 ff.
 — —, Anzugs- 186.
 — —, Außertrittfall- 186.
 — —, Hochlauf- 186.
 — —, Intrittfall- 186.
 — —, Nennintrittfall- 186.
 — —, synchrones 187.
 — —, synchronisierendes 187.
 Drehmoment-Drehzahlkennlinie,
 Asynchronmotoren 88.
 — —, Gleichstrommaschinen 53.
 — —, Synchronmaschinen 55.
 Drehmomentmessung, allgemein 25.
 —, mit Gegenstrom 26.
 —, mit Hebelarm 342.
 —, mit Pendelmaschine 48.
 —, mit Torsionsstab 343.
 Drehregler 134 ff.
 —, Doppel- 142.
 —, Dreiphasen- 134.
 —, Einphasen- 143.
 —, Spannungsregelung, Einankerum-
 former 250.
 Drehrichtungswechsel, Drehstrom-
 nebenschlusmotor, ständergespei-
 ster 262.
 — —, mit Einfachdrehregler 276.
 —, Drehstromreihenschlußmotor 285.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 293.
 —, Repulsionsmotor 303.
 —, Schragemotor 279.
 Drehspulgerät 313.
 Drehstromasynchronmotor 80 ff.
 Drehstromerregmaschine, eigener-
 regte, ständerlose 303 ff.
 — mit Vordermotor 152.
 Drehstromkommutatormaschine, stän-
 dererregte 307 ff.
 — mit sechs Teilpolen 308.
 — mit drei Teilpolen, Scherbius, 311.
 Drehstromnebenschlusmotor, ständer-
 gespeister 258.
 — mit Einfachdrehregler 263.
 Drehstromreihenschlußmotor 283.
 Drehtransformator s. Drehregler.
 Drehzahl, synchrone 77.
 —, Einankerumformer 249.
 Drehzahlkennlinie (s. a. Drehmoment-
 Drehzahlkennlinie), Drehstrom-
 reihenschlußmotor 285.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 298.
 —, Gleichstrommaschine 197.
 Drehzahlkorrektur durch Luftspalt-
 änderung, Gleichstrommaschine 224.
 Drehzahlmesser 337.

- Drehzahlregelung, Asynchronmaschine, Widerstände 106.
 — —, Hintermaschinen 145.
 —, Gleichstrommotoren 239.
 Dreifeldmaschine (Krämer) 199, 203, 235.
 Drosselspule, Einankerumformer, Spannungsregelung 250.
 —, Einphasenasynchronmotor, Anlauf 115.
 Dunkelschaltung 164.
 —, Kontrolle 165.
 Durchgangsleistung, Spartrafo 76.
 Durchmesserspannung, Einankerumformer 247.
 —, Formeln 344.
 —, Schragemotor 279.

Eichung, Gleichstrommaschinen 229.
 Eigenschwingungszahl, Synchronmaschine 183.
 Einankerumformer 245 ff.
 Einphasenasynchronmotor 111 ff.
 — mit Hilfsphase 115.
 Einphasendrehregler 143.
 Einphasenreihenschlußmotor 291 ff.
 —, Repulsionsmotor 299.
 Einphasige Erregung, Wicklungsausmessung 12.
 Einstellung, Bürstenjoch 9.
 —, Doppeldrehregler 142.
 —, Drehstromkommutatormaschine, ständererregte 310.
 —, Drehstromnebenschlußmotor, ständergespeister 259.
 — —, mit Einfachdrehregler 267.
 —, Dreiphasendrehregler 137.
 —, Drehstromreihenschlußmotor 290.
 —, Frequenzwandler, kompensierter 307.
 —, Kompensationsspannung, Drehstromnebenschlußmotor 261, 274.
 — —, Schragemotor 283.
 —, Repulsionsmotor 302.
 —, Schragemotor 281.
 Einzelverluste 43.
 Einzelverlustverfahren, allg. 43.
 —, Asynchronmotor 96.
 —, Einankerumformer 257.
 —, Gleichstrommaschine 227.
 —, Synchronmaschine 189.
 —, Transformator 64.
 Eisenverluste, allg. 14.
 —, Asynchronmotor 91, 96.
 —, Einankerumformer 257.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 297.
 —, Gleichstrommaschine 218, 227, 229.
 —, Synchronmaschine 157, 190.
 —, Transformator 65.
 Elektrische Welle 125 ff.
 Elektrische Arbeitswelle 129.
 — Ausgleichswelle 130.
 — Diagramm 127.
 Elektrodynamisches Gerät 319.
 Engpaß, magnetischer 221.
 Erregermaschine, Drehstrom-, eigen-
 erregte, ständerlose 303 ff.
 —, Gleichstrom- 220.
 Erregerstrom, Gleichstrommaschine 197,
 202.
 —, Synchronmaschine, Schwedendia-
 gramm 171.
 — —, Amerikanische Normalien 172.
 —, synchronisierte Asynchronmaschine
 124.
 Erregerverluste, allg. 43.
 —, Einankerumformer 257.
 —, Gleichstrommaschine 228.
 —, Synchronmaschine 190.
 Erwärmung, allg. 19.
 —, Transformator 74.
 Erwärmungsprobe s. Dauerlauf.

 Feldkurve, Gleichstrommaschine 226.
 Feldschwächung, Ankerrückwirkung,
 Einphasenreihenschlußmotor 293,
 296.
 — —, Gleichstrommaschinen 193 ff.
 —, Drehzahlregelung, Gleichstrom-
 motoren 239.
 Feldschwächungsfaktor, Einphasen-
 reihenschlußmotor 296.
 Flimmerprobe 227.
 Flüchtige Stoßkurzschlußreaktanz 179.
 Flüchtiger Stoßkurzschlußstrom 161.
 Formelanhang 344.
 Fremderregter Nebenschlußgenerator
 233.
 — — mit Gegenstromwicklung 233.
 Frequenzgeber 338.
 Frequenzmesser 330.
 —, Induktions- 331.
 —, Kreuzeisen- 332.
 —, Zungen- 330.
 Frequenzwandler (ständerloser) 305.
 —, kompensierter 307.

*GD*², Bestimmung, Auslauf 34.
 Gegenkompoundgenerator 233.
 Gegenläufige Reaktanz 182.
 Gegenstromverfahren 26.
 Geigerscher Schwingungsschreiber 338.
 Generatorverfahren, allg. 15.
 Geräusche 24.
 Geräuschmesser 338.
 —, objektiver, S. u. H. 339.
 —, subjektiver, Barkhausen 339.
 —, Suchtonverfahren 339.
 Gleichstromgeneratoren 231 ff.
 Gleichstrommaschinen 192 ff.

- Gleichstrommaschinen, Querfeldma-
 schine 235.
 —, Spannungsteilung 242.
 Gleichstrommotoren 237ff.
 Grenzerwärmung 18.
 Grenzleistung, thermische 18, 21.
- Hauptschlußgenerator, Drehstrom-**
 reihenschluß- 289.
 —, Gleichstrom- 234.
Hauptschlußmotor, Drehstromreihen-
 schluß- 283.
 —, Einphasen- 291.
 —, Gleichstrom- 241.
 —, Repulsionsmotor 299.
 Hellschaltung 164.
 —, Kontrolle 165.
 Heyland 101, 107.
 Hilfsspannung 263.
 Hilfswicklung 264.
 Hilfsphase 115.
 Hobartsche Streuziffer 209, 210.
 Hochfrequenzprüfung, Spulen 6.
 Hochlaufmoment, Asynchronmotoren
 88.
 —, Synchronmotoren 186.
 Hochlaufoszilogramm 32.
 Hochlaufversuch 27ff.
 —, Asynchronmotor 88.
 —, Synchronmotor 162.
- Ideeller Kurzschlußstrom 85.
 Induktionsfrequenzmesser 331.
 Induktive Ausmessung, Gleichstrom-
 feldspulen 8.
 — Spannungswandler 12.
 — Stromwandler 12.
 Induktiver Widerstand (s. auch Reak-
 tanz). Messung 336.
 Induktivität 336.
 Eintrittfallmoment 186.
 Isolationsfestigkeit 5ff.
 —, Hochfrequenzprüfung 6.
 —, Sprungwellenprobe 6.
 —, Wicklungsprobe 5.
 —, Windungsprobe 6.
 Isolationswiderstand 7.
 I-Strecke, Gleichstrommaschine 198ff.
- Kapazität 337.**
 Kapazitiver Widerstand 337.
 Kappsches Diagramm 63.
 Keilstabläufer 76.
 Kippleistung, Asynchronmotor 103, 107.
 Kippmoment, Asynchronmotor 103, 107.
 —, elektrische Welle 128.
 —, Synchronmaschine 177, 188.
 —, synchronisierte Asynchronmaschine
 124.
 Kippschlupf 87.
- Klemmenspannungskennlinie 197.
 Kommutatormaschinen, Ein- u. Mehr-
 phasenstrom 258ff.
 Kommutatorspannungskurve 227.
 Kommutierung (s. auch Stromwendung)
 —, Über- 210, 215.
 —, Unter- 210, 216.
 Kompensationswicklung, Einphasen-
 drehregler 143.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 291.
 —, Frequenzwandler 307.
 —, Gleichstrommaschine 192.
 —, Kommutatormaschine, ständer-
 erregte 308.
 Kompensationsspannung 145, 258, 265,
 280.
 — s. auch Einstellung.
 Kompensationstransformator 261.
 Kompensationswinkel 265, 280.
 Kompoundgenerator 232.
 Kompoundmotor 240.
 Kondensator, Einphasenasynchron-
 motor, Anlauf 115.
 Korrektur der Drehzahl durch Luft-
 spaltänderung 224.
 Korrekturdrehmoment, Pendelmaschine
 51.
 Krämermaschine 199, 203, 235.
 Kreisdiagramm s. Diagramm.
 Kreuzeisenfrequenzmesser 332.
 Kreuzeisengerät 328.
 Kreuzspulgerät 328.
 Kritische Drehzahl 222.
 Kritischer Widerstand 219, 234.
 Künstlicher Nullpunkt 11, 146, 323, 327.
 Kurzschlußdrehmoment, allg. 25.
 —, Asynchronmotor 83, 85, 86.
 — s. auch Drehmoment.
 —, Dreiphasenreihenschlußmotor 284.
 —, Einphasenasynchronmotor 115.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 297.
 —, Repulsionsmotor 300.
 —, Synchronmotor 163.
 —, Stoß-, Asynchronmotor 87.
 — —, Synchronmotor 162.
 Kurzschlußimpedanz, Transformator 70.
 Kurzschlußkennlinie 25.
 —, Asynchronmaschine 84.
 —, Synchronmaschine 159.
 Kurzschlußläufer 76, 83.
 Kurzschlußreaktanz, Transformator 70.
 — s. auch Stoßkurzschlußreaktanz und
 Reaktanz.
 Kurzschlußspannung, Transformator 69.
 —, Drehregler 139.
 Kurzschlußstellung 284, 290, 300.
 Kurzschlußstrom, Asynchronmaschine
 82ff.
 — —, ideeller 85.
 —, Drehregler 139.

- Kurzschlußstrom, Spartransformator 75.
 —, Synchronmaschine 159.
 — —, Stoß- 161.
 — —, Flüchtiger Stoß- 161.
 —, Transformator 70.
 Kurzschlußverhältnis 177.
 Kurzschlußverluste allgemein 27.
 —, Asynchronmaschine 84.
 —, Drehregler 139.
 —, Gleichstrommaschine 223.
 —, Synchronmaschine 159.
 —, Transformator 64, 69.
 Kurzschlußversuch, allgemein 25 ff.
 —, Asynchronmotor 82 ff.
 —, Drehregler, dreiphasiger 138.
 — —, einphasiger 144.
 —, Drehstromreihenschlußmotor 290.
 —, Einankerumformer 255.
 —, Einphasenasynchronmotor 115.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 297.
 —, elektrische Welle 132.
 —, Gleichstrommaschine 223.
 —, Kommutatormaschine, ständererregte 311.
 —, Periodenwandler 119.
 —, Repulsionsmotor 302.
 —, Schragemotor 282.
 —, Spartransformator 75.
 —, Synchronmaschine 158.
 —, Transformator 69, 72.
 Kurzschlußwiderstand, Transformator 70.
 Kurzschlußzusatzverluste, Gleichstrommaschine 223.
 —, Drehregler 139.
 —, Synchronmaschine 159.
 —, Transformator 69.

 Ladeleistung 179.
 Lamellenspannung (s. a. Transformatorspannung) 269.
 Längsstellung, Synchronmaschine, Reaktanzen 178—182.
 Lastverluste, allgemein 43.
 —, Asynchronmotor 97.
 —, Einankerumformer 257.
 —, Gleichstrommaschine 228.
 —, Synchronmaschine 190.
 —, Transformator 64, 69.
 Lastverteilung, Gleichstrommaschine 206 ff.
 —, Transformatoren 60.
 Läufergespeister Drehstromnebenschlusmotor (Schrage) 277 ff.
 Läuferstrom, Asynchronmotor 100.
 — s. auch Ankermindeststrom und Leerlaufankerstrom.
 —, Asynchronmotor mit Drehstromerregmaschine 153.

 Läuferverluste, Asynchrongenerator 111.
 —, Asynchronmaschine 78, 98.
 —, Asynchronmotor mit Drehstromerregmaschine 154.
 —, Einphasenasynchronmotor 112, 114.
 Leerlaufankerstrom 270, 283.
 Leerlaufkennlinien 13.
 Leerlaufstellung, Drehstromreihenschlußmotor 284, 290.
 —, Repulsionsmotor 300.
 Leerlaufverluste, Transformator 65.
 Leerlaufversuch, allgemein 13 ff.
 — —, Generatorverfahren 15.
 — —, Motorverfahren 13.
 —, Asynchronmotor 80.
 —, Drehregler, dreiphasiger 136.
 — —, einphasiger 144.
 —, Drehstromnebenschlusmotor mit Einfachdrehregler 269.
 —, Einankerumformer 255.
 —, elektrische Welle 132.
 —, Gleichstrommaschine 218.
 —, Kommutatormaschine, ständererregte 310.
 —, Periodenwandler 119.
 —, Schragemotor 282.
 —, Synchronmaschine 157.
 —, Transformator 65, 72.
 Leerverluste, allgemein 14, 43.
 —, Asynchronmotor 82.
 —, Einankerumformer 257.
 —, Gleichstrommaschine 218, 227.
 —, Synchronmaschine 190.
 Leistungsfaktor 326, 327.
 —, bester 107.
 Leistungsfaktormesser 327 ff.
 Leistungsfaktormessung, Drehstrom 330.
 —, Einphasennetz 329.
 Leistungsmesser 319.
 Leistungsmessung, Gleichstrom 316.
 —, Wechselstrom 319—327.
 Leitwert 345.
 Luftdruck 24.
 —, Messung 341.
 Lüfter, Leistungsbedarf 24.
 Luftgeschwindigkeit 23, 342.
 Luftmenge 23.
 Luftspaltänderung, Hauptpol 224.
 —, Wendepol, Einankerumformer 256.
 — —, Gleichstrommaschine 215, 216.
 Luftspaltleistung, Asynchrongenerator 111.
 —, Asynchronmaschine 78.
 —, Asynchronmotor 96, 98.
 Luftwiderstand 24.

 Magnetisierung, Drehstromerregmaschine 305.

- Magnetisierung, Drehstromreihenschlußmotor 290.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 296 bis 298.
 —, Frequenzwandler 306.
 —, Repulsionsmotor 302.
 Magnetisierungskurve 13.
 Magnetisierungsstellung, Drehstromreihenschlußmotor 284, 290.
 —, Repulsionsmotor 300.
 Mechanischer Lauf 16.
 Meßbrücke s. Brücke.
 Meßgenauigkeit 312.
 Meßgeräte 312ff.
 Meßkonstante 312ff.
 Motorverfahren, allgemein 13.

 Nebenschlußgenerator, fremderregter 232.
 — —, mit Gegenstromwicklung 233.
 —, selbsterregter 231.
 — —, mit Hauptstromwicklung 232.
 Nebenschlußmotor, Drehstrom-, läufergespeister 277.
 — —, ständergespeister 258.
 — — —, mit Einfachdrehregler 263.
 —, Gleichstrom- 237.
 — —, mit Hauptstromwicklung 240.
 Nebenwiderstand 314.
 negative phase sequence reactance 182.
 Nennnritfallmoment 186.
 Nennkurzschlußspannung, Transformator 69.
 Neutrale Bürstenstellung, allgemein 9.
 Nullpunktsbelastbarkeit 59, 60.
 Nullpunktswiderstand 11, 146, 323, 327.
 Nullreaktanz, Synchronmaschine 182.
 —, Transformator 71.

 Objektiver Geräuschmesser 339.
 Oerstitplatten 221.
 Ortskurven, Einphasenreihenschlußmotor 298.
 —, Synchronmaschine 170.
 — s. auch Diagramm.
 Ossanna 101, 107.

 Parallellauf, Gleichstrommaschinen 206ff.
 —, Transformatoren 60.
 Parallelschalten, Synchronmaschinen 164.
 —, Transformatoren 61.
 Pascalsche Schnecke 175.
 Pendelmaschine 47ff.
 —, Bestimmung des Wirkungsgrades mit der 50.
 —, Korrekturdrehmoment 51.
 Pendelneigung, elektrische Welle 132.

 Periodenwandler 117ff.
 Periodenzahl s. Frequenz.
 Phasenlampen 164.
 —, Dunkelschaltung 164.
 —, Hellschaltung 164.
 Polarität, Einankerumformer 254.
 —, Gleichstrommaschine 219.
 Polumschaltbare Asynchronmaschine 107.
 Potierdreieck 173, 183.
 —, Reaktanz 183.
 —, Spannung 172, 173, 183.
 Phasenfolge, Kommutatorbürsten, Drehstromerregtermaschine, ständerlose 305.
 —, Frequenzwandler 306.
 —, Kommutatormaschine, ständererregte 308.
 Pichelmayersche Formel 209.
 Probelauf s. Dauerlauf.
 Pronyscher Zaum 47.

 Quersfeldmaschine 235.
 Querstellung, Synchronmaschine, Reaktanzen 178—182.

 Reaktanz, gegenläufige, Synchronmaschine 182.
 —, Hauptfeld- 178.
 —, Kurzschluß-, Transformator 70.
 —, Null-, Synchronmaschine 182.
 — —, Transformator 71.
 —, Potier- 183.
 —, Ständerstreu- 156.
 —, Stoßkurzschluß- 181.
 — —, flüchtige 179.
 —, synchrone 178.
 Reaktanzspannung, Einphasenreihenschlußmotor 291ff.
 —, Gleichstrommaschine 208.
 —, Kommutatormaschine, ständererregte 309.
 Reduktionsfaktor, Ankerkupferverluste Einankerumformer 251, 252.
 Regelkennlinien, Gleichstrommaschine 197.
 —, Synchronmaschine 168.
 Regelspannung 145, 258, 263, 279.
 Regelwiderstand, Asynchronmotor 106.
 Reibungsverluste 14, 43.
 —, Asynchronmotor 81, 97.
 —, Einankerumformer 257.
 —, Gleichstrommaschine 218, 227, 229.
 —, Synchronmaschine 157, 190.
 Reihenschlußmotor, Drehstrom- 283ff.
 — —, mit doppeltem Bürstensatz 289.
 —, Einphasen- 291ff.
 —, Gleichstrom- 241.
 —, Repulsionsmotor 299ff.
 Relative Ohmsche Spannung 69.

- Reluktanzmotor 173.
 Remanenzspannung 219.
 Repulsionsmotor 299ff.
 Rosenbergmachine 235.
 Rotationsspannung 292, 304, 309.
 Rückarbeitsverfahren 39ff.
 —, Drehregler 140.
 —, Gleichstrommaschine 39.
 —, Synchronmaschine 40.
 —, Transformator 73.
- Sattelbildung der Drehmomentkurve 88.
 Sättigungskurve 13.
 Schaltgruppen, Transformatoren 58ff., 72.
 —, Kontrolle 67.
 —, Tabelle 59.
 Schaltschema, Gleichstrommaschine 192.
 Schaltung, Transformatoren, Prüfung 67.
 Schenckscher Schwingungsmesser 338.
 Scherbiusmaschine 311.
 Schleifringsspannung, Einankerumformer 246.
 —, Frequenzwandler 306, 307.
 —, Gleichstrommaschine, Spannungsteilung 243.
 Schleuderprobe 15.
 Schlupf 77, 98, 112, 114, 151, 155.
 —, Kipp- 87.
 — aus Diagramm 104.
 —, Messung, Schlupfspule 90.
 — —, stroboskopisch 92.
 —, Zungenfrequenzmesser 93.
 Schlupfspannung 77, 145, 146, 258.
 Schlupfspule 90, 91.
 Schragmotor 277ff.
 Schwingungsmessung 338.
 Schwungmoment, Messung, Auslauf 34.
 Segmentspannung, Einphasenreihenschlußmotor 296.
 —, maximale, Gleichstrommotor 239.
 Selbsterregter Nebenschlußgenerator 231.
 — — mit Hauptstromwicklung 232.
 Selbsterregung, Drehstromnebenschlußmotor 271.
 —, Drehstromreihenschlußmotor 271.
 —, Gleichstrommaschine 219.
 —, Kommutatormaschine, ständererregte 311.
 Selbstmordschaltung, Einankerumformer 254.
 —, Gleichstrommaschine 220.
 short-circuit ratio 177.
 Shunt s. Nebenwiderstand.
 Spaltpolumformer 250.
 Spannungsänderung, Drehregler 139.
 —, Synchronmaschine 171.
- Spannungsänderung, Transformator 64.
 Spannungskurve 157.
 Spannungsmesser 316, 319.
 Spannungsmessung, Gleichstrom 316.
 —, Wechselstrom 319.
 Spannungsregelung, Einankerumformer 249.
 Spannungsteilung 242ff.
 —, Ausgleichsätze 243.
 —, Maschinen mit 242.
 Spannungswandler 319.
 Sparschaltung, Transformator 58, 75.
 Spezifisches Gewicht 345.
 Spezifische Wärme 345.
 Sprungwellenprobe 6.
 —, Transformator 71.
 Stabilisierte Erregermaschine 220.
 Stabilität, Belastungsversuche 56.
 —, elektrische Welle 128.
 —, Gleichstrommotoren 237.
 Ständergespeister Drehstromnebenschlußmotor 258ff.
 — — mit Einfachdrehregler 263ff.
 Ständerlose, eigenerregte Drehstromerregmaschine 303.
 — — — mit Vordermotor 152.
 Ständerloser Frequenzwandler 305.
 — — mit Vordermotor 150.
 Ständererregte Kommutatormaschine 307ff.
 Ständerstreuspannung 156.
 Staffe­lung der Bürsten, Gleichstrommaschine 217.
 — der Pole, Synchronmaschine 157, 158.
 Stempelung, Asynchronmotor 100.
 Stoßkurzschlußdrehmoment, Asynchronmotor 87.
 —, Synchronmaschine 162.
 Stoßkurzschlußreaktanz 181.
 —, flüchtige 179.
 Stoßkurzschlußstreu­spannung, relative 162.
 Stoßkurzschlußstrom 161, 180.
 —, flüchtiger 161, 180.
 —, Transformator 70.
 Stoßkurzschluß-Gleichstrom 161.
 Stoßkurzschluß-Wechselstrom 161, 180.
 Stoßkurzschlußverhältnis 162.
 Stoßkurzschlußversuch, Synchronmaschine 160.
 Streublindwiderstand (s. auch Reaktanz) 156.
 Streufaktor, Asynchronmotor, nach Heyland, Ossanna 107.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 296, 297.
 Streuprobe, ohne Induktor 156.
 Streureaktanz (s. auch Reaktanz) 156.

- Streuspannung, Synchronmaschine 156.
 —, Transformator 69.
 Stroboskopische Drehzahlmessung 338.
 — Schlupfmessung 92.
 Strommesser 313, 316.
 Strommessung, Gleichstrom 313.
 —, Wechselstrom 316.
 Strom-Spannungsverfahren, Widerstandsmessung 332.
 Stromverdrängungsläufer 85, 90.
 Stromwandler 317, 318.
 Stromwärmeverluste s. Lastverluste, Erregerverluste.
 Stromwendung, Einankerumformer 256.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 293.
 — —, Untersuchung 294.
 —, Gleichstrommaschine 208 ff.
 — —, elektrische Untersuchung 214.
 — —, mechanische Untersuchung 212.
 —, ständererregte Kommutatormaschine 311.
 subtransient reactance 179.
 Synchronisierte Asynchronmaschine 121 ff.
 Synchrone Drehzahl 77.
 — Kompensationsspannung 266.
 — Reaktanz 178.
 Synchrones Drehmoment 187.
 Synchronisierendes Drehmoment 187.
 Synchronisierung, elektrische Welle 131.
 —, Synchronmaschine 164.
 Synchronmaschinen 155 ff.
- Tachometer** 337.
 Tangentenverfahren, Hochlauf 30, 31.
 Tastschwingungsschreiber, Askania 338.
 Temperaturlauf s. Dauerlauf.
 Temperaturmessung 339.
 Thermische Abbildung, Transformator 74.
 Thermoelement 339.
 Thermometer 339.
 —, Widerstands- 340.
 Thomsonbrücke 334.
 Toleranzen, Asynchronmotor 100.
 —, Gleichstrommaschinen 231.
 —, Synchronmaschinen 191.
 —, Transformatoren 76.
 Torsionsstab, Viewegscher 343.
 Tourendynamo 337.
 Transformator 57 ff.
 —, Prüfung des Kernes 64.
 —, Prüfung des gewickelten Transformators 66.
 —, Prüfung des fertigen Transformators 71.
 Transformatoridiagramm, allgemeines 61.
 —, Kappsches 63.
- Transformatorspannung, Einphasenreihenschlußmotor 291, 293, 296.
 —, ständererregte Kommutatormaschine 309.
 —, Repulsionsmotor, Derimotor 302.
 transient reactance 181.
 Trennung der Verluste, Asynchronmotor 81.
 — — —, Auslaufverfahren 37.
 — — —, Gleichstrommaschine 219.
 — — —, Motorverfahren 14.
 — — —, Synchronmaschine 157, 160.
- Übererregung**, Einankerumformer 249.
 —, synchronisierte Asynchronmaschine 121.
 —, Synchronmaschine 167.
 Übererregungsverfahren 42.
 Übergangswiderstand s. Bürstenübergangswiderstand.
 Übergangsverluste s. Bürstenverluste.
 Überkommutierung 210.
 Überkompensation, Einphasenreihenschlußmotor 293, 295.
 Überlastbarkeit, Asynchronmotor 107.
 —, synchronisierte Asynchronmaschine 124.
 —, Synchronmaschine 177, 188.
 Übersetzung, mechanische, Drehregler zum Bürstenjoch 265, 269.
 —, zweier Bürstensätze 279.
 Übersetzungsverhältnis, Asynchronmaschine 80.
 —, Drehregler 137.
 —, Drehstromreihenschlußmotor 286.
 —, Periodenwandler 119.
 —, Transformator 66, 72.
- Übertemperatur** 19.
 Umkehr der Drehrichtung s. Drehrichtungswechsel.
 Umkehrstellung 259, 267, 268, 281.
 Umlaufzähler 337.
 Umpolen, Einankerumformer 254.
 —, Gleichstrommaschine 220.
- Unstabilität, Belastungsversuche 56.
 —, Gleichstrommotoren 237.
 Unterdrückerwicklung 309, 311.
 Untererregung, Einankerumformer 249.
 —, Synchronmaschine 166.
 Untererregungsverfahren 42.
 Unterkommutierung 210.
- Vektordiagramm** s. Diagramm.
 Verbundgenerator 232, 233.
 Verbundmotor 240.
 Verluste (s. auch Eisen-, Leer-, Last-, Reibungs-, Zusatzverluste), Einzel- 43.
 —, Messung im Auslauf 37.
 —, Trennung im Auslauf 37.

- Vorwiderstand 316, 319.
V-Kurven 169.
- Wasserwiderstand 46.
- Wechselstromkommutatormaschinen 258 ff.
- Weicheisengerät s. Dreheisengerät.
- Welle s. elektrische Welle.
- Welligkeit, Gleichspannung 227.
- Wendefeld, Einphasenreihenschlußmotor 293.
 —, Gleichstrommaschine 209, 210.
 —, Kommutatormaschine, ständererregte 309.
- Wendepollose Maschinen 210.
- Wendepollluftspalt, Einankerumformer 246.
 —, Gleichstrommaschine 215.
- Wendespannung, Einphasenreihenschlußmotor 293 ff.
 —, Gleichstrommaschine 209.
- Wheatstone-Brücke 335.
- Wickelsinn und Wickelachse 7 ff.
- Wicklungsprobe, allgemein 5.
 —, Transformator 71.
- Wicklungen, Ausmessung, induktive, Gleichstrommaschine 8.
 — — —, Strom- und Spannungswandler 12.
- Widerstand, induktiver 336.
 —, kapazitiver 337.
- Widerstandsmessung, allgemein 2 ff.
 —, Strom- und Spannungsverfahren 332.
 —, Thomsonbrücke 334.
 —, Wheatstone-Brücke 335.
- Widerstandsthermometer 340.
- Windungsprobe, allgemein 6.
 —, Transformator 72.
- Winkelkompensationsspannung 266, 280.
- Wirkungsgrad 38 ff.
 —, direkte Bestimmung 38.
- Wirkungsgrad, Einzelverlustverfahren 43.
 —, indirekte Bestimmung 39.
 —, Kennlinie 44.
 —, Rückarbeitsverfahren 39 ff.
 —, Über- und Untererregungsverfahren 42.
- Wirkungsgradermittlung, Asynchronmotor 96.
 — — bei Widerstandsregelung 100.
 — — mit Drehstromerregemaschine 154.
 —, Drehstromnebenschlusmotor 276.
 —, Drehstromreihenschlußmotor 290.
 —, Einankerumformer 257.
 —, Einphasenreihenschlußmotor 298.
 —, Gleichstrommaschine 227.
 —, Repulsionsmotor 303.
 —, Schragemotor 283.
 —, Synchronmaschine 189.
 —, Transformator 64.
 Wismut 227.
- Z**aum, Pronyscher 47.
- zero phase sequence reactance 182.
- Zungenfrequenzmesser 330.
 —, Drehzahlmessung 338.
- Zusatzmaschine 249.
- Zusatzverluste 43.
 —, Drehregler 139.
 — nach REM 44.
 —, Synchronmaschine 159.
 —, Transformator 69.
- Zusatzwiderstand 228, 229.
- Zusetzen von Ankerstrom in Wendepolwicklung, Einankerumformer 256.
 — — —, Einphasenreihenschlußmotor 294.
 — — —, Gleichstrommaschine 216.
- Zweileistungsmesserschaltung, Blindleistung 326.
 —, Wirkleistung 325.
- Zwischentransformator 286.