

Die elektrische Kraftübertragung

Von

Dipl.-Ing. Herbert Kyser

Oberbaurat, Wehrwirtschaftsführer

unter Mitarbeit von

Dipl.-Ing. Karl Heinz Kyser

Dritter Band

Bau und Betrieb des Kraftwerkes

Zweiter Teil

**Die elektrische Ausgestaltung des Kraftwerkes und der Übertragung,
Stromerzeugung, Schalt- und Sicherungsanlagen für Kraftwerk und
Netz, Entwurfsgestaltung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit**

Dritte

vollständig umgearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 486 Abbildungen, 51 Zahlentafeln
und 32 Beispielen



Berlin

Verlag von Julius Springer
1940

ISBN-13:978-3-642-90003-7 e-ISBN-13:978-3-642-91860-5
DOI: 10.1007/978-3-642-91860-5

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

Copyright 1940 by Julius Springer in Berlin
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1940

Vorwort.

Mit dem zweiten Teil des III. Bandes, den ich diesmal mit meinem Sohn, Dipl.-Ing. Karl Heinz Kyser, zusammen bearbeitet habe, schließe ich die dritte Auflage der „Kraftübertragung“. Es ist mir wiederum zunächst Bedürfnis, allen Mitarbeitern, insbesondere den Elektrizitätsfirmen, für ihre wertvolle und jederzeit bereitwillige Unterstützung zu danken.

Die durch die Taten des Führers herbeigeführte Wiedergesundung der Wirtschaft und der Vierjahresplan haben einen außerordentlich gesteigerten Leistungsbedarf und daraus die kaum geahnte Entwicklung des Kraftwerksbaues in den letzten Jahren zur Folge gehabt. Somit bedarf es noch mehr als bisher der Beherrschung der Grundlagen für die Wahl der Maschinen, die Beurteilung der Schalt- und Sicherheitseinrichtungen, die Gestaltung der Schaltanlagen und nicht zuletzt auch für die wirtschaftlichen Untersuchungen zugleich mit Fragen der Betriebsgestaltung und Betriebsführung. Hinzu kommt der in immer größerem Umfang zur Durchführung kommende Verbundbetrieb größter Netze und Kraftwerke, der im Frieden zweifellos noch eine weitere Ausgestaltung erfahren wird. Diese Grundlagen für den elektrischen Teil des Kraftwerkes und für die betriebliche Netzausrüstung soll der vorliegende Band den Studierenden, dann aber auch unsern Jungingenieuren und den Fachkollegen an die Hand geben.

Von der Sonderbehandlung der Bauformen irgendwelcher Schalt- oder sonstigen Geräte und Einrichtungen, wie sie zur Zeit auf den Markt gebracht werden, ist wiederum vollständig abgesehen worden. Das Werk soll darin unabhängig sein und infolgedessen nicht der schnellen Veraltung anheimfallen. Nur die Gesichtspunkte, Erwägungen und Bedingungen im Rahmen einer jeweils gestellten Aufgabe werden behandelt und wo erforderlich mit Beispielen und Unterlagen, die den tatsächlichen Betriebsverhältnissen Rechnung tragen, versehen.

Bei der Fülle des Stoffes mußte eine besonders sorgfältige Auswahl und eine knappe Behandlung in Wort und Bild gewählt werden. Ich bin mir bewußt, daß daher auch dieser Band die ihm zugrunde liegende Aufgabe nicht erschöpfend behandelt. Aus den jahrzehntelangen eigenen Erfahrungen ist aber alles das herausgegriffen worden, was zu den Grundlagen der Stoffbehandlung zu zählen ist. Wiederum wird manche kurze Wiederholung zu finden sein, die aus dem gleichen Grunde bewußt vorgenommen wurde, der bereits im Vorwort zum ersten Teil des dritten Bandes gekennzeichnet ist.

Um höchste Betriebssicherheit und beste Wirtschaftlichkeit zu erreichen, muß sich der ein Kraftwerk entwerfende Ingenieur nach allen

Seiten fortlaufend unterrichten. Das Studium der Zeitschriftenaufsätze und Druckschriften, die in ihrer Kürze oft wesentliche Vorkenntnisse voraussetzen, wird erleichtert, wenn für auftauchende Grundfragen auf ein Nachschlagewerk zurückgegriffen werden kann. Dieses soll in der nunmehr abgeschlossenen dritten Auflage der „Kraftübertragung“ in noch größerem Umfang als bisher geschaffen sein.

Ich spreche die Hoffnung aus, daß auch dieser Schlußband eine gute Aufnahme in allen Fachkreisen finden möge.

Der Verlagsbuchhandlung Julius Springer sei an dieser Stelle besonders für die große und stets bereite Hilfe bei der Ausstattung und Drucklegung gedankt.

Dem Fortschritt der deutschen Energiewirtschaft ist das Werk gewidmet.

Weimar, im Dezember 1939.

Heil Hitler!

Kyser.

Inhaltsverzeichnis.

Erster Abschnitt.

Die Gleichstromerzeuger, Akkumulatoren und Wechselstromerzeuger.

	Seite
1. Die Stromerzeuger im allgemeinen	1
2. Die Gleichstromerzeuger.	4
a) Allgemeines	4
b) Der elektrische Aufbau.	5
Die Leistung S. 5. — Die Stromwendung S. 6. — Die Spannung S. 6. — Die Spannungsänderung S. 7.	
c) Die Gleichstrom-Nebenschlußmaschine mit Selbsterregung	8
Die Arbeitsweise S. 8. — Die Betriebskennlinien S. 11. — Die Spannungsregelung S. 14. — Das Parallelschalten und der Parallelbetrieb S. 21. — Das Anwendungsgebiet S. 21.	
d) Die Gleichstrom-Nebenschlußmaschine mit Fremderregung	22
e) Die Gleichstrom-Doppelschlußmaschine	23
Die Arbeitsweise S. 23. — Die Betriebskennlinien S. 24. — Das Parallelschalten und der Parallelbetrieb S. 26. — Das Anwendungsgebiet S. 27.	
f) Stromerzeugung für Dreileiternetze	28
In Reihe geschaltete Maschinen S. 28. — Stromerzeuger mit Spannungsteiler S. 29. — Spannungsteilung durch einen besonderen Ausgleichmaschinensatz S. 30. — Spannungsteilung durch eine Batterie S. 31.	
3. Die Akkumulatoren (Sammler).	34
a) Die Anwendung	34
b) Die Zellenzahl und die Batteriegröße	35
c) Der Wirkungsgrad	41
d) Die Zellschalter	41
e) Das Schaltbild für Zweileiteranlagen	44
Ladung der Batterie durch Regelung der Hauptmaschinen S. 44. — Ladung durch Gruppenunterteilung der Batterie S. 47. — Ladung mit einer Zusatzmaschine S. 48.	
f) Das Schaltbild für Dreileiteranlagen	50
g) Besondere Schaltungen	52
h) Die Batterie für Steuer- und Sicherheitseinrichtungen (Betätigungsbatterie)	53
i) Die Pufferung von Belastungsstößen	55
Die Zusatzmaschine mit Nebenschluß- und Hauptschlußwicklung in Gegenschaltung S. 57. — Die Pirani-Schaltung S. 61.	
k) Die Akkumulatorenräume in bautechnischer Hinsicht	63
4. Die Synchron-Wechselstromerzeuger	65
a) Leistung, Leistungsfaktor, Erregung	65
b) Die Überlastung	79
c) Der Wirkungsgrad	81
d) Die Spannung	81
e) Die Kennlinien für Spannung, Strom und Feld (Oberwellen)	84
f) Die Spannungsänderung	91
g) Die Erregung	94
Eigenerregung S. 94. — Fremderregung S. 101.	
h) Die Spannungsregelung im Kraftwerk	105
i) Die Betriebskennlinien	110

	Seite
5. Der mechanische Aufbau der Stromerzeuger	111
a) Einleitung	111
b) Die Drehzahl	112
c) Gewichte und Abmessungen	114
d) Die Lage des Kraftwerkes	115
e) Die Geräuschbildung	116
f) Die Angebotsbeurteilung	118
g) Kühlung und Lüftung	120
h) Die Luftreinigungsanlagen	125
Die Entnahme der Kühlluft S. 127. — Die Luftfilter S. 128. — Die	
Naßluftfilter S. 131. — Die Abluft S. 132. — Die Anlage der Luftkanäle	
S. 134. — Die Berechnung der Kanalquerschnitte S. 138.	
i) Die Umlaufkühlung	140
k) Besondere Kühlmittel	147
6. Der Aufbau der Gleichstrommaschine	149
7. Der Aufbau der Synchronmaschine	150
Der Ständer S. 150. — Der Läufer S. 158. — Das Gehäuse S. 163. —	
Das Fundament S. 164. — Die Lager S. 165. — Die Schleifringe S. 165. —	
Die Anschlußklemmen S. 165. — Stromerzeuger für Wasserturbinen-	
antrieb mit stehender Welle S. 165.	

Zweiter Abschnitt.

Der Parallelbetrieb (Verbundbetrieb, Kraftwerkekupplung) von Wechselstrommaschinen.

8. Der Parallelbetrieb	176
Einleitung S. 176. — Die synchrone Leistung S. 180. — Die Eigen-	
schwingungen der Synchronmaschine S. 189. — Die erzwungenen Schwin-	
gungen S. 201. — Die selbsterregten Schwingungen S. 206. — Angebots-	
unterlagen S. 208.	
9. Das Parallelschalten	210
Das Parallelschalten im allgemeinen S. 210. — Die selbsttätige Parallel-	
schaltung S. 213.	
10. Der Kraftwerkezusammenschluß (Verbundbetrieb)	215
Spannungs- und Leistungsverhältnisse S. 215. — Betriebsverhältnisse	
S. 219. — Steuereinrichtungen S. 222.	
11. Der Drehstrom-Asynchronstromerzeuger	226
Die Arbeitsweise S. 226. — Die Einwirkung auf das Mutterwerk S. 229.	
Zusatzwerk mit Synchronstromerzeugern S. 231. — Die Betriebsverhält-	
nisse im Zusatzwerk S. 232. — Die selbsterzeugte Blindleistung S. 233.	

Dritter Abschnitt.

Die Schalt- und Schutzeinrichtungen.

Grundsätzliches	235
12. Die Schalt- und Schutzgeräte für Gleich- und Wechselstrom bis 1 kV.	236
a) Die Hebelschalter	236
b) Die Schmelzsicherungen	237
c) Die Selbstschalter	241
d) Der Netzschutz für Spannungen bis 500 Volt Gleichstrom oder	
Wechselstrom	247
13. Die Beanspruchung der Anlageteile durch Kurzschlußströme	249
a) Gleichstrom	249
b) Wechselstrom	251
c) Die überschlägliche Berechnung des Abschalt-, sowie des Stoßkurz-	
schlußstromes an der Kurzschlußstelle	256
d) Widerstände der Maschinen und der Leitungsanlage	258
e) Der Kurzschlußphasenwinkel φ	266
f) Die Berechnung des Stoßkurzschlußstromes	268

Inhaltsverzeichnis.

VII

	Seite
g) Die Berechnung des Kurzschlußabschaltstromes	269
h) Die Berechnung des Dauerkurzschlußstromes	269
i) Maßnahmen zur Verminderung oder örtlichen Begrenzung der Kurzschlußströme und ihrer Folgen	274
k) Die Berechnung der Kurzschlußströme in mehrfach gespeisten Netzen	289
l) Die Kurzschlußströme in Drehstrom-Niederspannungsnetzen bis 500 V	295
m) Die Kurzschlußbeanspruchung der Maschinen.	296
n) Die Erwärmung der Schaltanlage-teile durch Kurzschlußströme	297
14. Die Schalt- und Schutzgeräte für Wechselstrom über 1 kV	308
a) Die Hochspannungs-Schmelzsicherungen	308
b) Die Wechselstrom-Hochspannungsschalter im allgemeinen	311
c) Die Trennschalter (Trenner)	313
d) Der Leistungsschalter	317
e) Die Schalter-Antriebsvorrichtungen	323
f) Die Meldeeinrichtungen	334
g) Selbsttätige Wiedereinschaltvorrichtung	334
h) Der Leistungstrennschalter	336
15. Der Fehlerschutz in Hochspannungsanlagen in Verbindung mit dem Leistungsschalter.	339
a) Der Auslöser	339
b) Die Fehlerschutzmeßwerke (Relais)	341
c) Das Spannungsrückgangs- oder Nullspannungsmeißwerk	344
d) Spannungserhöhung	345
e) Das Überlast- und Überstrommeißwerk	346
Schnellauslösung S. 347. — Stromabhängige Zeitauslösung S. 347. —	
Wärme-Überstrommeißwerk S. 348. — Stromunabhängige Zeitaus-	
lösung S. 350.	
f) Das Energierichtungsmeißwerk.	353
g) Das widerstandsabhängige Meißwerk (Impedanz-, Reaktanz-, Distanz-	356
relais)	
h) Das Spannungsabfallmeißwerk	364
i) Der Stromvergleichsschutz (Differentialschutz)	364
k) Der Stromerzeugerschutz gegen äußere Störungen.	367
l) Der Schutz gegen innere Maschinenstörungen.	368
m) Löschvorrichtungen gegen Maschinenbrand	378
n) Der Umspannerschutz	382
o) Der Sammelschienenschutz im Kraftwerk	384
16. Die Schutzvorrichtungen gegen Überspannungen.	384
a) Die Art der Überspannungen	384
b) Die atmosphärischen Vorgänge	386
c) Die Gewitterwirkungen	388
d) Die inneren Überspannungen	393
e) Die Überspannungsschutzgeräte	395
Die Schutzvorrichtungen gegen äußere ruhende Überspannungen	
(Erdungswiderstand, Erdungsdrosselspule) S. 396. — Die unmittelbare	
Erdung des Nullpunktes S. 397. — Die Schutzvorrichtungen gegen	
innere und äußere schwingende Überspannungen S. 398. — Die selbst-	
löschende Funkenstrecke S. 413.	
f) Der Erdschluß.	416
g) Die Erdschlußlöschung (Erdschlußkompensierung)	421
Die AEG- und BBC-Löschspule S. 423. — Der Löschumspanner der	
SSW S. 427. — Betriebseinzelheiten S. 429.	
h) Die Spannungsresonanz.	430
17. Die Betriebsüberwachungsgeräte	431
a) Die Meißgeräte	431
b) Die Meißwandler	437
Der Spannungswandler S. 439. — Die Kondensatordurchführungen	
S. 446. — Der Stromwandler S. 446. — Zusammengesetzte Strom- und	
Spannungswandler S. 454.	
c) Die Melde- und Verständigungseinrichtungen	455

	Seite
18. Die Schalt- und Bedienungsanlagen	458
a) Einleitung, Grundbedingungen	458
b) Das Schaltbild	460
Gleichstrom S. 460. — Die Batterieschaltbilder S. 464. — Wechselstrom S. 464.	
c) Die Schaltanlage. Allgemeines	471
Die Schaltanlage für Niederspannung S. 472. — Die gekapselten Verteilungsanlagen für Niederspannung S. 476. — Die Kraftwerksbedienungsanlage S. 477. — Die Schalttafel S. 478. — Das Schaltpult S. 482. — Der Platz für die Bedienungsanlage S. 486. — Die Schaltwarte S. 487. — Das Leuchtschaltbild S. 493. — Die Netzbefehlsstelle S. 495.	
d) Die Geräteanlagen bis 1 kV.	496
e) Die Geräteanlagen über 1 kV	497
f) Der Platzbedarf und der innere Aufbau	507
g) Die stahlgekapselten Verteilungsanlagen für Hochspannung	520
h) Baueinzelheiten	522
i) Die Kraftwirkungen der Kurzschlußströme	525
k) Resonanzerscheinungen bei Kurzschluß	528
l) Die mechanische Festigkeit der Schaltanlagenteile	529
m) Die Isolatoren und Leiterdurchführungen; der Sicherheitsgrad	532
Isolierkörper aus Faserstoff oder Kunstharz S. 536.	
n) Die Leiterbaustoffe und ihre Verlegung	537
o) Die Erdung	546

Vierter Abschnitt.

Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen.

19. Die Wirtschaftlichkeit.	548
a) Einleitung.	548
b) Die Anlagekosten	549
c) Die Selbstkostenberechnung	553
Die Verzinsung S. 554. — Die Abschreibungen S. 556. — Der jährliche Kapitaldienst S. 559. — Die Verwaltungs- und Geschäftskosten S. 559. — Die Steuern und öffentlichen Abgaben S. 560. — Die Versicherungen S. 560. — Besondere Rücklagen S. 560. — Die Betriebskosten S. 561. — Die Bedienungskosten S. 564. — Instandhaltung und Ausbesserungen S. 565. — Kühl- und Speisewasser S. 565. — Schmier- und Putzstoffe S. 566. — Zusammenfassung S. 566. — Verkaufspreisbildung S. 566. — Beispiel S. 567.	
20. Die Verrechnungs-Meßgeräte.	570
a) Die Zähler	570
b) Die Zähler mit Höchstlastanzeiger	575
21. Betriebswirtschaftliche Angaben	579
22. Der Stromversorgungsvertrag	585
a) Vertragsgrundlagen.	585
b) Mustervertrag	587
VDE-Bestimmungen	595
Formelzeichen	597
Sachverzeichnis	606

Die Gleichstromerzeuger, Akkumulatoren und Wechselstromerzeuger.

1. Die Stromerzeuger im allgemeinen.

Die Stromerzeuger haben elektrisch und baulich einer Reihe von Bedingungen zu genügen, die sich aus der Art der Antriebsmaschinen, der Abnahmeigenart des Stromversorgungsgebietes, bei Fabrikanlagen auch aus der Arbeitsweise der Motoren und der Betriebsweise der gesamten Kraftübertragungsanlage ergeben. Einzelheiten hierzu sind, insbesondere soweit sie mit den Antriebsmaschinen, der Aufteilung einer bestimmten Leistung auf mehrere Maschinen und der Wahl der Stromart zusammenhängen, bereits im Band III/1 behandelt worden. Auf die Forderungen, die der Betrieb in elektrischer Beziehung zu stellen hat, wird bei der Besprechung der Stromerzeuger näher eingegangen, während die bauliche Durchbildung zusammengefaßt im 5. Kap. behandelt ist.

Dem elektrischen Aufbau der Stromerzeuger im allgemeinen werden für deutsche Anlagen die vom Verband Deutscher Elektrotechniker festgesetzten „Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen REM“ zugrunde gelegt¹. Andere Länder haben ähnliche Vorschriften ebenfalls durch ihre Hauptverbände oder amtlichen Stellen herausgegeben, die für die Lieferung deutscher Erzeugnisse oft vorgeschrieben werden. Auf sie näher einzugehen würde zu weit führen und hat auch keine allgemeine Bedeutung.

Aus den REM sind der Behandlung der Stromerzeuger einige Hauptbestimmungen voranzustellen, die für die elektrischen Verhältnisse im allgemeinen und auch im besonderen von grundlegender Bedeutung sind.

Die Leistung ist bei Gleichstrom in Kilowatt (kW), bei Wechselstrom in Kilo-Volt-Ampere (kVA) oder in Mega-Volt-Ampere (MVA) bzw. in Kilowatt oder Megawatt ($MW = 1000 \text{ kW}$) bei einem bestimmten Leistungsfaktor $\cos \varphi$ nacheilend anzugeben und zwar mit der Bemerkung, ob sie als Nenn- oder Dauerleistung anzusehen ist und welche Erwärmung die Maschine dabei in ihren einzelnen Teilen erreicht. Über die zulässigen Temperaturen sind in den REM besondere Angaben

¹ VDE 0530/XII 1937.

gemacht, die sich auf die Dauerleistung (Nennleistung) beziehen. Da aber jeder Stromerzeuger so gebaut wird, daß er bei den Nennwerten von Spannung, Drehzahl, Leistungsfaktor und Erregerspannung im betriebswarmen Zustand für eine bestimmte Zeit ohne Beschädigung oder bleibende Formänderung überlastet werden kann z. B. nach den REM mit dem 1,5fachen Nennstrom während 2 min, muß bei der Leistung auch hinsichtlich der Überlastungsfähigkeit eine Angabe gemacht werden. Diese Überlastung spielt für die Stromerzeuger als Aushilfs- und Spitzenmaschinen eine besondere Rolle, doch muß sie im Einklang mit der Überlastbarkeit der Antriebsmaschine stehen. Ferner ist bei der Festsetzung der Dauerleistung darauf Rücksicht zu nehmen, ob die Maschine ununterbrochen Tag und Nacht vollbelastet im Betrieb ist oder ob z. B. nach einem 8stündigen Betrieb eine Ruhepause bzw. wesentliche Entlastung von mehreren Stunden eintritt. Das erstere ist in der Regel bei allen Gleichstrommaschinen für elektrochemische Zwecke, das letztere zumeist bei allen Ein- und Mehrphasenwechselstrommaschinen und bei Gleichstrommaschinen in Elektrizitätswerken, Fabriken usw. dann der Fall, wenn eine Akkumulatoren-batterie vorhanden ist, die die Stromlieferung während des Maschinenstillstandes (nachts und Festtags) übernimmt.

Die REM legen hierzu fest:

Für die Auslegung der Maschine ist der Nennbetrieb bestimmend.

Der Nennbetrieb ist gekennzeichnet durch die Werte, die auf dem Maschinenschild genannt sind. Diese Werte und die aus ihnen abgeleiteten werden durch den Zusatz „Nenn-“ gekennzeichnet (Nennleistung, Nennspannung, Nennstrom, Nenn-drehzahl).

Leistungsabgabe ist die abgegebene Leistung des Stromerzeugers an den Klemmen der Maschine.

Leistungsaufnahme ist die aufgenommene Leistung an der Stromerzeugerwelle, also die Leistung der Antriebsmaschine (Leistungsabgabe + Verluste).

Soll der Stromerzeuger im Dauerbetrieb mit bestimmter kurzzeitiger Überlastung gefahren werden können, kurzzeitiger Betrieb (KB) oder Dauerbetrieb mit kurzzeitiger Belastung (DKB), so ist diese Zeitleistung besonders zu vereinbaren zumeist unter der Bedingung, daß die Erwärmung die verbandsmäßigen Grenzwerte nicht überschreiten darf und alle anderen Bestimmungen erfüllt werden. Eine andere Betriebsart kommt für Stromerzeuger nicht in Frage.

Die Spannung der Stromerzeuger ist für alle Stromarten genormt. Es ist genügend Spiel zwischen den genormten Werten gegeben, um alle Vorteile im Maschinen- und Schaltanlagenbau ausnutzen zu können.

Betrieblich von besonderer Bedeutung ist die Spannungsänderung d. h. die Änderung der Stromerzeugerspannung, die den elektrischen Verhältnissen der Maschine bei Laständerung entspricht, wenn Drehzahl und Erregung nicht geändert werden. Sie muß für jede Maschinengattung vom Hersteller angegeben werden und ist nach der Eigenart des Netzes zusammen mit den Spannungsregleinrichtungen zu beurteilen.

Die Drehzahl ist bei Wechselstromerzeugern durch die Frequenz und die Polzahl der Maschine gegeben; bei Gleichstrom ist sie frei; aber auch hier sind in den REM Werte angegeben, die möglichst eingehalten

werden sollen. Die Hersteller der Antriebsmaschinen haben sich in den letzten Jahren den entsprechenden Vorschlägen der REM angepaßt.

Der Wirkungsgrad ist mit ausschlaggebend für die Güte der Maschine. Da die Belastung dauernd schwankt und eine oder mehrere der im Betrieb befindlichen Maschinen nicht immer unter Vollast arbeiten, muß für betriebswirtschaftliche Untersuchungen auch bekannt sein, wie hoch der Wirkungsgrad bei $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ Belastung ist. Außerdem muß angegeben werden, welche Verluste in elektrischer und mechanischer Beziehung in den Wirkungsgradwerten berücksichtigt sind, und wie dieselben gemessen werden sollen. Selbstverständlich ist nur der Gesamtwirkungsgrad einschließlich aller mechanischen und elektrischen Verluste auch derjenigen für die Erregung maßgebend, weil nur dann die Leistung, die die Antriebsmaschine besitzen muß, feststellbar ist, und die Betriebskosten für die erzeugte kWh an den Klemmen des Stromerzeugers berechnet werden können. Das im Band III/1 hinsichtlich des günstigsten Verlaufes der Wirkungsgradkennlinien Gesagte ist zu beachten.

Daß der Wirkungsgrad — und zwar nicht nur bei Vollast, sondern auch bei Teillasten — eindeutig festgelegt wird, ist selbstverständlich. Die REM geben Anweisungen über die Wirkungsgradbestimmung. Dadurch sind Streitigkeiten bei der Abnahmeprüfung weitgehendst vermieden. Es darf aber dabei nicht übersehen werden, daß bei der Auftragserteilung genau vereinbart wird, unter Einschluß welcher Verluste der Wirkungsgrad gelten soll. Es kommen heute hierin leider noch manche Versehen oder Unklarheiten vor, die dann zu unerwünschten Auseinandersetzungen führen.

Für die Gewährleistungen, die der Maschinenhersteller zu übernehmen hat, sind in den REM Toleranzen (zulässiges Spiel) angegeben, die vom Besteller nicht geändert werden sollten, weil derartige Abweichungen die Einhaltung der übrigen REM-Bestimmungen beeinflussen. Die

Zahlentafel 1. Toleranzen.

Gewährleistung für	Toleranzen
Wirkungsgrad η	$\pm \frac{1 - \eta}{10}$ aufgerundet auf $\frac{1}{1000}$; mindestens aber 0,005
Leistungsfaktor $\cos \varphi$ von Asynchronmaschinen	$\pm \frac{1 - \cos \varphi}{6}$ aufgerundet auf $\frac{1}{100}$; mindestens aber 0,02, höchstens 0,06
Spannungsänderung von Stromerzeugern	± 20 vH der gewährleisteten Spannungsänderung; bei Doppelschlußmaschinen aber mindestens 2 vH der Nennspannung
Stoß-Kurzschlußstrom von Synchronmaschinen	± 20 vH des Sollwertes
Dauer-Kurzschlußstrom von Synchronmaschinen	± 15 vH des Sollwertes

Klarheit der Bestellung kann darunter leiden und damit dann später auch die Abnahme der Lieferung. Es sollte stets genügen, daß nach Festlegung der Bauwerte für die Maschine die REM für die Ausführung maßgebend sind. Das Spiel berücksichtigt die unvermeidlichen Uneleichmäßigkeiten in der Beschaffenheit der Rohstoffe, Ungenauigkeiten in der Fertigung und Meßfehler. In Zahlentafel I sind die Toleranzen nach REM zusammengestellt.

2. Die Gleichstromerzeuger.

a) Allgemeines. Über die Stromart als solche mit ihren Vorzügen und Nachteilen ist dem in den Bänden I bis III/1 Gesagten hier nichts mehr hinzuzufügen.

Auch die Stromerzeuger werden entsprechend der Schaltung zwischen Anker und Magnetwicklung eingeteilt in:

- Nebenschlußmaschinen mit Selbsterregung,
- Nebenschlußmaschinen mit Eigenerregung,
- Nebenschlußmaschinen mit Fremderregung,
- Doppelschlußmaschinen.

Die Hauptschlußmaschine hat heute keine Bedeutung mehr und wird daher nicht weiter behandelt.

Für die Angebotseinforderung müssen vom Besteller folgende Angaben gemacht werden:

Leistungsabgabe in kW,
gewünschte Überlastbarkeit in vH der Nennleistung für eine bestimmte Dauer nach bestimmten vorausgegangenen Betriebsverhältnissen,

Spannung in Volt,

Spannungsregelbereich und Angaben über die Spannungsverhältnisse der bereits vorhandenen Maschinen, wenn Parallelbetrieb gewünscht wird,
Art der Erregung und Schaltung des Erregerkreises,

Art der Antriebsmaschine und deren Verbindung mit dem Stromerzeuger, sowie über den Antriebsmaschinenregler und seine Arbeitsweise,

Drehzahl U/min ,

etwaiger besonderer Lastverlauf oder sonstige für die Arbeitsweise bestimmende Betriebsverhältnisse (Parallelbetrieb mit vorhandenen Maschinen, Beschaffenheit der Luft, Aufstellungsort, Bedienung),

Beschränkungen in Einzelgewichten oder Hauptabmessungen, sowie Verhältnisse für Anfuhr, Abladen und Aufstellen.

Das Angebot soll weiter über folgende Einzelheiten Aufschluß geben:

die Einhaltung oder Abweichung von REM-Bestimmungen,

die Spannungsänderung,

den Wirkungsgrad bei Voll- und Teillasten,

die Einzelgewichte, das Gesamtgewicht, die Kranbelastung für die Aufstellung und später für Instandsetzungsarbeiten,

die Hauptabmessungen der Einzelteile für Anfuhr, Einbau und später für Instandsetzungsarbeiten,

Einzelheiten über den elektrischen und mechanischen Aufbau, sowie über die Betriebsbeaufsichtigung, die Betriebsüberwachung, die Vornahme von Instandsetzungsarbeiten am umlaufenden und feststehenden Maschinenteil,

die Bedingungen, die vom Lieferer der Antriebsmaschine zu erfüllen sind (Zusammenbau, Lagerbelastungen, Lagerkühlung).

Wenn erforderlich muß auch der Verkehr zwischen den Herstellern des elektrischen und mechanischen Teiles des Maschinensatzes festgelegt und die gegenseitige Verantwortung eindeutig bestimmt werden, sonst können neben Streitigkeiten und Geldverlusten unliebsame Verzögerungen in der Lieferzeit, der Bearbeitung der Bau- und Fundamentzeichnungen, der Durchführung der Aufstellung und schließlich Abnahmeschwierigkeiten bei der Feststellung des Wirkungsgrades, in der Gesamtarbeitsweise des Maschinensatzes und der Zusammenarbeit der Regelung entstehen.

Je genauer die Angebotsunterlagen bearbeitet sind, um so genauer wird auch das Angebot ausfallen und die Bestellung sowie die Maschinenausführung erleichtert.

b) Der elektrische Aufbau. Die Leistung¹ als Einzelleistung ist bei Gleichstromerzeugern nach den heutigen Begriffen über Maschineneinzelleistungen nur verhältnismäßig klein, weil sie mit Rücksicht auf die Höhe der Maschinenspannung an den erzeugbaren Strom und die Ausführbarkeit des Stromwenders (Kommutators) gebunden ist. Für eine größere verlangte Leistung wird daher bei Gleichstrom die Zahl der aufzustellenden Maschinen schon sehr bald wesentlich größer als bei Drehstrom. Dadurch liegt der Preis für das ausgebaute kW des Kraftwerkes

$$= \frac{\text{Gesamte Kraftwerkskosten}}{\text{erzeugbare Betriebsleistung} + \text{Aushilfe (Reserve)}} \text{ RM/kW}$$

gegenüber Drehstrom höher, was für die Wirtschaftlichkeit, also für die Stromselbsterzeugungskosten von besonderer Bedeutung ist.

Da die Maschinenhersteller ihre Stromerzeugerleistungen genormt haben, ist es zweckmäßig, nach vorheriger eigener Untersuchung über die betrieblich vorteilhafteste Einzelleistung unter entsprechender Berücksichtigung einer etwa noch mit aufzustellenden Batterie mit den Maschinenherstellern zu verhandeln und dann durch wirtschaftliche Untersuchungen die Maschinen-Einzelleistung so zu bestimmen, daß der geringste Leistungspreis erzielt wird. Diese wirtschaftlichen Untersuchungen sind im IV. Abschnitt behandelt.

Zu der Leistungsabgabe tritt die Überlastungsfähigkeit, die bei Maschinen für Dauerbetrieb das 1,5fache des Nennstromes bei Nennspannung im betriebswarmen Zustand während 2 min betragen darf. Bei Gleichstromerzeugern ist diese Überlastbarkeit vom betrieblichen Standpunkt aus im allgemeinen ausreichend, weil zumeist, jedenfalls bei Kraftwerken für die öffentliche Stromversorgung, eine Batterie vorhan-

¹ Trettin, C.: Über die Grenzen großer Gleichstrommaschinen. Siemens-Z. 1926 Heft 11 S. 538. Briem, W.: Grenzen im Bau von Gleichstrommaschinen. Elektrische Grenzen. Elektrotechn. u. Maschinenb. 1939 Heft 45/46 S. 548.

den ist, die Belastungsstöße aufnimmt und ausgleicht. Im anderen Fall und bei Industriekraftwerken ist die erforderliche Überlastbarkeit nach den vorliegenden Betriebsverhältnissen auf Höhe und Dauer zu prüfen.

Die **Stromwendung** (Kommutierung)¹ muß bei jeder Belastung bis zur Nennleistung praktisch funkenfrei arbeiten. Bei den vorgeschriebenen Überlastungen darf weder die Betriebsfähigkeit von Stromwender und Bürsten beeinträchtigt werden, noch Rundfeuer auftreten. Das hat zur Voraussetzung, daß der Stromwender in gutem Zustand ist und die Bürsten gut eingelaufen sind. Nach den REM soll bei Maschinen ohne Wendepole die Bürstenstellung im Belastungsbereich von 0,25·Nennleistung bis Nennleistung unverändert bleiben, in den anderen Belastungsbereichen jedoch geändert werden.

Handelt es sich um schwankende Belastungsverhältnisse mit stärkeren Überlastungen, hohe Drehzahlen und Spannungsregelung in weiten Grenzen, so werden, um funkenfreie Stromwendung zu erreichen, Wendepole eingebaut. Bei sehr stark beanspruchten Maschinen werden neben der Verwendung von Wendepolen noch zusätzliche Mittel z. B. besondere Dämpferwicklungen (Nutendämpfer²) erforderlich. Da auf diesen elektrischen Aufbau der Betriebsingenieur keinen Einfluß hat, andererseits aber alle Betriebsverhältnisse bekannt sein müssen, um dem Maschinenhersteller die notwendigen Unterlagen an die Hand zu geben, muß der Betrieb bei der Entwurfsbearbeitung auf alle diese Verhältnisse und ihre richtige Erfassung besonders bedacht sein.

Bei Maschinen mit Wendepolen soll die Bürstenstellung im ganzen Belastungsbereich unverändert bleiben. Der Betrieb gilt als praktisch funkenfrei, wenn Stromwender und Bürsten in betriebsfähigem Zustand bleiben.

Die **Spannung**. Bei der Festsetzung der Maschinenspannung ist zunächst zu berücksichtigen, daß in den Verteilungsleitungen ein Spannungsabfall auftritt, der von den Stromerzeugern über die am Verbrauchsort verlangte Spannung hinaus gedeckt werden muß. Dieser Spannungsabfall muß bei Gleichstrom entweder unmittelbar durch die Regelung der Maschinenspannung oder durch Zusatzmaschinen ausgeglichen werden, während bei Wechselstrom durch Zwischenschaltung von Umspannern die Maschinenspannung praktisch unabhängig von der jeweils verlangten Netzspannung ist. Da der Spannungsbereich nach den REM festliegt, die Maschinen ferner zumeist im Parallelbetrieb auf Sammelschienen arbeiten, damit also für alle Stromerzeuger die jeweilige Spannung bestimmt ist, kann der Spannungsabfall in den Netzleitungen, abgesehen von der Regelung der Maschinenspannung, praktisch nur durch die entsprechende Bemessung der Netzleiterquerschnitte beherrscht werden, was bei ausgedehnten Netzen sehr schwierig ist und unter Umständen für besondere Netz- und Belastungspunkte eine gesonderte Spannungsregelung erforderlich macht.

¹ Wartung von Stromwendern. ETZ 1938 Heft 47 S. 1272.

² Trettin, C.: Stromwendung und Dämpfung bei Gleichstrommaschinen. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. Bd. 12 (1933) Heft 2 S. 34.

Da dieser Spannungsabfall einerseits mit wachsendem Ausbau einer Anlage zunimmt, andererseits sich aber auch ständig mit der Belastung ändert, müssen unter Umständen bestimmte Grenzen festgelegt werden, innerhalb welcher die Spannung der Stromerzeuger regelbar sein soll. Es ist hierbei mit Vorsicht vorzugehen, denn mit einer Erhöhung der Spannung bei gleichbleibendem Strom steigt die Leistung, die von der Maschine abzugeben ist. Es kann dann vorkommen, daß infolge dieser höheren Leistung die Erwärmung die vorgeschriebene Grenze überschreitet, wodurch mit der Zeit die Lebensdauer des Stromerzeugers durch Austrocknen und Verkohlen der Wicklungsisolierung beeinträchtigt wird. Leider werden auch heute noch oft nach dieser Richtung bei der Bestellung einer Maschine ungenaue Angaben gemacht, die bei der Inbetriebsetzung zu unangenehmen Auseinandersetzungen führen. Umbauen lassen sich fertige Maschinen ohne große Kosten in der Regel nicht mehr; es ist daher besonders darauf zu achten, daß über die Spannungs- und Leistungsverhältnisse von vornherein einwandfreie Werte vereinbart werden. Die REM sehen als genormte Nennspannungen für Maschinen die in Zahlentafel 2 zusammengestellten Werte vor.

Zahlentafel 2. Genormte Nennspannungen in Volt für Gleichstrommaschinen über 100 V.

Genormte Betriebsspannungen nach VDE 0176	Nennspannung		
	für Stromerzeuger	für Bahn- stromerzeuger	für Motoren
110	115	—	110
220	230	240	220
440	460	—	440
550	—	600	—
750	—	825	—
1100	—	1200	—
1500	—	1650	—
3000	—	3300	—

Spannungsbereich. Die Stromerzeuger sollen bei Nennleistung und Nenn-drehzahl eine Spannung entwickeln können, die bis zu ± 5 vH von der Nennspannung abweicht, ohne daß bei diesen Grenzwerten der Spannung die Erwärmungsgrenzen um mehr als 5° C überschritten werden. Diese Bestimmung gilt nicht für Gleichstrom-Bahnmaschinen.

Wenn die vom Besteller verlangte Spannung um nicht mehr als ± 5 vH von einer der in Zahlentafel 2 genannten Nennspannungen abweicht, ist die Maschine mit der genormten Nennspannung auszuführen.

Maschinen für Nennspannungen, die in weiteren Grenzen als ± 5 vH veränderlich sind, unterliegen nicht den vorgenannten Bestimmungen.

Gewährleistungen beziehen sich auf den Nennbetrieb.

Stromerzeuger müssen so reichlich bemessen sein, daß sie bei den Nennwerten von Drehzahl und Erregerspannung bei 25 vH Stromüberlastung im betriebswarmen Zustand die Nennspannung erzeugen können.

Die **Spannungsänderung** ist die Änderung der Spannung, welche eintritt, wenn bei REM-Nennspannung der auf dem Leistungsschild der Maschine angegebene Vollaststrom abgeschaltet wird, ohne daß die Drehzahl, die Erregung und die Bürstenstellung geändert werden. Die Klem-

menspannung steigt, weil die Verluste innerhalb der Maschine und die Ankerrückwirkung zurückgehen. Es ist die Spannungsänderung in $\%$ der Nennspannung, wenn U_n die Nennspannung bei Nennbetrieb und U_0 diejenige bei Leerlauf bezeichnet:

$$\Delta U_n = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100 \% \quad (1)$$

Spannungsänderung eines Gleichstromerzeugers mit Nebenschluß- oder Fremdschlußwicklung ist die Spannungserhöhung, die bei Übergang von Nennbetrieb auf Leerlauf auftritt, wenn:

die Drehzahl gleich der Nennzahl bleibt,
die Bürsten in der für Nennbetrieb vorgeschriebenen Stellung bleiben,
bei Selbsterregung der Erregerwiderstand, bei Eigenregung oder Fremderregung der Erregerstrom ungeändert bleibt.

Spannungsänderung einer Gleichstrom-Doppelschlußmaschine ist der Unterschied zwischen der höchsten und der niedrigsten Spannung, der während des Überganges von Nennbetrieb auf Leerlauf und zurück auf Nennbetrieb auftritt, wenn die vorgenannten Bedingungen eingehalten werden.

Die Spannungsänderungen werden in $\%$ der Stromerzeuger-Nennspannung angegeben.

Die Spannungsänderung darf bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Bei zu großer Spannungsänderung und bei plötzlicher teilweiser oder fast vollständiger Entlastung erhalten die noch eingeschalteten Geräte eine zu hohe Spannung und werden zerstört, wenn nicht sofort nachgeregelt wird. Auch für den guten Parallelbetrieb mehrerer Maschinen ist die Spannungsänderung jeder Maschine von besonderer Bedeutung, damit Belastungsschwankungen sich gleichmäßig auf alle Maschinen verteilen. Das setzt voraus, daß der Verlauf der Spannungskennlinien bei allen Maschinen möglichst gleich ist, daß die Maschinen demnach möglichst gleiche Sättigungsverhältnisse der Magnete, gleichen Spannungsabfall im Anker und gleiche Ankerrückwirkung aufweisen. Andernfalls sind die stärker gesättigten Maschinen bestrebt, mehr Last aufzunehmen und können überlastet werden, während die schwächer gesättigten entlastet mitlaufen. Die in solchen Fällen entstehenden Ausgleichströme zwischen den Maschinen sind imstande, den Betrieb des Kraftwerkes empfindlich zu stören.

Weiteres in allgemeiner Form ist, soweit die elektrischen Verhältnisse in Frage kommen, der folgenden Behandlung der Stromerzeuger selbst nicht voranzustellen. Auf die bei Anfrage und Bestellung zu beachtenden baulichen Einzelheiten wird im 5. Kap. näher eingegangen.

c) Die Gleichstrom-Nebenschlußmaschine mit Selbsterregung. Die Arbeitsweise. Diese Schaltung wird am häufigsten gewählt, weil sie alle die Eigenschaften hinsichtlich der elektrischen Verhältnisse besitzt, die für die Durchführung eines befriedigenden Betriebes, gleichgültig ob es sich um reine Motoren-, reine Licht- oder gemischte Anlagen handelt, erforderlich sind. Dazu gehören: leichte Spannungsregelung, zuverlässige Anpassungsfähigkeit an Belastungsänderungen auch bei Parallelbetrieb mehrerer Maschinen, schnelles und sicheres Parallelschalten. Abb. 1 bis 4¹

¹ Regeln für Klemmenbezeichnungen VDE 0570/X. 38 ETZ 1938 Heft 45 S. 1212.

zeigen die Schaltung der Maschine ohne und mit Wendepolen für Rechts- und Linkslauf.

Bei dieser Maschinenschaltung liegt die Erregung im Nebenschluß zum Anker. Die im Anker induzierte EMK ist, wenn:

$2p$ die Anzahl der Pole,

$2a$ die Anzahl der parallel geschalteten Ankerstromzweige,

A die gesamte Leiterzahl im Anker,

n die Drehzahl U/min,

Φ den wirksamen Kraftfluß eines Poles in Maxwell bezeichnen,

$$E_a = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot A \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ V}, \quad (2)$$

und die Klemmenspannung:

$$U = E_a - I_a \cdot R_a \text{ V}, \quad (3)$$

weil im Gegensatz zu einem Motor beim Stromerzeuger Strom und induzierte Spannung gleichgerichtet sind. Es ist also U um den Span-

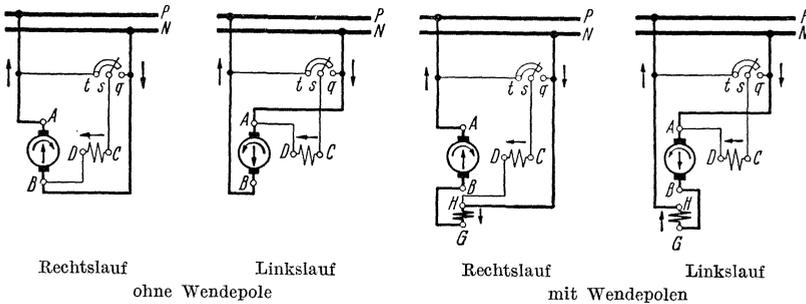


Abb. 1 bis 4. Gleichstromerzeuger mit Nebenschlußwicklung für Selbsterregung.

nungsabfall $I_a \cdot R_a$ in der Ankerwicklung kleiner als E_a . Bezeichnet ferner I den an das Netz abgegebenen Strom (Belastungsstrom) und i_n den in der Nebenschlußwicklung fließenden Strom, so ist der gesamte Ankerstrom:

$$I_a = I + i_n \text{ A}. \quad (4)$$

Mit Benutzung der Gl. (2) und (4) ergibt sich die Klemmenspannung:

$$U = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot A \cdot \Phi \cdot 10^{-8} - (I + i_n) \cdot R_a \text{ V}. \quad (5)$$

R_a = Ankerwiderstand in Ohm.

Die Gl. (5) gibt Aufschluß über das Verhalten der Nebenschlußmaschine bei veränderlicher Belastung und veränderlicher Drehzahl der Antriebsmaschine.

Unter der Voraussetzung praktisch gleichbleibender Drehzahl bei allen Belastungsänderungen besitzt die Klemmenspannung bei Leerlauf also $I = 0$ den größten Wert. Mit steigender Belastung bei unveränderter Erregung fällt U , weil der Spannungsabfall in der Ankerwicklung größer wird und ferner E_a infolge der Ankerrückwirkung sinkt.

Letzteres ist dadurch bedingt, daß die induzierte EMK in Abhängigkeit von i_n steht. Die Größen p , a , A sind bei einer ausgeführten Maschine unveränderlich, und weil $n =$ unveränderlich (der Voraussetzung nach), so folgt:

$$E_a = k_1 \cdot \Phi, \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{p}{a} \cdot \frac{n \cdot A}{60} \cdot 10^{-8}.$$

Der wirksame Kraftfluß Φ jedes Poles ist abhängig von der Zahl der Amperewindungen $i_n \cdot w_n$, wenn mit w_n die Windungszahl der Erregerwindungen bezeichnet wird, die ebenfalls fest ist. Die Gl. (6) geht somit über in:

$$E_a = k_2 \cdot f(i_n), \quad (7)$$

wobei:

$$k_2 = \frac{p}{a} \cdot \frac{n \cdot A}{60} \cdot w_n \cdot 10^{-8}.$$

Um also die Klemmenspannung bei allen Belastungsänderungen auf einer bestimmten unveränderten Höhe zu halten, muß die Erregung geändert werden. Das geschieht durch einen getrennten Widerstand im Erregerstromkreis, den Nebenschlußregler.

Ist die Drehzahl der Antriebsmaschine veränderlich, dann ist die Änderung der Klemmenspannung bei veränderlicher Belastung, wie aus Gl. (5) hervorgeht, noch wesentlich stärker. Eine derartige Arbeitsweise des Maschinensatzes für die Stromlieferung auf das Netz ist unzulässig, da sich dabei ein einwandfreier Betrieb schon bei einer einzigen Maschine nicht durchführen läßt. Arbeiten mehrere Maschinen parallel, kann überhaupt keine ordnungsmäßige Stromlieferung erfolgen. Es ist also Grundbedingung, daß die Antriebsmaschine bei allen Belastungsänderungen eine praktisch unveränderte Drehzahl hält. Nur in besonderen Fällen, z. B. wenn zum Laden einer Batterie die Spannung erhöht werden muß, wird die Drehzahländerung der Antriebsmaschine — dann ausschließlich ein Elektromotor — benutzt. Näheres hierüber ist bei der Batterieladung angegeben.

Soll ein für eine bestimmte Drehzahl gebauter Stromerzeuger mit einer anderen Drehzahl betrieben werden, dann kann mit hinreichender Genauigkeit die Änderung der Klemmenspannung verhältnisgleich mit der Drehzahlabweichung gesetzt werden, also:

$$U' = U \frac{n'}{n} \quad V. \quad (8)$$

Die vom Stromerzeuger abgegebene Leistung (Nutzleistung) ist:

$$N = \frac{U \cdot I}{1000} \quad \text{kW}, \quad (9)$$

und die erforderliche Antriebsleistung an der Stromerzeugerwelle:

$$N_A = \frac{1,36 \cdot U \cdot I}{\eta_a \cdot 1000} \quad \text{PS}, \quad (10)$$

$$= \frac{U \cdot I}{\eta_a \cdot 1000} \quad \text{kW},$$

worin η_G den Gesamtwirkungsgrad des Stromerzeugers in ∇H bezeichnet, der alle Verluste, auch diejenigen herrührend aus den mechanischen Teilen (Luft- und Lagerreibung) einschließen muß. Besonders zu beachten sind dabei die Lagerreibungsverluste, sofern die Lager für die Stromerzeugerwelle nicht vom Hersteller geliefert werden.

Die **Betriebskennlinien**. In der Hauptsache sind die Leerlaufkennlinie, die Kennlinie für die Klemmenspannung, die Belastungskennlinie und die Wirkungsgradkennlinie von Bedeutung.

Die **Leerlaufkennlinie**, auch **statische Kennlinie** genannt (Abb. 5) stellt die im Anker induzierte EMK in Abhängigkeit vom Erregerstrom oder den Erregeramperewindungen $i_n \cdot w_n$ dar unter der Voraussetzung gleichbleibender Drehzahl und der Belastung Null. Wenn bei Selbsterregung der Anker im Leerlauf auch nichtstromlos ist, sondern den Erregerstrom führt, so ist aber der durch letzteren verursachte Spannungsabfall im Anker derart gering (da i_n etwa 2 bis 3 ∇H des Belastungsstromes beträgt), daß er vernachlässigt werden kann. Die Leerlaufkennlinie beginnt nicht im Achsenkreuznullpunkt, sondern etwas höher im Punkt O' , weil infolge des magnetischen Rückstandes (des remanenten Magnetismus) bereits bei $i_n = 0$ eine EMK im Anker induziert wird.

Anfangs nimmt die E_{stat} -Kennlinie geradlinig zu und zwar um so steiler gegen die waagerechte Achsenkreuzachse, je kleiner der Luftzwischenraum zwischen Anker und Polschuhen der Magnete und je stärker die Maschine gesättigt ist. Mit wachsendem Erregerstrom biegt die Kennlinie um so stärker ab, je kleiner der Luftzwischenraum ist.

Wird die Maschine wiederum bei unveränderter Drehzahl mit einem bestimmten Strom I belastet, so muß die Erregung um den Betrag $A_0 A$ verstärkt werden, um die gleiche EMK wie im Leerlauf zu erhalten. Die Kennlinie der EMK für diesen Fall bezeichnet man als dynamische Kennlinie der Maschine E_{dyn} . Die Strecke \overline{SQ} zwischen der statischen und der dynamischen Kennlinie ist der Abfall der EMK infolge der Schwächung des Feldes durch die Ankerrückwirkung, die Strecke \overline{PQ} gleich dem Mehraufwand an $i_n \cdot w_n$ zur Deckung der Ankerrückwirkung.

Die Größe von $\overline{A_0 A} = \overline{PQ}$ ist von den besonderen Maschinen-eigenschaften, der Bürstenstellung, der Größe des Belastungsstromes

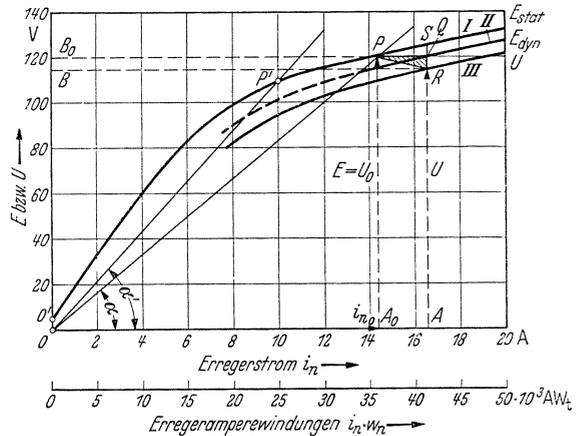


Abb. 5. Spannungskennlinie des Gleichstromerzeugers mit Nebenschlußwicklung für Selbsterregung.

I Leerlauf = statische Kennlinie, II dynamische Kennlinie, III Klemmenspannung bei $I_x = I_n$.

und der Erregung abhängig. Der Wert, der diese Einflüsse berücksichtigt, soll mit k_3 bezeichnet werden.

Es ist also:

$$\overline{A_0 A} = \overline{P Q} = k_3 \cdot I,$$

da sich $\overline{P Q}$ praktisch verhältnismäßig mit dem Ankerstrom also dem Belastungsstrom $I = I_a$ ändert.

Den Verlauf der Klemmenspannung U bei unveränderter Drehzahl und einer bestimmten unveränderten Belastung I in Abhängigkeit von der Erregung zeigt Kennlinie III in Abb. 5. Diese Kennlinie liegt um die Strecke $\overline{Q R}$ tiefer als die dynamische Kennlinie, wobei $\overline{Q R}$ den elektrischen Verlusten in der Maschine durch den Anker-

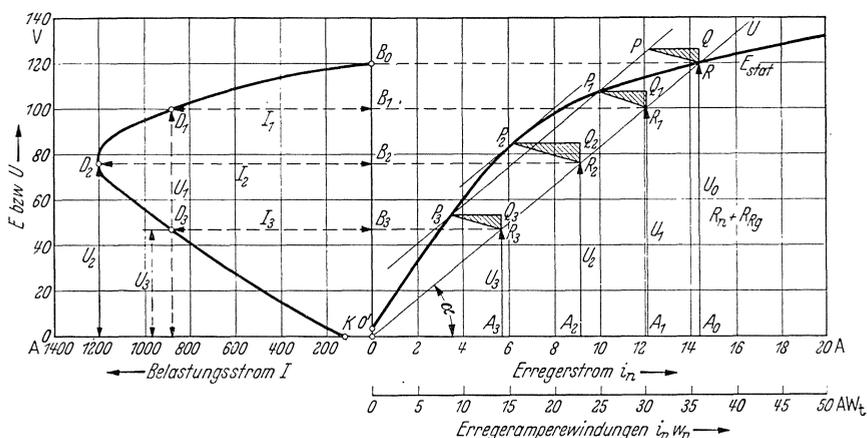


Abb. 6. Klemmenspannung beim Gleichstromerzeuger mit Nebenschlußwicklung für Selbsterregung in Abhängigkeit von der Belastung; Belastungskennlinie.

widerstand und den Bürstenübergangswiderstand entspricht und sich praktisch ebenfalls verhältnismäßig mit dem Belastungsstrom ändert. Es ist:

$$\overline{B_0 B} = \overline{Q R} = k_4 \cdot I.$$

Abb. 5 zeigt demnach, daß die statische-, die dynamische- und die Klemmenspannungskennlinie der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine angenähert im gleichen Abstand zueinander verlaufen und zu ihrer Feststellung das Verlustdreieck PQR erforderlich ist, das sich praktisch verhältnismäßig mit dem Belastungsstrom ändert.

Die Belastungskennlinie gibt ein Bild über den Verlauf der Klemmenspannung bei veränderlicher Belastung, wenn die Drehzahl und der Widerstand des Nebenschlußstromkreises unverändert bleiben. Sie zeigt das Verhalten des Stromerzeugers am besten und ist daher betrieblich am beachtenswertesten (Abb. 6).

Bei der Nebenschlußmaschine ist die Abhängigkeit der Klemmenspannung U von der Erregung dargestellt durch eine Widerstands-

gerade, die im Achsenkreuzursprung beginnt und gegen die waagerechte Achsenkreuzachse um einen Winkel α geneigt ist (Abb. 6), dessen

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{i_n(R_n + R_{Rg})}{i_n \cdot w_n} = \frac{R_n + R_{Rg}}{w_n}, \quad (11)$$

R_n = Widerstand der Nebenschlußwicklung in Ohm,

R_{Rg} = Widerstand des Nebenschlußreglers in Ohm.

Im Leerlauf können $k_3 \cdot I$ und $k_4 \cdot I$ vernachlässigt werden, weil $I = i_{n0}$. Der Schnittpunkt R der Geraden mit der Leerlaufkennlinie gibt somit den Wert der Klemmenspannung U_0 , bis zu welcher sich die mit Selbsterregung versehene Maschine erregt. Wird — immer bei unveränderter Drehzahl — $\operatorname{tg} \alpha$ geändert z. B. durch Änderung von R_{Rg} , so nimmt die Spannung mit zunehmendem Winkel α also Vergrößerung von R_{Rg} ab und umgekehrt. Es folgt daraus, daß sich die Nebenschlußmaschine nicht erregt, wenn $R_n + R_{Rg}$, somit auch Winkel α so groß werden, daß die Gerade $U = i_n(R_n + R_{Rg})$ die Kennlinie E_{stat} nicht mehr schneidet.

Bleibt der Winkel α unverändert und wird die Maschine belastet, so sinkt (Abb. 6) die Klemmenspannung beim Strom I_1 ($\overline{P_1 Q_1} = k_3 \cdot I_1$, $\overline{Q_1 R_1} = k_4 \cdot I_1$) auf den Wert $\overline{O B_1} = U_1$, beim Strom I_2 auf den Wert $U_2 = \overline{O B_2}$. Übersteigt der Strom einen bestimmten, den „kritischen“ Wert, so fällt U stark ab, die Kennlinie für U kehrt sich um, verläuft rückwärts und schneidet bei Kurzschluß der Maschinenklemmen die waagerechte Achsenkreuzachse im Punkt K . Aus diesem Kennlinienverlauf ist ersichtlich, daß eine Nebenschlußmaschine bei Kurzschluß nicht so stark gefährdet wird wie z. B. eine Synchronmaschine, weil der Strom dann auf den Wert \overline{OK} herabgeht. Allerdings hat der Kurzschluß eines Gleichstromerzeugers eine andere gefährliche Folgeerscheinung. Es tritt am Stromwender unter Umständen Rundfeuer auf, das die Stromwenderlamellen und damit die Ankerwicklung kurzschließt, wenn der äußere Kurzschluß nicht sofort abgeschaltet wird. Bei großen Maschinensätzen ist daher auf die Auswahl der Selbstschalter hervorragender Wert zu legen, gegebenenfalls sind Dämpferwiderstände in den Zuführungsleitungen vorzusehen, die die Höhe des Kurzschlußstromes begrenzen.

Die Abb. 7 zeigt den Kennlinienverlauf für eine ausgeführte Maschine. Der gesamte Spannungsabfall vom Leerlauf bis zum Vollaststrom ist gleich der Strecke $\overline{P_1 P_3}$; die Strecke $\overline{P_2 P_3}$ gibt den Ohmschen Spannungsabfall, $\overline{P_1 P_2}$ den Spannungsabfall infolge der Ankerrückwirkung und der Verkleinerung von i_n an. Der Strom i_n nimmt verhältnismäßig mit U ab, also $i_n = \frac{U}{R_n}$.

Aus dem Kennlinienverlauf ist zu erschen, daß die Erregung nacheregelt werden muß, wenn sich die Belastung ändert. Das erfolgt durch den bereits erwähnten Nebenschlußregler.

Die Wirkungsgradkennlinie η_G schließlich ist insofern besonders beachtlich, als η_G anfangs mit steigender Belastung zunimmt, einen

bestimmten Höchstwert erreicht und dann wieder abfällt, was für die günstigste Ausnutzung der Maschine von Bedeutung ist.

Die **Spannungsregelung**. Die Spannungsregelung der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine erfolgt, wie bereits kurz angedeutet, fast ausschließlich durch Verstellen eines besonderen Widerstandes im Erregerkreis (Nebenschlußregler)¹. Mit der Änderung der Belastung muß die Maschinenspannung geändert werden. Mit Rücksicht auf die verschiedenartigen Stromverbraucher, deren ordnungsmäßiges Arbeiten und den sich ändernden Spannungsabfall im Netz oder den Zuleitungen ist eine bei allen Belastungsänderungen möglichst gleichbleibende Spannung am Verbrauchsort zu halten. In welchen Grenzen die Spannung höchstens schwanken darf, hängt von der Art der Stromverbraucher ab. Bei öffentlichen Anlagen, die gleichzeitig Strom für Beleuchtungs- und Kraftzwecke abgeben, wird stets gefordert werden, daß Belastungs-

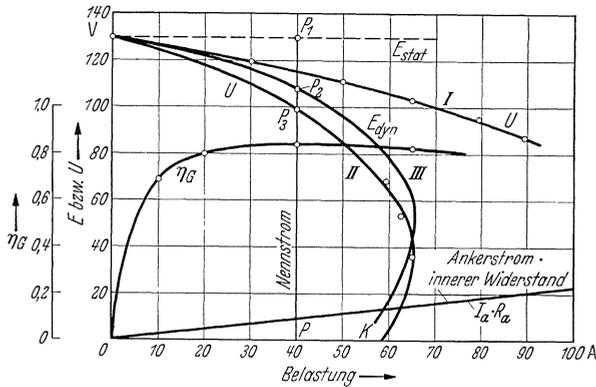


Abb. 7. Betriebskennlinien für den Gleichstromerzeuger mit Nebenschlußwicklung. I Klemmenspannung für Fremderregung, II Klemmenspannung für Selbsterregung, III Kennlinie für E_{dyn} , η_G Wirkungsgrad, $I_a = I + i_n$ A.

änderungen im Höchstfall eine Spannungsänderung von 2 bis 3 vH am Verbrauchsort hervorrufen dürfen, da anderenfalls ein für das Auge unangenehmes Lichtzucken entsteht. Dieses sowohl wie zu hohe Spannung beeinträchtigen ferner die Lebensdauer der Lampen.

Die Motoren sind nicht ebenso empfindlich, wenngleich es auch Betriebe gibt, in denen die Motoren, bei denen Spannungsänderungen eine Änderung der Drehzahl bzw. des Drehmomentes zur Folge haben, mit Rücksicht auf die anzutreibenden Maschinen mit gleichbleibender Drehzahl laufen müssen z. B. bei Papiermaschinen, Spinnerei- und Webereimaschinen. Die Spannungsänderung wird hier etwa $\pm 1,5$ vH im Höchstfall betragen dürfen.

Die Regelung der Maschinenspannung erfolgt entweder von Hand oder durch selbsttätig arbeitende Einrichtungen, wobei für die grundsätzliche Auswahl der zeitliche Verlauf und die Größe der Belastungs-

¹ VDE-Vorschriften 0650/1933. Regeln für die Bewertung und Prüfung von Anlassern und Steuergeräten. § 39 u. ff.

änderungen, sowie die Art der angeschlossenen Stromverbraucher maßgebend sind.

Es ist nach Abb. 6 erforderlich, daß der mit Selbsterregung versehene Stromerzeuger im oberen gekrümmten Teil der Leerlaufkennlinie arbeiten muß. Im geradlinigen Teil wird der Stromerzeuger schwankend (labil) und kann bei geringem Anlaß z. B. durch Drehzahländerung die Spannung verlieren. Über die Grenze von 1:0,6 ist die Spannungsregelung praktisch nicht möglich. Es ist ferner zu beachten, daß durch Änderung der Erregung die Belastung des Gleichstromerzeugers geändert wird.

Die Handregelung geschieht in einfachster Weise dadurch, daß der Schaltwärter den Regler von Hand verstellt. Er muß zu diesem Zweck den Spannungsmesser dauernd beobachten.

Das ist aber nur in kleinen Anlagen möglich. Da durch Änderung der Erregung die Belastung des Stromerzeugers geändert wird, ist beim Parallelbetrieb mehrerer Maschinen die gleichzeitige Regelung aller Maschinen erforderlich, anderenfalls kann der Parallelbetrieb durch Ausgleichströme zwischen den Maschinen sehr gestört werden. Es werden infolgedessen die Handräder aller Regler mechanisch gekuppelt (Abb. 8), um nur von

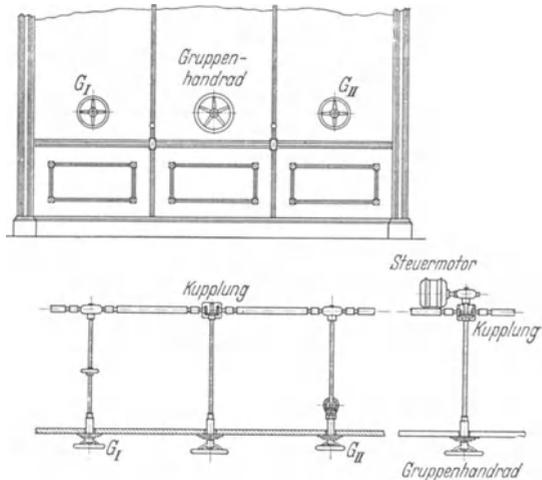


Abb. 8. Gruppenantrieb von Handreglern.

einer Stelle alle Maschinen gleichzeitig und gleichwertig zu regeln. Ferner sind alle Regler aufeinander so abzustimmen, daß alle Maschinen gleichmäßig an der Regelung teilnehmen. Da eine derartige Abstimmung schon mit Rücksicht auf die Ungleichmäßigkeit der Drehzahlen der Antriebsmaschinen sich nicht voll erreichen läßt, ist dafür Sorge zu tragen, daß jeder Regler von dem gemeinschaftlichen Antrieb (dem Gruppenantrieb) entkuppelt werden kann, um ihn von Hand der Belastung entsprechend ein- oder nachzustellen. Die Entkuppelung ist auch beim Anfahren und Abstellen jeder Maschine notwendig.

Die Handregelung kann naturgemäß nur sehr träge arbeiten, da die Bedienung die durch die Belastungsänderung eingetretene Spannungsänderung erst am Meßgerät beobachtet und ihrer Höhe nach festgestellt haben muß, ehe die Regelung vorgenommen wird (Abb. 13). Der Stromerzeuger muß, um einigermaßen befriedigende Betriebsverhältnisse zu erhalten, für besonders geringen inneren Spannungsabfall gebaut sein. Die Maschine wird dadurch teurer und schwerer und im Wirkungsgrad schlechter. Der Spannungsmesser muß zudem in

seinem Meßbereich um den Wert der zu regelnden Spannung sehr weit auseinander gezogen sein, damit kleine Beträge der Spannungsänderung sicher und genau erkannt werden können. Man benutzt die Handregelung heute daher nur noch zum Anfahren und Abstellen der Maschine, gegebenenfalls für eine Grundregelung der Maschinenspannung zu bestimmten Belastungszeiten des Betriebstages (Nacht- und Frühspitze, Mittag- oder Abendbelastung) oder zur Ausregelung allmählich verlaufender Belastungsänderungen und bedient sich für die übrige Betriebszeit besonderer, selbsttätig arbeitenden Verstelleinrichtungen. Für Industriekraftwerke mit fortgesetzt stark schwankender Belastung kann die Handregelung überhaupt nicht angewendet werden.

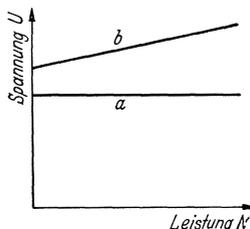


Abb. 9. Kennlinien für (a) astatiche und (b) statische Spannungsregelung.

Bei größeren Maschinen werden die Regler bei ihren Maschinen belassen und elektrisch ferngesteuert. Die Steuerung erfolgt durch Druckknöpfe oder Kippschalter für „Mehrspannung“ und „Weniger Spannung“ getrennt, die einen Antriebsmotor beim Regler ein- und ausschalten. Die Bewegung des Schaltmotors darf nur so lange dauern, als der Steuerschalter betätigt wird. Sollen mehrere Regler gleichzeitig verstellt werden, dann arbeitet der Steuermotor auf das Kuppelgestänge der Regler.

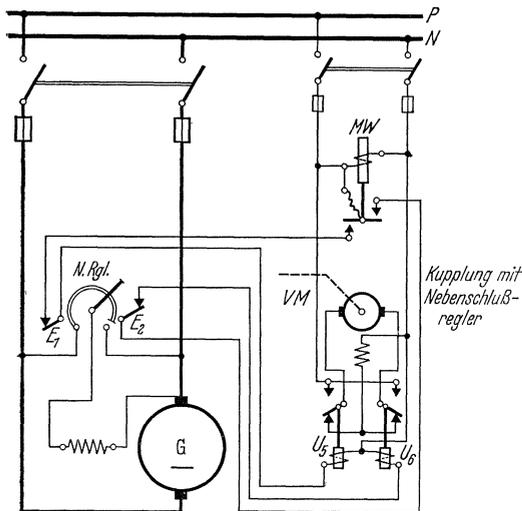


Abb. 10. Spannungsregelung eines Gleichstromerzeugers mit Nebenschlußwicklung für Selbsterregung durch Trägeregler. MW Steuermesswerk, VM Verstellmotor, N.Rgl. Nebenschlußregler, E₁, E₂ Endausschalter, U₅, U₆ Steuerschütze für VM.

Verlangen die Abnahmeverhältnisse die besondere und schnelle Regelung der Spannung, so muß der selbsttätige Regler angewendet werden d. h. ein Regler, der ohne Eingriff der Maschinenbedienung arbeitet. Nach der Wirkungsweise dieser Regler wird zwischen der statischen und der astaticen Regelung unterschieden (Abb. 9).

Statisch arbeitet ein Regler, der die Steuergröße z. B. die Spannung nicht auf einen gleichbleibenden Wert, sondern in Abhängigkeit von einer anderen Größe z. B. der Belastung regelt. Astatich arbeitet ein Regler, der die Steuergröße auf einen gleichbleibenden Sollwert über den ganzen Regelbereich hält also z. B. einen mittleren Spannungssollwert zwischen Leerlauf und Vollast unabhängig von der Belastung.

Für die Kraftwerkmaschinen werden zumeist astatische Regler und als Steuergrößen Spannung oder Strom verwendet. Die Spannungsregelung ist die am häufigsten angewendete Form; die Stromregelung ist bei elektrochemischen Anlagen und für das Laden einer Batterie zu benutzen. Die Spannungs- und Stromregelung wird unter bestimmten Umständen bei größeren Kabelnetzen notwendig.

Die Regler arbeiten entweder als Trägregler, Eilregler oder Schnellregler. Der Beurteilung ihrer Anwendung soll eine kurze Angabe ihrer Arbeitsweise vorangestellt werden.

Der Trägregler besteht aus einem Spannungsmeßwerk (Steuermeßwerk), das entweder mittelbar oder unmittelbar einen Hilfsmotor ein- und ausschaltet, der über ein mechanisches Verbindungsglied die Bürste des Nebenschlußreglers verstellt. In den Endstellungen sind Endauschalter vorzusehen, die den Regelbereich der Bürste begrenzen. In Abb. 10 ist ein einfaches Schaltbild gezeichnet. Jeder neue Erregerzustand wird infolge der magnetischen Trägheit und der Selbstinduktion der Erregerwicklung nur annähernd erreicht, um den Sollwert der Meßgröße nicht zu überschreiten. Der Regler arbeitet verhältnismäßig

langsam, damit ein Pendeln (Überregeln) vermieden wird. Die zulässige Regelgeschwindigkeit ist von der magnetischen Trägheit des Erregerkreises und der verlangten Empfindlichkeit abhängig. Bei einer Empfindlichkeit von $\pm 0,5$ vH beträgt der Mittelwert für Durchlaufen des gesamten Regelbereiches etwa 15 s.

Für den Eilregler zeigt Abb. 11 ein Schaltbild. Die zu regelnde Spannung liegt an einem Feinsteuermeßwerk, das beim Abweichen der Spannung über oder unter den Sollwert das rechte oder linke Schaltstück schließt. Dadurch wird der Verstellmotor *VM* eingeschaltet, der die Bürste des Reglers im Sinne „mehr“ oder „weniger“ so lange verstellt, bis der Sollbetrag der Spannung wieder erreicht ist. Um das

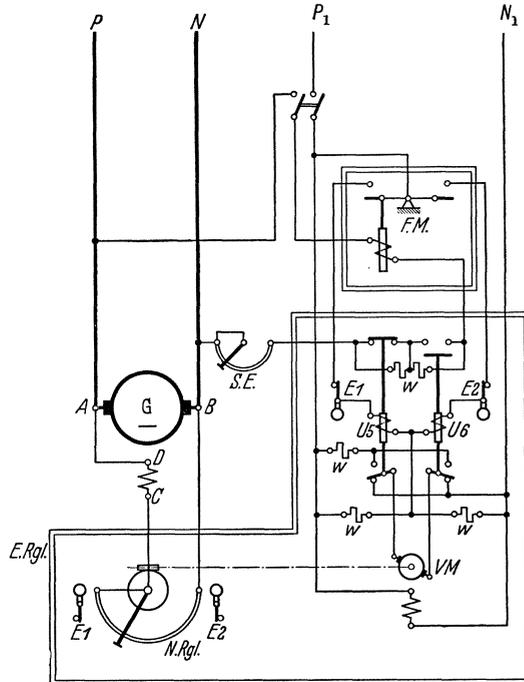


Abb. 11. Spannungsregelung eines Gleichstromerzeugers mit Nebenschlußwicklung für Selbsterregung durch Eilregler.

F.M. Feinsteuermeßwerk, *VM* Verstellmotor, *E.Rgl.* Eilregler, *S.E.* Sollwertesteller, *U₅*, *U₆* Steuerschütze für den *VM*, *E₁*, *E₂* Endauschalter, *W* Vor- bzw. Parallelwiderstände.

Überregeln und damit das Pendeln des Reglers und der geregelten Spannung zu verhindern, erhält das Feinsteuermeßwerk eine besondere Rückführung. Der Grundgedanke dieser Rückführung ist der, durch Vor- bzw. Parallelschalten von Widerständen w das Schaltstück am Feinsteuermeßwerk kurz vor Erreichen des Sollwertes der Spannung zu öffnen und den Motor VM abzuschalten. Die Rückführung selbst verhindert ein abermaliges, sofortiges Schließen des Schaltstückes, so daß eine gewisse Zeit vergeht, innerhalb der das Feld der Bürstenbewegung entsprechend nachgekommen ist. Da der Sollwert der Spannung noch nicht ganz erreicht ist, wird der Verstellmotor durch das Feinsteuermeßwerk erneut eingeschaltet. Dieser Vorgang wiederholt sich so oft, bis der Sollwert hergestellt ist.

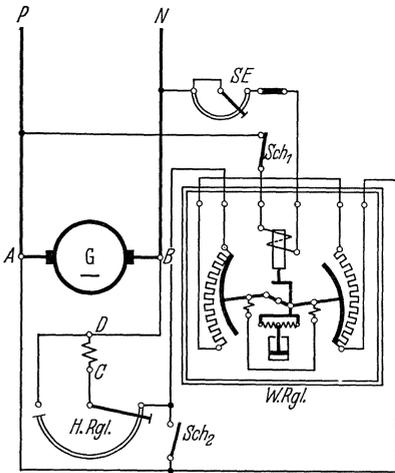


Abb. 12. Spannungsregelung eines Gleichstromerzeugers mit Nebenschlußwicklung für Selbst-erregung durch Schnellregler.
W.Rgl. Wälzregler, *S.E.* Sollwertfeinsteller,
H.Rgl. Handregler.

daß er gegenüber dem Eilregler mit noch größerer Schnelligkeit und Genauigkeit den Sollwert der Meßgröße herstellt. Abb. 12 zeigt das Schaltbild des SSW-Wälzreglers. Ein Magnetkern (Solenoid) bewegt sich beim Abweichen der Spannung vom Sollwert nach oben oder unten. Dabei wird die Verstelleinrichtung betätigt und über die abrollenden Wälzbügel der Regelwiderstand geändert. Die besonders durchgebildete Rückführung gibt dem Regler eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ vH des Sollwertes von Leerlauf bis Vollast.

In Abb. 13 sind die Regelgeschwindigkeiten und der Verlauf der Spannung für die besprochenen Regelungsarten vergleichsweise zusammengestellt.

Für die Beurteilung der Güte eines selbsttätigen Reglers sind bestimmend:

- die Ansprechempfindlichkeit in vH der Meßgröße,
- die Regelgeschwindigkeit (Verstellgeschwindigkeit),

Die Rückführung ermöglicht eine verhältnismäßig große Verstellgeschwindigkeit, ohne daß Überregeln eintritt. Zum Durchlaufen des gesamten Regelbereiches werden bei Dauerschaltluß des Feinsteuermeßwerkes etwa 5 bis 7 s benötigt. Die Verstellkraft muß wiederum abgeschaltet werden, bevor die Bürste des Reglers die Endlage erreicht und entweder gegen mechanische Anschläge des Reglers stößt oder die Erregung vollständig abschaltet. Es werden hierfür ebenfalls Endschalter verwendet, die durch Schütze mit Bremmschaltstücken den Verstellmotor ausschalten.

Der Schnellregler (Wälzregler, Tirrillregler, BBC-Schnellregler, Thomaregler) ist in seiner Bauform und Arbeitsweise so durchgebildet,

die Regelgenauigkeit in $\%$ des Sollwertes der Meßgröße,
 der Einstellbereich (Regelbereich) der Meßgröße,
 die Durchlaufzeit für den ganzen Regelbereich,
 die Vermeidung des Überregeln (Pendeln) des Reglers,
 die Grenzleistung unter Berücksichtigung der Überlastungsfähigkeit
 des Stromerzeugers,
 der einfache mechanische und elektrische Aufbau,
 die Bedienung, Wartung und Unterhaltung.

Die Anwendung selbsttätiger Regler bei Gleichstromerzeugern ist ohne Bedenken zulässig, wenn nur eine Maschine auf das zu versorgende Netz arbeitet. Bei schnellverlaufenden und heftigen Lastschwankungen ist der Trägeregler nicht benutzbar. Sein Anwendungsgebiet ist daher beschränkt; er hat heute kaum noch wesentliche Bedeutung und wird nur in kleinen Eigenkraftwerken benutzt. Liegen nicht be-

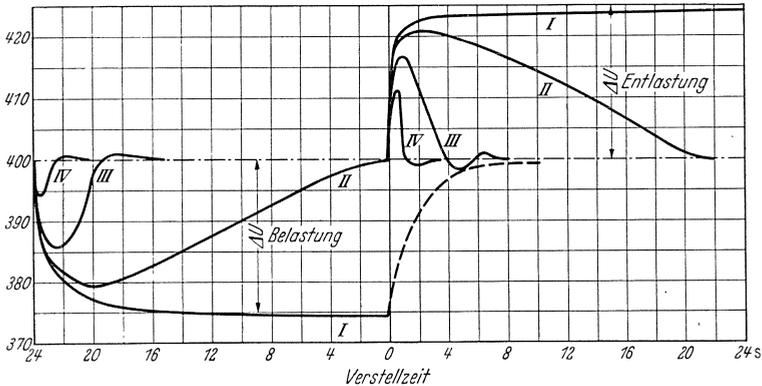


Abb. 13. Verlauf der Klemmenspannung eines Gleichstromerzeugers mit Nebenschlußwicklung für Selbsterregung bei Be- und Entlastung und verschiedenen Regelungsarten.

I ohne Regelung, II mit Trägeregler, III mit Eilregler, IV mit Schnellregler.

sonders schwere Betriebsverhältnisse vor, so ist der Eilregler, im anderen Fall der Schnellregler zu wählen. Alle Regler können astatisch arbeiten. Arbeiten mehrere Maschinen im Parallelbetrieb, so bedarf die Regelung ganz besonderer Beachtung, weil unter Umständen große Schwierigkeiten auftreten können. Es ist grundsätzlich bei Hand- oder selbsttätiger Regelung unzulässig, nur eine Maschine zu regeln und die anderen Maschinen mit fest eingestellter Erregung arbeiten zu lassen. Es müssen vielmehr stets alle Maschinen geregelt werden, aber auch hier ist noch besondere Vorsicht geboten. Über die Handregelung ist bereits gesprochen worden. Bei selbsttätig geregelten Maschinen wird die Maschine, deren Feld sich am schnellsten ändert, auch am schnellsten die Last aufnehmen. Hieraus können einmal Störungen entstehen, wenn die Verstellzeit des Kraftmaschinenreglers und die des Nebenschlußreglers nahezu gleich sind. Es können sich dann u. U. beide Regler gegenseitig so beeinflussen, daß sie nur schwer oder überhaupt nicht mehr zur Ruhe kommen. Die Folge davon

ist eine fortgesetzte Schwankung der Spannung und damit eine Betriebsstörung in der Stromlieferung. Diesem Übelstand kann nur dadurch begegnet werden, daß entweder der elektrische Regler eine längere Verstelldauer oder der mechanische Regler eine zusätzliche Dämpfung erhält.

Wird nur ein Stromerzeuger geregelt, so werden die fest eingestellten Stromerzeuger durch die Selbsterregung gezwungen, ihre Spannung beizubehalten. Sie werden deshalb, da auch keine Beeinflussung der

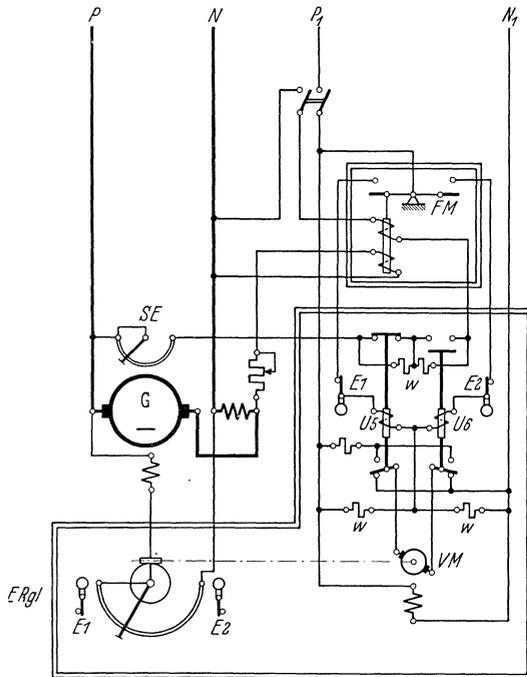


Abb. 14. Statische Spannungsregelung eines parallelarbeitenden Gleichstromerzeugers mit Nebenschlußwicklung für Selbsterregung durch Eilregler.

F.M. Feinsteuermeßwerk, *V.M.* Verstellmotor, *E.Rgl.* Eilregler, *S.E.* Sollwert-einsteller, *U₁*, *U₂* Steuerschütze für den *V.M.*, *E₁*, *E₂* Endausschalter, *W* Vor- bzw. Parallelwiderstände.

Drehzahl erfolgt, unentwegt gleichbleibende Leistung ohne Rücksicht auf die Bedürfnisse des Netzes abgeben. Steigt die Netzbelastung, so wird demnach nur die selbsttätig geregelte Maschine die Last aufnehmen, während die nicht selbsttätig geregelten mit gleichbleibender Last weiterlaufen. Dadurch kann leicht eine Überlastung der geregelten Maschine eintreten. Noch schlimmer können die Verhältnisse bei Entlastung des Netzes werden. In genau gleicher Weise wie vorher wird jetzt die selbsttätig geregelte Maschine entlastet und schließlich, wenn die Netzlast unter die unveränderte Last der nicht geregelten Maschinen fällt, deren Leistung aufnehmen müssen, dadurch in die Arbeitsweise als Motor gedrückt rückwärts seine Kraftmaschine antreiben. Selbst wenn Rückstromschalter und Meldeinrichtungen für den Last-

zustand eingebaut sind, bedeuten solche Entlastungen Störungen.

Sollen alle Stromerzeuger an der Übernahme der Belastungsschwankungen beteiligt werden, dann sind sie sämtlich mit selbsttätigen statischen Reglern zu versehen, die so untereinander verbunden werden müssen, daß sie bei abweichenden Spannungsabfällen in den Maschinen durch die dann auftretenden Ausgleichströme so lange beeinflusst werden, bis die richtige Belastungsverteilung hergestellt ist. Die statische Arbeitsweise der Regler, die mit der Stromänderung veränderliche Spannung ergibt, wird durch eine zusätzliche Stromspule auf dem Feinsteuermeßwerk jedes Reglers erreicht (Abb. 14). Diese Stromspule

wird entweder vom Maschinenstrom oder dem Ausgleichstrom zwischen mehreren Maschinen erregt.

Nur bei Schnellreglern ist die Regelung nur einer Maschine betrieblich möglich. Es muß aber auch hier der jeweilige Belastungszustand der einzelnen Maschinen sicher überwacht werden.

Eine parallel arbeitende Batterie verhält sich genau so wie ein unverändert erregter Stromerzeuger.

Für Gleichstromkraftwerke mit großer Spannungsregelung sind daher besser Doppelschlußmaschinen vorzusehen; wo diese nicht verwendbar sind, ist der Eilregler in allen Fällen zu benutzen, in denen nicht mit heftigen Lastschwankungen zu rechnen ist. In Industriekraftwerken oder in Anlagen, die neben der Stromlieferung für Beleuchtung auch noch viele Industrie- und Gewerbeanschlüsse aufweisen, ist an Stelle des Eilreglers der Schnellregler am Platz.

Das Parallelschalten und der Parallelbetrieb. Da in größeren Kraftwerken stets mehrere Maschinen aufgestellt sind, die zusammen die Stromlieferung zu übernehmen haben, müssen sie je nach Erfordernis gemeinschaftlich oder getrennt arbeiten können, in beliebiger Weise zu- und abschaltbar sein und die Lastverschiebung von einer auf eine andere Maschine leicht und sicher zulassen. Diesen Betriebsforderungen haben sämtliche Stromerzeuger zu genügen.

Das Parallelschalten bei Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen geschieht in der Weise, daß der neu in Betrieb zu nehmende Stromerzeuger auf seine volle Drehzahl gebracht und in der Klemmenspannung so eingeregelt wird, daß letztere der Sammelschienenspannung genau entspricht. Alsdann wird der Maschinenschalter geschlossen und die Erregung der zugeschalteten Maschine verstärkt, wodurch diese Maschine bei gleichzeitiger Verminderung der Erregung der bereits belasteten Maschine nunmehr so viel Last übernimmt, wie gewünscht wird. Beim Abschalten eines Stromerzeugers aus dem Parallelbetrieb wird in umgekehrter Weise verfahren.

Für den Parallelbetrieb ist zu fordern, daß sich alle Maschinen an den Belastungsschwankungen gleichmäßig beteiligen dergestalt, daß alle Maschinen bei Belastungserhöhung mehr; bei Entlastung weniger Leistung abgeben. Das ist bei Gleichstrommaschinen zu erreichen, wenn sie annähernd gleichen Kennlinienverlauf besitzen, d. h. möglichst gleich stark gesättigt sind und ihre Ankerwiderstände, sowie ihre Ankerückwirkungen sich wie ihre Leistungen verhalten. Ist das nicht der Fall, tritt unregelmäßige Belastungsverteilung auf die einzelnen Maschinen ein.

Besondere Untersuchungen etwa der Art, wie sie im zweiten Abschnitt für Wechselstromerzeuger behandelt werden, sind nicht anzustellen. Fragen der statischen und dynamischen Stabilität spielen keine wesentliche Rolle, wenn den Vorschriften über den gleichen Kennlinienverlauf und die günstigste Leistungsverteilung auf die parallelarbeitenden Maschinen entsprochen wird. Aus Abb. 6 geht hervor, daß die Nebenschlußmaschine mit Selbsterregung eine statische Stabilitätsgrenze besitzt, bei deren Überschreitung die Spannung abfällt.

Das Anwendungsgebiet für die Nebenschlußmaschine mit Selbst-

erregung ergibt sich überall dort, wo keine häufigen und stark schwankenden Belastungsverhältnisse vorliegen, bevorzugt also für alle Elektrizitätswerke zur öffentlichen Stromabgabe, elektrochemische Betriebe u. dgl. Bei Fabrikanlagen ist diese Maschinengattung nur dann zu wählen, wenn keine fortgesetzt starken Belastungsstöße etwa durch große Krananlagen, Walzwerke usw. auftreten, oder ein Belastungsausgleich durch besondere Einrichtungen (Zusatzmaschinen oder Pufferbatterie) vorgenommen wird, andernfalls ist die Gleichstrom-Doppelschlußmaschine, wie bereits gesagt, vorteilhafter. Sind Akkumulatoren zur Aushilfe oder zur Unterstützung der Stromlieferung vorhanden, so empfiehlt es sich gleichfalls, die Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen zu benutzen.

d) Die Gleichstrom-Nebenschlußmaschine mit Fremderregung. Unter Fremderregung versteht man den Anschluß der Magnete an eine fremde

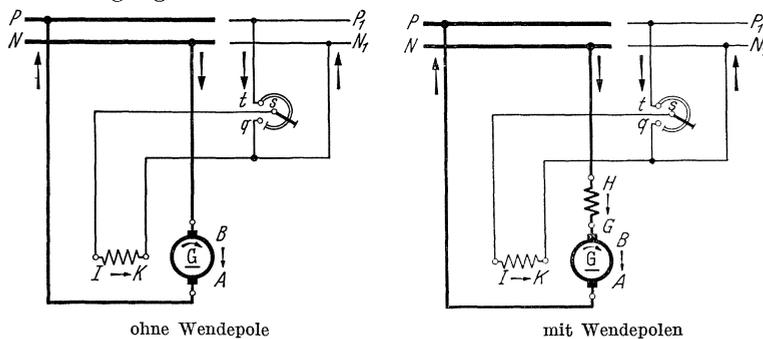


Abb. 15 und 16. Gleichstromerzeuger mit Nebenschlußwicklung für Fremderregung.

Stromquelle, deren Spannung unveränderlich ist. In Abb. 15 und 16 sind die Schaltbilder für eine Maschine ohne und mit Wendepolen gezeichnet. Die Fremderregung wird in der Hauptsache bei kleineren Maschinen zum Laden von Batterien und dann, wenn es sich für besondere Zwecke um die Regelung der Spannung in weiten Grenzen handelt, angewendet.

Eine fremderregte Nebenschlußmaschine unterscheidet sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften nur unwesentlich von der Maschine mit Selbsterregung. Die Klemmenspannung ändert sich bei Belastungsänderungen — gleichbleibende Drehzahl vorausgesetzt — weniger stark als bei Selbsterregung, weil bei unverändertem Widerstand der Nebenschlußwicklung der Erregerstrom i_n unverändert bleibt. Der Verlauf der Leerlauf- und Belastungskennlinie ist aus Abb. 17 zu ersehen. Ändert sich bei gleichbleibender Erregung der Belastungsstrom von I_1 auf I_2 , ändert sich auch die Klemmenspannung. Sie nimmt mit zunehmender Belastung ab. Ist für die Belastung I_1 die Strecke $\overline{P_1 Q_1} = k_3 \cdot I_1$ und $\overline{Q_1 R_1} = k_4 \cdot I_1$, so gilt für den Strom I_2 :

$$I_2 = I_1 \frac{\overline{P_2 Q_2}}{\overline{P_1 Q_1}},$$

$\overline{A R_1}$ ist für I_1 die Klemmenspannung U_1 ,

$\overline{A R_2}$ ist für I_2 die Klemmenspannung U_2 .

Als betrieblich besonderes Merkmal dieser Maschinenschaltung ist hervorzuheben, daß die fremderregte Maschine nicht kurzgeschlossen werden darf, da dann die große Gefahr besteht, daß die Wicklungen infolge des hohen Kurzschlußstromes verbrennen, weil

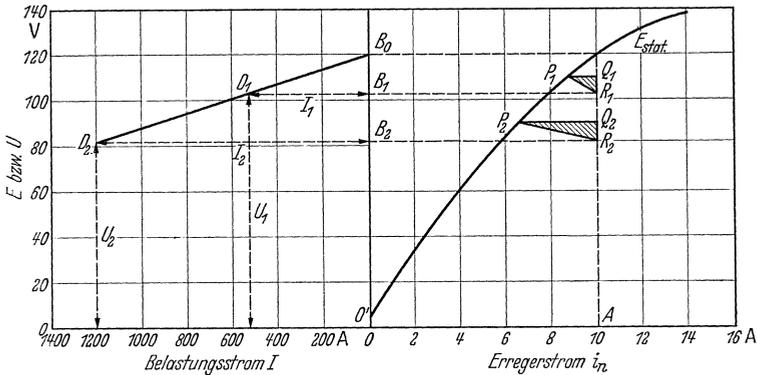


Abb. 17. Klemmenspannung beim Gleichstromerzeuger mit Nebenschlußwicklung für Fremderregung in Abhängigkeit von der Belastung; Belastungskennlinie.

die Erregung unabhängig von der Maschine ist. Es ist daher die fremderregte Maschine bei größerer Leistung mit Überstrom-Schnellschaltern zu sichern, die gegebenenfalls auch auf die Erregung arbeiten.

e) Die Gleichstrom-Doppelschlußmaschine. Die Arbeitsweise. Dieser Stromerzeuger erhält wie der Motor gleicher Bezeichnung zu der Ne-

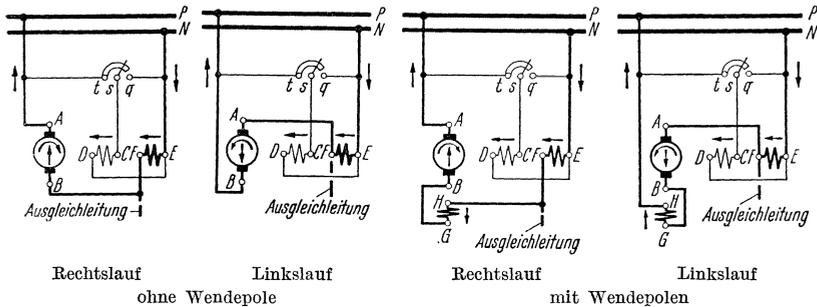


Abb. 18 bis 21. Gleichstromerzeuger mit Haupt- und Nebenschlußwicklung (Doppelschlußwicklung) für Selbsterregung.

benschlußwicklung noch eine vom Haupt- oder Belastungsstrom durchflossene Wicklung, um bei Änderungen der Belastung in bestimmten Grenzen die Klemmenspannung unverändert zu halten oder bei Belastungssteigerung diese zu erhöhen. Die Schaltung ist in Abb. 18 bis 23 wiederum für eine Maschine ohne und mit Wendepolen, ferner für selbst- und fremderregte Nebenschlußwicklung dargestellt. Zur Bestimmung der Hauptschlußwicklung bzw. des Maßes ihrer Wirkung muß bekannt sein, in welchen Grenzen die Belastungsänderungen verlaufen. Wird verlangt, daß die Klemmenspannung bei

Vollast größer als bei Leerlauf ist, um den mit wachsender Belastung höheren Spannungsabfall in den Leitungen zu decken, so muß die Hauptschlußwicklung entsprechend stärker wirksam werden (Überkompoundierung, Überverbundwirkung). Allerdings nimmt bei derartig ausgeführten Stromerzeugern die Spannung nicht genau im Verhältnis des ansteigenden Stromes zu, sondern entsprechend dem Sättigungsverhältnis der magnetischen Kreise anfangs etwas schneller, dann etwas langsamer.

Die Hauptschlußwicklung kann je nach der Größe der Maschine abschaltbar oder nicht abschaltbar ausgeführt werden. Bei abschaltbarer Hauptschlußwicklung tritt unter Umständen eine Leistungsminderung ein, was bei der Auswahl der Maschine und bei der Benutzung derselben zur Batterieladung berücksichtigt werden muß.

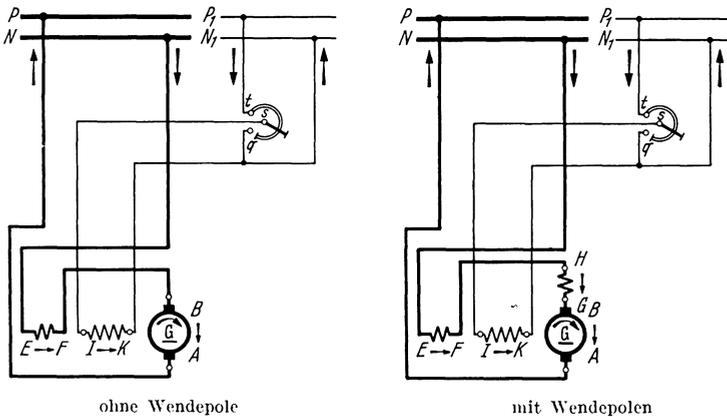


Abb. 22 und 23. Gleichstromerzeuger mit Haupt- und Nebenschlußwicklung (Doppelschlußwicklung) für Fremderregung.

Das Abschalten erfolgt durch einen an der Maschine angebrachten Schalter, der die Hauptschlußwicklung entweder kurzschließt oder öffnet. Beim Kurzschließen fließt stets noch ein geringer Strom in der Hauptschlußwicklung; das ist zulässig, wenn diese und die Nebenschlußwicklung im gleichen Sinn wirken. Im anderen Fall ist durch einen einpoligen Schalter die Hauptschlußwicklung zu trennen.

Die **Betriebskennlinien**. Die Leerlaufkennlinie unterscheidet sich wiederum nicht von derjenigen der selbsterregten Nebenschlußmaschine, weil bei Leerlauf die Hauptschlußwicklung stromlos ist.

Für die Beurteilung der Belastungskennlinie soll die Wirkung der Hauptschlußwicklung zunächst kurz für sich erläutert werden und zwar in der Form der Hauptschlußmaschine selbst.

Bei der reinen Hauptschlußmaschine ist der Anker- also der Belastungsstrom zugleich der Erregerstrom. Die Betriebskennlinien bei unveränderter Drehzahl zeigt Abb. 24. Magnetwicklung und äußeres Netz sind hintereinander geschaltet.

Die induzierte EMK ist bei offenem äußeren Stromkreis Null, denn

mit dem Aufhören des in der Hauptschlußwicklung fließenden Stromes wird auch die Kraftlinienzahl Null. Mit der Belastung im äußeren Stromkreis erregt sich die Maschine selbst.

Die Klemmenspannung U steigt mit wachsender Belastung an, um nach einem höchsten Wert wieder abzufallen, weil infolge der Eisen-sättigung im Punkt b der Gewinn an elektromotorischer Kraft durch Zunahme des Stromes kleiner wird als der steigende Spannungsabfall in der Maschine. Bei Kurzschluß hat die induzierte EMK ihren höchsten Wert, die Klemmenspannung wird dann Null. Die Leerlaufkennlinie verläuft angenähert wie die Kennlinie der Klemmenspannung. $\overline{P_1 P_2}$ ist der Spannungsabfall infolge der Schwächung des Feldes durch die Ankerrückwirkung, $\overline{P_2 P_3}$ ist der Spannungsabfall durch die Widerstände des Ankers, der Bürsten und der Erregerwicklung.

Ein Beispiel wird die Unbrauchbarkeit dieser Maschine sofort erkennen lassen. Soll eine Batterie geladen werden, und fällt die Drehzahl der Antriebsmaschine auch nur gering ab, so fällt die Spannung, und die Batteriespannung überwiegt. Alsdann polt sich die Maschine infolge des nunmehr entgegengesetzt fließenden Stromes um, die elektromotorischen Kräfte von Batterie und Maschine werden hintereinander geschaltet und der Strom kann infolge des geringen Widerstandes von Anker, Leitung und Batterie eine gefährliche Höhe erreichen. Das Ausschalten, Umpolen, Neuanfahren ist betrieblich undurchführbar. Ein ordnungsmäßiger Betrieb kann somit nicht erfolgen.

Das Zusammenwirken von Nebenschluß- und Hauptschlußwicklung gibt der Doppelschlußmaschine die bereits angegebenen Eigenschaften. Sache des Maschinenentwurfes ist es, die Wicklungsausführung so zu gestalten, wie es der Betrieb hinsichtlich des Spannungsverlaufes bei wechselnder Belastung verlangt.

Eine besondere Bestimmung für die Doppelschlußmaschine ist in den REM zur Spannungsänderung gegeben. Auf sie ist auf S. 8 bereits hingewiesen worden.

Der Verlauf der Betriebskennlinien richtet sich nach dem Anteil, den die Nebenschluß- und die Hauptschlußwicklung an der Erregung erhalten. Abb. 25 zeigt diese Kennlinien für E , U und den Wirkungsgrad η_G ; ein Vergleich mit Abb. 7 läßt die unterschiedliche Arbeitsweise ohne weiteres erkennen.

Die Doppelschlußmaschine darf nicht kurzgeschlossen werden, da dann der Strom auf den 2- bis 3fachen Nennwert an-

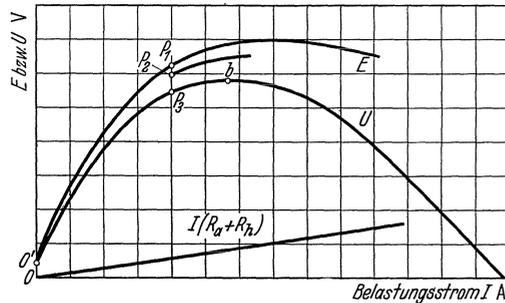


Abb. 24. Betriebskennlinien für den Gleichstromerzeuger mit Hauptschlußwicklung.

steigt und eine Beschädigung der Wicklungen in kurzer Zeit unvermeidlich ist.

Das Parallelschalten und der Parallelbetrieb von Doppelschlußmaschinen sind nicht gleich einfach wie bei Nebenschlußmaschinen, weil sich die im Anker jeder Maschine induzierte EMK mit der Belastung ändert, einem größeren Strom also ein größerer Spannungsabfall entspricht. Würden zwei Doppelschlußmaschinen ohne besondere Sicherheitseinrichtungen parallel arbeiten, so könnte sich die Belastung willkürlich auf die beiden Maschinen verteilen und bei geringerer Erregung oder einem kleinen Drehzahlabfall der einen Maschine diese von der anderen Maschine Strom erhalten bzw. letztere den größten Teil oder die ganze Belastung übernehmen. Es würde demnach zum mindesten ein Pendeln der Belastung zwischen den parallel arbeitenden Maschinen eintreten, was aus betrieblichen Gründen unzulässig ist. Um

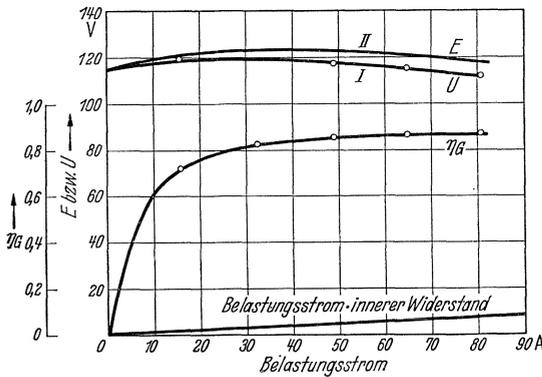


Abb. 25. Betriebskennlinien für den Gleichstrom-Doppelschluß-Stromerzeuger.

I Klemmenspannung, II induzierte EMK.

das zu verhindern, werden die Klemmen aller Maschinen, an denen die Hauptschlußwicklungen angeschlossen sind, untereinander durch eine Ausgleichleitung verbunden, somit alle Hauptschlußwicklungen unter sich parallel geschaltet (Abb. 26). Dann beeinflusst die Zunahme des Ankerstromes in einer Maschine die Erregungen aller anderen Maschinen, und die Summe aller erzeugten Ankerströme verteilt sich

auf die Hauptschlußwicklungen im umgekehrten Verhältnis der Widerstände der letzteren. Um ein einwandfreies Parallelarbeiten zu erreichen, ist es ferner notwendig, daß die Widerstände der einzelnen Strombahnen also der einzelnen Strecken der Ausgleichleitung und der Anschlußleitungen zu den Sammelschienen vollständig gleich und so klein wie möglich sind. Stellt sich die Stromverteilung in den Hauptschlußwicklungen nicht richtig ein, so soll dieses durch besondere Regel- oder Ausgleichwiderstände erreicht werden.

Das Parallelschalten oder das Herausnehmen aus dem Parallelbetrieb ist ebenfalls umständlicher als bei der Nebenschlußmaschine. Es geschieht am einfachsten in der Weise, daß die Ströme in der Ankerwicklung und in der Ausgleichleitung gleichzeitig geschlossen oder unterbrochen werden. Die zuzuschaltende Maschine wird mit Hilfe der Nebenschlußerregung auf die Sammelschienen Spannung gebracht, und es sind dann entweder alle drei Schalter 1, 2 und 3 (Abb. 26) gleichzeitig zu schließen oder, wenn die Schalter 3 getrennt untergebracht sind, erst diese und dann gemeinsam die beiden anderen. Bei

diesen Arten des Parallelschaltens tritt, falls die Maschinen nicht mit stärker erregter Hauptschlußwicklung arbeiten, ein Schwanken der Sammelschienenspannung nicht ein, wohl aber ist zu beachten, daß dabei die zugeschaltete Maschine plötzlich stark belastet und die bereits arbeitende entlastet wird. Es kann dann ein Hin- und Herschweben der Belastung zwischen den nun parallel arbeitenden Maschinen und

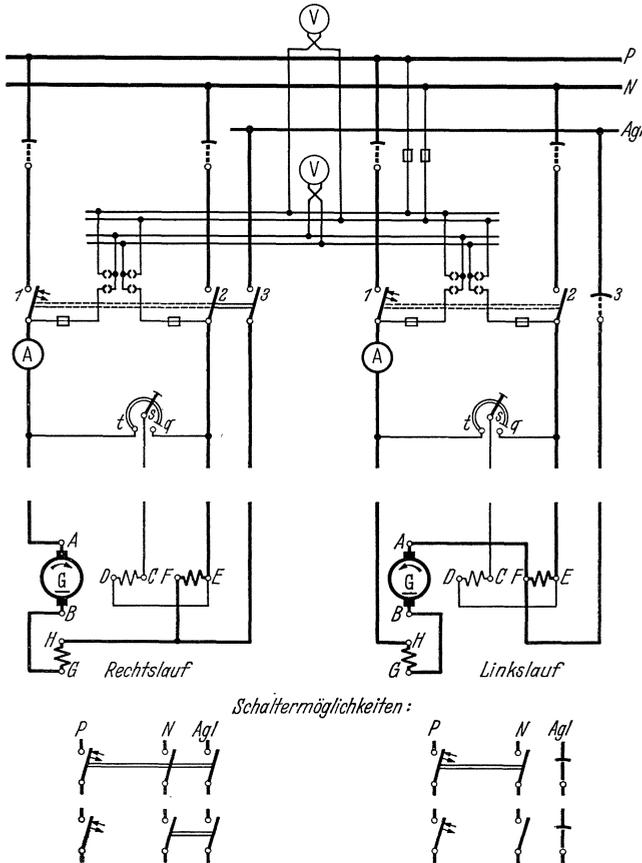


Abb. 26. Gleichstrom-Doppelschluß-Stromerzeuger für Selbsterregung in Parallelschaltung mit Ausgleichleitung.

ein Pendeln der Antriebsmaschinen die Folge sein. Trotzdem wendet man diese Form in Kraftwerken für Lichtbetrieb wohl am häufigsten an.

Arbeiten die Maschinen mit stärker erregter Hauptschlußwicklung, so ist im Augenblick des Parallelschaltens eine geringe Spannungsschwankung nicht zu vermeiden.

Das Anwendungsgebiet. Die Doppelschlußmaschinen finden vorzugsweise in Bahnkraftwerken und in solchen Betrieben (Industrieanlagen mit schwerem Kranbetrieb, Walzwerken, Hüttenwerken) Anwendung,

in denen mit starken, häufigen Belastungsschwankungen und Überlastungen zu rechnen ist, für deren Ausregelung keine besondere Pufferung vorgenommen wird, die Spannung an den Sammelschienen aber dennoch möglichst unverändert bleiben soll.

Für den Parallelbetrieb mit einer Batterie werden sie selten benutzt, da sich auch hier, wenn mehr als zwei Maschinen parallel arbeiten, Betriebsschwierigkeiten ergeben. Sind zwei Maschinen vorhanden, und sollen diese abwechselnd zur Aufladung der Batterie benutzt werden, so sind sie mit kurzzuschließender, oder besser mit abschaltbarer Hauptschlußwicklung einzurichten, da die dann notwendige

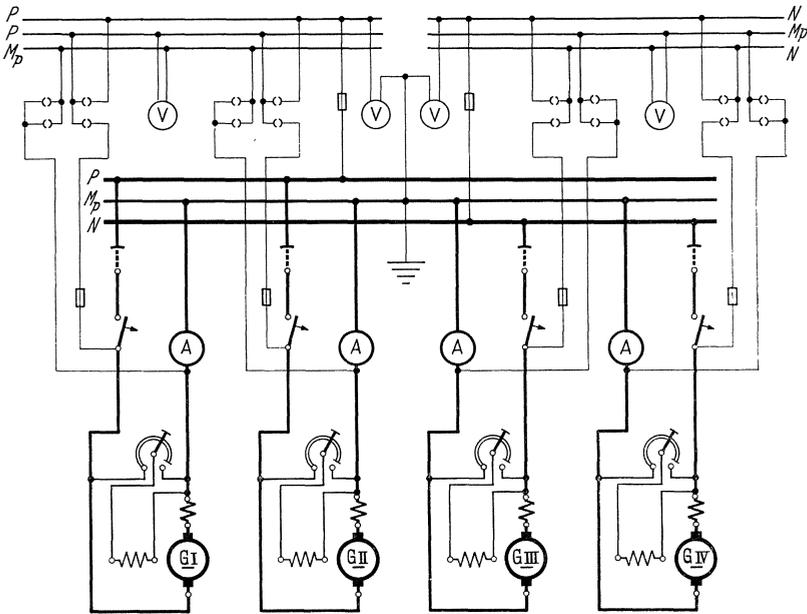


Abb. 27. Gleichstrom-Dreileiteranlage mit Zweileiter-Nebenschluß-Stromerzeugern für Selbst-erregung und halbe Außenleiterspannung.

Spannungserhöhung nur durch die Regelung der Nebenschlußerregung vorzunehmen ist. Die Verbindung der Hauptschlußwicklung der zweiten Maschine mit der Ausgleichleitung ist für die Zeit der Ladung zu lösen.

f) Stromerzeugung für Dreileiternetze. Wie bereits im Band II kurz erwähnt werden für die Speisung von Dreileiternetzen entweder zwei Gleichstrommaschinen, die je die halbe Außenleiterspannung erzeugen, in Reihe geschaltet, oder man benutzt eine Maschine zusammen mit einem Spannungsteiler. Ist eine Batterie vorhanden, so wird diese zweckmäßig für Spannungsteilung in Verbindung mit einem Ausgleichmaschinensatz verwendet. Auch Ausgleichmaschinen ohne Batterie werden vereinzelt benutzt.

Die erste Ausführung mit **in Reihe geschalteten Maschinen für halbe Außenleiterspannung** kommt neuerdings nur noch selten, vornehmlich dort zur Anwendung, wo ein bereits bestehendes Zweileiternetz in ein

Dreileiternetz umgebaut werden soll, weil dann die vorhandenen Maschinen weiter im Betrieb bleiben und durch entsprechende Schaltungen für den Betrieb auf ein Dreileiternetz eingerichtet werden können. Die Vorteile liegen in der Ersparnis an Maschinen und in der Spannungsregelung, die für jede Netzhälfte unabhängig von der anderen vorgenommen werden kann. Abb. 27 zeigt das Schaltbild.

Einfacher, in der Anlage billiger und weniger Platz beanspruchend ist der **Stromerzeuger mit Spannungsteiler** (Abb. 28). Es wird eine Maschine für die Außenleiterspannung benutzt, die zwei Schleifringe erhält, zwischen denen eine Drosselspule $Dr.$ als Spannungsteiler liegt. Elektrisch gestalten sich die Verhältnisse folgendermaßen:

Zwischen der Mitte Mp und den Punkten U und V der Drosselspule, die über die Schleifringe mit zwei entgegengesetzten Punkten der Ankerwicklung verbunden sind, sowie jedem Pol der Gleichstrommaschine

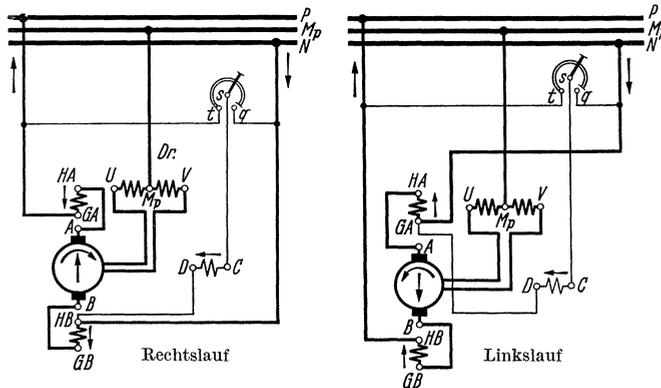


Abb. 28. Gleichstrom-Dreileiteranlage mit Zweileiter-Nebenschluß-Stromerzeugern für Selbsterregung und Spannungsteilung durch Drosselspule (Spannungsteiler). (Geteilte Wendepolwicklung.)

herrscht die halbe Maschinenspannung. Ist die Belastung in beiden Netzhälften gleich, fließt in der Drosselspule lediglich der Magnetisierungsstrom, der ein Wechselstrom ist, der aber infolge des hohen Blindwiderstandes der Spule nur sehr klein ausfällt und daher keine nennenswerten Stromwärmeverluste verursacht. Weichen die Belastungen in den beiden Netzhälften voneinander ab, dann lagert sich über den Magnetisierungsstrom der Mittelleiterstrom, der gleich dem Unterschied der Ströme in den Außenleitern ist, und fließt zum Anker. Es tritt infolge des Spannungsabfalls in der Drosselspule ein Spannungsunterschied zwischen den beiden Netzhälften ein. Dieser Spannungsunterschied beträgt bei den gebräuchlichen Ausführungen etwa 1,5 bis 2 vH der halben Außenleiterspannung. (Spannungsunterschied beider Netzhälften 4 vH.) Der Spannungsteiler wird dabei in der Regel für einen Strom im Mittelleiter bemessen, der etwa 15 vH des höchsten Außenleiterstromes beträgt. Die Größe des Mittelleiterstromes muß indessen stets besonders angegeben werden, da von dieser die Abmessungen der Drosselspule abhängen.

Einen besonderen Nachteil hat diese Dreileiterschaltung mit Spannungsteiler darin, daß eine unabhängige Spannungsregelung für jede Netzhälfte nicht möglich ist.

Eine weitere **Spannungsteilung durch einen besonderen Ausgleichmaschinensatz** zeigt Abb. 29. Dieser Maschinensatz besteht aus zwei gleichen Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen, die mechanisch gekuppelt sind. Je nach den Belastungsverhältnissen der beiden Netzhälften läuft die eine Maschine als Motor, die andere als

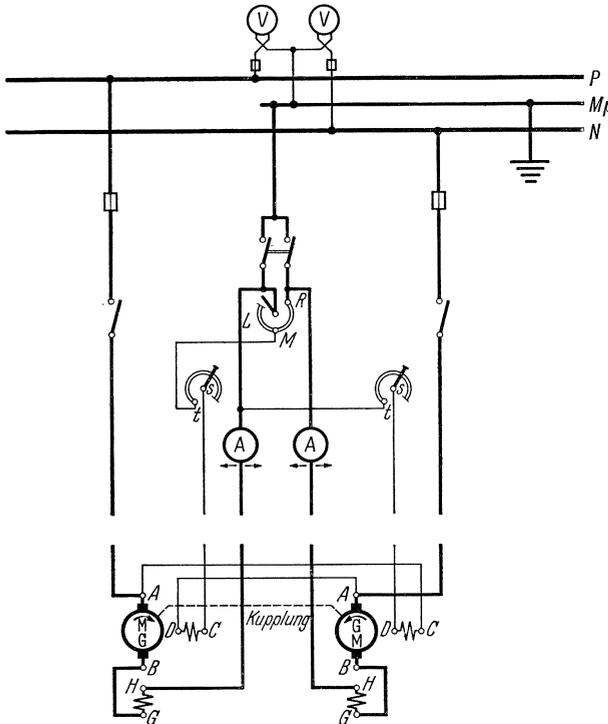


Abb. 29. Ausgleichmaschinensatz zur Spannungsteilung für Gleichstrom-Dreileiteranlage.

Stromerzeuger. Die

Erregerwicklungen werden über Kreuz an die Teilspannungen angeschlossen, so daß die Maschine, deren Anker zwischen dem + Außenleiter und dem Mittelleiter liegt, ihre Felderregung von der 0—(Mp)-Netzhälfte und umgekehrt erhält. Bei dieser Anordnung wird die auf die stärker belastete Netzhälfte arbeitende

Ausgleichmaschine von der schwächer belasteten Hälfte erregt, arbeitet also mit stärkerem Feld als die auf die schwächer belastete Netzhälfte geschaltete Maschine. Infolge dieser Kreuzschaltung der Nebenschlußwicklungen der Ausgleichmaschinen

wird der Spannungsausgleich beider Netzhälften bei Belastungsunterschieden nahezu vollkommen und selbsttätig herbeigeführt.

Die Ausgleichmaschinen halten in dieser Schaltung die Spannungen beider Netzhälften bei Belastungsunterschieden selbsttätig bis auf einen Spannungsunterschied von etwa 1 bis 2 vH der halben Netzspannung gleich. Auf der stärker belasteten Netzhälfte wird also die Sammelschienenspannung etwa 1 bis 2 vH niedriger sein als auf der schwächer belasteten. Im Kraftwerksbetrieb wird jedoch die Forderung gestellt, daß die Sammelschienenspannung der stärker belasteten Netzhälfte innerhalb bestimmter Grenzen höher gehalten werden muß, als die der schwächer belasteten Hälfte. Um dieser Forderung zu genügen, erhalten die Feldwicklungen der Ausgleichmaschinen Nebenschlußregler, durch deren

richtige Einstellung bei Belastungsunterschieden beider Netzhälften ihre mittleren Netzspannungen gemessen an den Speisepunkten einander praktisch gleich gemacht werden können.

Zum Anlassen des Ausgleichmaschinensatzes ist nur ein Anlasser erforderlich, der in die Mitte zwischen beide Ausgleichmaschinen gelegt wird, so daß diese als Motoren in Reihenschaltung zwischen den Außenleitern anlaufen. Der Anlasser muß so eingerichtet sein, daß

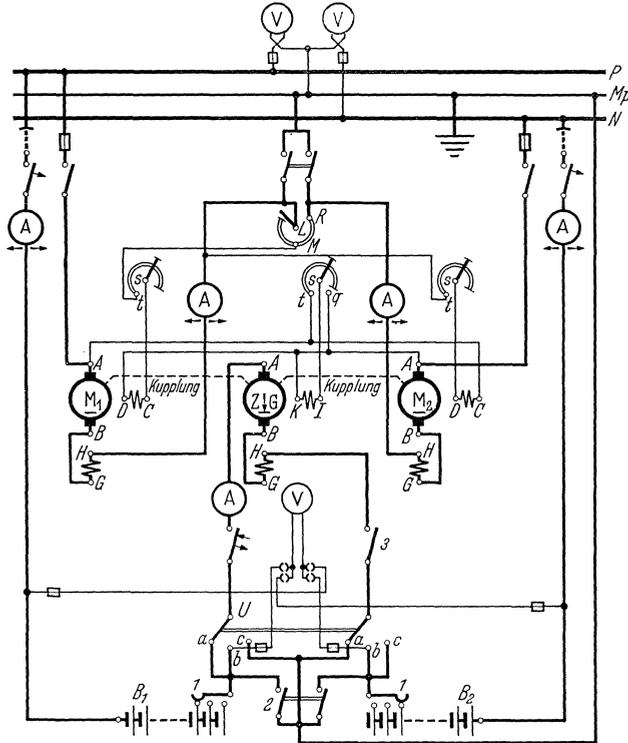


Abb. 30. Zusatz-Ausgleichmaschinensatz zur Spannungsteilung und Batterieladung für Gleichstrom-Dreileiteranlage.

der Mittelleiter an die beiden Ausgleichmaschinen angeschlossen wird, sobald die Schaltkurbel die Endstellung erreicht.

Spannungsteilung durch eine Batterie. Da für die öffentliche Stromversorgung eine unabhängige Regelung der beiden Netzhälften unbedingt gefordert werden muß und zudem in der Mehrzahl der Fälle eine Batterie vorhanden sein oder zweckmäßig aufgestellt wird, wird diese zur Spannungsteilung benutzt und je zur Hälfte auf beide Netzhälften geschaltet. In diesem Fall muß aber ebenfalls ein Ausgleichmaschinensatz verwendet werden, um eine ungleichmäßige Beanspruchung der Batteriehälften zu vermeiden. Zur Ladung der Batterie erhält dieser Maschinensatz noch eine dritte Maschine, den Zusatzstromerzeuger ZG. In Abb. 30 ist hierfür das Schaltbild gezeichnet.

Zusatzstromerzeuger müssen stets fremderregt werden. Für die Bestimmung der Spannungsgrenzen der Zusatzmaschine ist nur die erforderliche Zusatzspannung der Gesamtbatterie maßgebend, weil sie in dieser Schaltung nur als Zusatz- und nicht als Lademaschine arbeitet.

Da die Batteriegruppen lediglich während der Entladung zur Spannungsregelung der Netzgruppen verwendet werden, ist für jede Batteriegruppe nur ein Einfachzellenschalter erforderlich, dessen Schaltstückzahl der Spannungsänderung während der Entladung entspricht.

Beim Übergang von Entladung auf Ladung wird der Entladestrom mit dem betreffenden Zellenschalter auf Null gestellt, die Batterie getrennt und der Batterieumschalter U auf Ladung gelegt.

Der Ausgleichmaschinensatz kann weiter zu verschiedenen Schaltungen in Verbindung mit der Batterie benutzt werden.

1. Ladung der Gesamtbatterie in einer Reihe.

Die Zusatzmaschine ZG . wird durch Umlegen des mehrpoligen Umschalters U in Stellung b (Schalter 2 offen) zwischen die beiden Batteriehälften B_1 und B_2 geschaltet und die Batterie gleichzeitig vom Mittelleiter des Netzes getrennt. Die Hauptmaschine arbeitet mit unveränderter Spannung auf die beiden Außenleiter, liefert außerdem den Ladestrom für die Batterie und speist die beiden Antriebsmotoren M_1 und M_2 der Zusatzmaschine. Die für die Batterieladung erforderliche Zusatzspannung liefert die Zusatzmaschine: Die Spannungsteilung erfolgt allein durch die beiden Antriebsmotoren M_1 und M_2 , die als Ausgleichmaschinen arbeiten. Aus diesem Grund wird die Leistung der beiden Antriebsmotoren zusammen um etwa 25 vH größer gewählt als dem höchsten Kraftbedarf der Zusatzmaschine entspricht.

1. Beispiel: Der Ladestrom der Batterie betrage 150 A, die Zusatzspannung 100 V; der Zusatzstromerzeuger muß demnach $\frac{150 \cdot 100}{1000} = 15$ kW leisten. Bei einem Wirkungsgrad der Zusatzmaschine von 88 vH sind zum Antrieb $17 \text{ kW} = 23,2$ PS erforderlich. Jeder der beiden Motoren muß demnach für $1,25 \cdot \frac{17}{2} = 10,6$ kW = 14,5 PS gebaut sein. Es wird dann im äußersten Fall der eine Motor 14,5 PS leisten, während der andere nur $23,2 - 14,5 = 8,7$ PS abzugeben hat. Die beiden Motoren können somit bei einem Wirkungsgrad von 87 vH einen Belastungsunterschied von $\frac{10,6 - 6,4}{0,87} = 4,85$ kW zwischen beiden Netzhälften ausgleichen.

2. Nachladen einer Batteriehälfte.

Wenn nach vollendeter Ladung der Gesamtbatterie die eine Batteriehälfte z. B. B_2 nachgeladen werden soll, wird der Umschalter U . in Stellung c gebracht. Die Zusatzmaschine liegt dann mit der Batteriehälfte B_2 und der Ausgleichmaschine M_1 in Reihe zwischen den Außenleitern des Netzes, während die Batteriehälfte B_1 ruht, d. h. weder Strom aufnehmen noch abgeben soll. Der von der Hauptmaschine gelieferte Strom fließt durch den —-Leiter, durch die Batterie B_2 , die Zusatzmaschine zum Mittelleiter und von diesem durch die Ausgleichmaschine M_1 zum +-Leiter. Der Motor M_1 treibt die Ausgleichmaschine M_2 als Stromerzeuger zur Ladung der Batteriehälfte B_2 und die Zusatzmaschine ZG zur Spannungserhöhung des Ladestroms an.

2. Beispiel: Beträgt die Außenleiterspannung $2 \cdot 120$ V, und soll die Batteriehälfte B_2 mit 80 A und einer Zusatzspannung von 60 V geladen werden, so hat die Zusatzmaschine $\frac{80 \cdot 60}{1000} = 4,8$ kW zu leisten. Unter der Annahme, daß während der Ladung die beiden Netzhälften genau gleich belastet sind, ein Ausgleich also nicht erforderlich ist, möge der Motor M_1 den Strom i_1 aufnehmen, der Stromerzeuger M_2 den Strom i_2 abgeben. Dann ist unter der Annahme eines Wirkungsgrades von 86 vH für jede Maschine:

$$\text{die Leistung des Motors } M_1 = \frac{i_1 \cdot 120 \cdot 0,86}{1000} \text{ kW,}$$

$$\text{die Kraftaufnahme der Zusatzmaschine } ZG. = \frac{4,8}{0,86} \text{ kW,}$$

$$\text{die Kraftaufnahme der als Stromerzeuger arbeitenden Ausgleich-} \\ \text{maschine } M_2 = \frac{i_2 \cdot 120}{0,86 \cdot 1000} \text{ kW,}$$

ferner infolge der Kupplung der drei Maschinen:

$$\frac{i_1 \cdot 120 \cdot 0,86}{1000} = \frac{4,8}{0,86} + \frac{i_2 \cdot 120}{0,86 \cdot 1000}.$$

Da $i_1 + i_2 = 80$ A der Ladestrom der Batteriehälfte B_2 ist, folgt:

$$i_1 = \frac{4,8 \cdot 1000}{120 \cdot 0,86^2} + \frac{i_2}{0,86^2} = 80 - i_2$$

und hieraus:

$$i_2 = \frac{120 \cdot 80 \cdot 0,86^2 - 4800}{120 (1 + 0,86^2)} \cong 11 \text{ A,}$$

$$i_1 = 80 - 11 = 69 \text{ A.}$$

Der Motor M_1 nimmt also 69 A bei 120 V auf, der Stromerzeuger M_2 gibt $\frac{11 \cdot 120}{1000} = 1,32$ kW zur Ladung der Batteriehälfte B_2 ab.

Wenn während der Ladung der Batteriehälfte gleichzeitig Belastungsunterschiede in den Netzhälften ausgeglichen werden müssen, so muß der Ladestrom für die Batterie so gewählt werden, daß bei gleichzeitiger Ladung und Ausgleich der Motor M_1 nicht überlastet wird.

3. Ausgleich der Belastungsunterschiede beider Netzhälften ohne Batterieladung.

Zur Verhinderung ungleicher Entladung der beiden Batteriehälften bei stärkeren Belastungsunterschieden der beiden Netzhälften können die beiden Ausgleichmaschinen mit den Batteriehälften parallel arbeiten, wobei durch den Umschalter U in Stellung b , geschlossenem Schalter 2 und offenem Schalter 3 die Batteriemitte mit dem Mittelleiter verbunden bleibt und die Zusatzmaschine leer mitläuft.

4. Ausgleich der Belastungsunterschiede beider Netzhälften ohne Zuhilfenahme der Batterie.

Die Schaltung bleibt wie unter 3; mittels des Umschalters 2 wird jedoch die Batterie vom Mittelleiter abgetrennt.

3. Beispiel: Bei der im 1. Beispiel angenommenen Größe und dem Wirkungsgrad der Ausgleichmaschinen vermag die Maschine M_1 als Motor $\frac{10,6}{0,87} = 12,2$ kW von der einen Netzhälfte aufzunehmen; die Maschine M_2 wird dann als Stromerzeuger von M_1 angetrieben $10,6 \cdot 1,36 = 14,5$ PS aufnehmen und $14,5 \cdot 0,736 \cdot 0,87$

= 9,3 kW an die andere Netzhälfte abgeben. Der Maschinensatz gleicht also einen Belastungsunterschied von $12,2 + 9,3 = 21,5$ kW zwischen beiden Netzhälften aus.

Ist eine Lichtanlage von 2 · 220 V mit einer Bahnanlage für 500 bis 800 V vereinigt, so kann der Zusatz-Ausgleichmaschinensatz auch als einfacher Zusatzmaschinensatz zur Ladung der Pufferbatterie verwendet werden. Es werden dann die beiden Ausgleichmaschinen hintereinander und die Zusatzmaschine in Reihe mit der Batterie zwischen die Bahnschienen geschaltet (Abb. 31).

3. Die Akkumulatoren (Sammler).

a) Die Anwendung. Aufbau und Arbeitsweise der Bleiakkumulatoren im allgemeinen werden als bekannt vorausgesetzt. Auf die neuen Stahlakkumulatoren wird später kurz eingegangen werden.

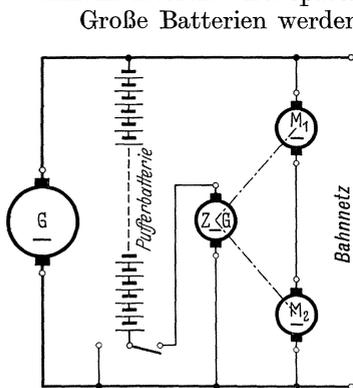


Abb. 31. Ladung einer Pufferbatterie mit Zusatz-Ausgleichmaschinensatz.

Große Batterien werden heute für selbständige Gleichstromanlagen noch ebenso gebraucht wie früher. In Deutschland aber mit seinen über alle Landesteile weitverzweigten und betriebs-sicheren Hochspannungsnetzen werden die Batterien für städtische Gleichstromnetze nicht mehr erneuert, wenn zum Fremd-strombezug über Gleichrichter über-gegangen wird. Dann steht die elektrische Energie Tag und Nacht zur Verfügung und der eine Vorteil der Batterie, die Strom-lieferung des Nachts und Feiertags bei Stillstand der Maschinen allein zu über-nehmen, entfällt. Auch der zweite Vorteil der augenblicklichen Aushilfe bei Maschi-nenstörungen ist zumeist nicht mehr von besonderer Bedeutung. Die Wirtschaftlichkeit der Gleichrichter tritt zu stark in den Vordergrund. Das gleiche gilt gegen Umformer.

Batterien werden daher heute insbesondere für kleine örtlich ausgenutzte Kraftwerke mit Diesel- oder Wasserturbinenantrieb, für Notstromanlagen in Warenhäusern, Krankenhäusern, Banken u. dgl. benutzt. Ihre Verwendung für Fahrzeuge soll nicht behandelt werden. Nur Gleichstrom-Fabrikanlagen ohne die Möglichkeit des Fremdstrombezuges und besonderer Art erhalten stets Batterien zur Aushilfe und für Stromlieferung zur Zeit des Fabrikstillstandes. Batterien kleinerer Abmessung kommen in größeren Drehstromkraftwerken stets für die Stromlieferung an die Notbeleuchtung und an besonders wichtige, unabhängig vom Kraftwerkszustand zu bedienende Einrichtungen z. B. Hilfsschalter, Steuerstromkreise, Befehlsanlagen, Schützen oder Drosselklappen in Wasserkraftanlagen mit Druckrohren zur Aufstellung. Der Betriebsingenieur schätzt das Vorhandensein einer Batterie für solche Betriebszwecke, die jederzeit besonders gesichert sein müssen, auch wenn eine Vollstörung eintritt, außerordentlich unter der Voraus-setzung, daß sie auch tatsächlich und unabhängig von ihrer jeweiligen

Beanspruchung betriebsbereit ist. Daß letzteres auch für alle anderen Zwecke selbstverständlich ist, wenn der Wert der Batterie nicht beeinträchtigt werden soll, bedarf nur dieser kurzen Erwähnung. Jedenfalls ist bei der Wahl der Ladeeinrichtungen und ihrer Schaltung mit der Batterie zusammen auf die Erfüllung dieser Forderung besonderes Augenmerk zu richten.

b) Die Zellenzahl und die Batteriegröße. Aus den Kennlinien Abb. 32 und 33 für Entladung und Ladung ist der Spannungs-

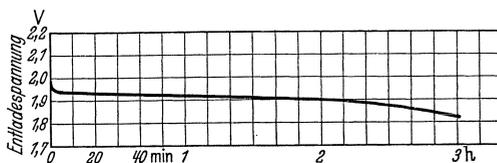


Abb. 32. Zellen-Entladespannung bei 3 h Entladung mit höchstzulässigem Strom für einen Bleisammler.

verlauf zu ersehen. Die tiefste Entladespannung wird von den Herstellern mit Rücksicht auf eine genügende Lebensdauer der Zelle festgesetzt. Zur Aufladung ist ein Spannungsverlauf nach Abb. 33 erforderlich und zwar mit etwa 2,15 V beginnend. Hat die Ladespannung 2,3 V bei Nennstrom erreicht, dann folgt ein verhältnismäßig langsamer

Spannungsanstieg von 2,3 auf 2,4 V. Von dann ab ist eine schnelle Spannungssteigerung bis etwa 2,75 V erforderlich. Bei der Entladung mit voller Beanspruchung sinkt die Zellenspannung sehr bald auf etwa 2,1 V und weiter bis auf 1,95 V; sie bleibt dann bei voller Stromentnahme lange Zeit auf diesem Wert, bis sie bei weiterer Entnahme auf den geringst zulässigen Wert von 1,85 bis 1,81 V heruntergeht. Als mittlere Spannung einer Zelle für die Entladung ist bei Dauerbeanspruchung ein Wert von etwa 2 V innerhalb der vorgesehenen Entladezeit anzunehmen. Bleibt die Zelle längere Zeit unbenutzt, so sinkt die Spannung von 2,75 V auf etwa 2,4 V und fällt bei Benutzung auf die oben angegebenen Werte. Um die Batterie stets in gutem Zustand zu erhalten, vor allen Dingen die chemische Umwandlung in der Zelle von Zeit zu Zeit besonders anzuregen, wird vom Hersteller eine Überladung nach bestimmter Benutzungszeit vorgeschrieben, auf deren Erfüllung betrieblich zu achten ist.

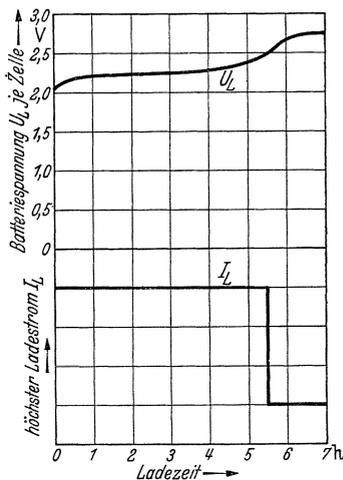


Abb. 33. Zellenladespannung und -ladestrom bei 7 h Ladung für einen Bleisammler.

Die Zellenzahl wird nach der Zellenspannung am Ende der Entladung berechnet. Bei der Sammelschienenspannung U muß die Gesamtzahl der Zellen betragen:

$$Z = \frac{U}{1,85} \tag{12}$$

Da nun die Klemmenspannung der Batterie für den Netzbetrieb nach der Ladung $U_B = 2,1 \cdot Z$ V beträgt, muß ein Teil der Zellen ab-

geschaltet werden, bis der verbleibende Teil der Batterie die Sammelschienenspannung U aufweist. Sinkt die Batteriespannung unter die Sammelschienenspannung, so werden nacheinander die bis dahin ausgeschalteten Zellen mittels eines Zellschalters zugeschaltet. Man unterscheidet demnach zwischen der Stammbatterie und den Schaltzellen. Die Zellschalter werden als Einfach- oder als Doppelschalter ausgeführt, über deren schalttechnischen Unterschied weiter unten gesprochen wird.

Beim Einfachzellschalter muß die Stammbatterie:

$$Z_{St, E} = \frac{U}{2,1} \quad (13)$$

Zellen besitzen, und da:

$$Z = \frac{U}{1,85},$$

so sind $Z_{Sch, E} = Z - Z_{St, E}$ Schaltzellen vorhanden, also bei 230 V Sammelschienenspannung:

$$Z = \frac{230}{1,85} \simeq 124 \quad \text{und} \quad Z_{Sch, E} \simeq 14.$$

Beim Doppelschalter ergibt sich die Zahl der Zellen für die Stammbatterie aus:

$$Z_{St, D} = \frac{U}{2,75}, \quad (14)$$

und die Zahl der Schaltzellen beträgt dann:

$$Z_{Sch, D} = Z - Z_{St, D}, \quad (15)$$

also wieder bei 230 V Sammelschienenspannung:

$$Z = \frac{230}{1,85} \simeq 124 \quad \text{und} \quad Z_{Sch, D} \simeq 40.$$

Für die Bemessung der Größe einer Batterie ist die Kapazität in Amperestunden maßgebend, wobei in diesem Fall unter Kapazität die Arbeitsfähigkeit d. h. das Produkt aus Entladestrom \times Stunden, also die Zahl der Amperestunden zu verstehen ist, welche die Batterie bei der Entladung abgeben kann. Die Kapazität einer bestimmten Batterie ist um so größer, je länger die Entladezeit und je kleiner dabei der Entladestrom angesetzt wird.

4. Beispiel: Sind 500 Lampen von je 25 W während 5 Stunden und ferner 44 kW für Motoren während 3 Stunden bei einer Spannung von 220 V an den Sammelschienen einschließlich der Verluste in den Leitungen von der Batterie zu speisen, so ist diese zu bemessen für:

$$\begin{aligned} 500 \frac{25}{220} &= 56,8 \text{ A} \times 5 \text{ h} = 284 \text{ Ah} \\ + \frac{44000}{220} &= 200 \text{ A} \times 3 \text{ h} = 600 \text{ Ah} \\ \hline &\text{zus. } 256,8 \text{ A} \quad \text{zus. } 884 \text{ Ah Kapazität,} \end{aligned}$$

und die Batterie ist zu wählen für:

$$\frac{884}{256,8} \simeq 3,7 \text{ h Entladezeit bei } 256,8 \text{ A.}$$

Welchen Strom die Batterie und für welche Zeit sie diesen innerhalb eines 24stündigen Betriebstages oder je nach ihrem Zweck darüber hinaus abzugeben hat, muß stets sorgfältig betrieblich und wirtschaftlich untersucht werden. Es dienen dazu die Belastungskennlinien des Netzes, für die Unterlagen im Band III/1 gegeben sind, oder eine besondere Zweckbeurteilung z. B. für Not- und Steuerbatterien. Auf die große, allerdings der Zeit nach beschränkte Überlastbarkeit der Batterie ist besonders aufmerksam zu machen.

Die Kapazität der zu wählenden Batterie wird also aus der verlangten Stromlieferung nach Entladestrom I_E und Entladezeit h_E bestimmt. Beide ergeben sich aus dem Einsatzzweck also z. B. aus der Deckung der Nachtbelastung, der Übernahme bestimmter Spitzenlast oder der Stoßstrombelastung bei Pufferanlagen. Es ist die Kapazität:

$$K_B = I_E \cdot h_E \text{ Ah.} \quad (16)$$

In unmittelbarem Zusammenhang mit der Entladung steht betrieblich und wirtschaftlich die Ladung, für die ebenfalls Strom I_L und Zeit h_L maßgebend sind. In der Regel wird die Ladezeit zu 3 Stunden gewählt. Es ist der Ladestrom:

$$I_L = \frac{K_B}{h_L} = I_E \cdot \frac{h_E}{h_L} \text{ A.} \quad (17)$$

Der höchstzulässige Ladestrom ist durch die zulässige Erwärmung der Batterie und die Gasentwicklung begrenzt. Nach Abb. 33 muß der höchstzulässige Ladestrom I_L etwa nach $5\frac{1}{2}$ Stunden stark herabgesetzt werden, damit die Beanspruchung durch die Gasentwicklung die Zellen nicht beschädigt.

Bei $h_E = 10$ wird der Ladestrom rd. 3,3mal größer als der Entladestrom und könnte die Batterie durch zu starke Erwärmung zerstören. Daraus ist zu ersehen, daß sorgfältig geprüft werden muß, wie I_L bzw. h_L zu bestimmen sind, um auch die Maschinenanlagen im Rahmen des Tagesnetzbetriebes wirtschaftlich am vorteilhaftesten auszunutzen, damit die Batterie zur gewollten Zeit vollständig geladen zur Verfügung steht. Ferner ergibt sich aus solchen Untersuchungen der Maschineneinsatz insgesamt und die Form der Ladung entweder mit den Hauptmaschinen, mit einer Zusatzmaschine oder durch Batteriegruppenaufteilung. Bei Dreileiteranlagen ist die Untersuchung auch auf das Nachladen einer Batteriehälfte zu erstrecken.

Wie nach dieser Richtung vorzugehen ist, lassen die Abb. 34 bis 36 und die zu diesen gegebenen Erklärungen ersehen.

Für Fabrikanlagen ist die Größenbestimmung der Batterie verhältnismäßig einfach, denn sie hat dort zumeist die Aufgabe, die Maschinen in der Hauptsache während der Beleuchtungszeit zu unterstützen und nachts, wenn das Kraftwerk stillgelegt wird, die Stromlieferung für die Beleuchtung zu übernehmen. Es kommt also hier oft nur eine verhältnismäßig kleine Batterie oder eine solche für lange Entladezeit zur Aufstellung, sofern nicht eine gewisse Notbereitschaft für plötzliche Maschinenstörungen von der Batterie zur Verfügung gestellt werden soll. In Abb. 34 ist ein Beispiel behandelt. Die Fabrikanlage hat

zur Zeit ihrer höchsten Belastung einen Strombedarf von 600 A. Das Zweileiternetz wird mit 220 V gespeist. Die Batterie soll so bemessen werden, daß sie die Nachtbelastung decken kann und in einer Zeit geladen wird, die innerhalb der Tagesschicht der Maschinenwärter von 5 bis 22 Uhr liegt, so daß die Nachtschicht voll erspart bleiben kann. Dabei darf der Einsatz einer Maschine für den Fabrikbetrieb in der Zeit von 6 bis 17 Uhr nicht beschränkt und die zur Aushilfe bereitstehende zweite Maschine nicht in Anspruch genommen werden.

Aus der Nachtbelastung mit 75 A bei 10stündiger Inanspruchnahme ergibt sich die Kapazität der Batterie zu 750 Ah. Mit einem Sicherheitszuschlag von 250 Ah wird die Batterie für eine Kapazität von 1000 Ah gewählt. Dann kann sie auch noch gegebenenfalls für Dek-

kung besonderer Spitzenleistungen und des Strombedarfes während der Mittagspause herangezogen werden.

Da die ersten beiden Schichten der Maschinenwärter zwischen 5 Uhr und 22 Uhr liegen, muß in dieser Zeit die Ladung der Batterie erfolgen. Die Maschine ist ab 6 Uhr bis 17 Uhr nicht verfügbar, die Mittagszeit mit einer Stunde reicht nicht aus. Infolgedessen ist für die Ladezeit die Zeit von 18 bis 22 Uhr wirtschaftlich am günstigsten, in der dann auch noch Überstunden im Fabrikbetrieb geleistet werden könnten, ohne die Ladezeit und damit den Einsatz der Batterie für die Nacht zu beschränken.

Als Ladezeit sind 3 Stunden anzunehmen. Das ergibt einen Lade-

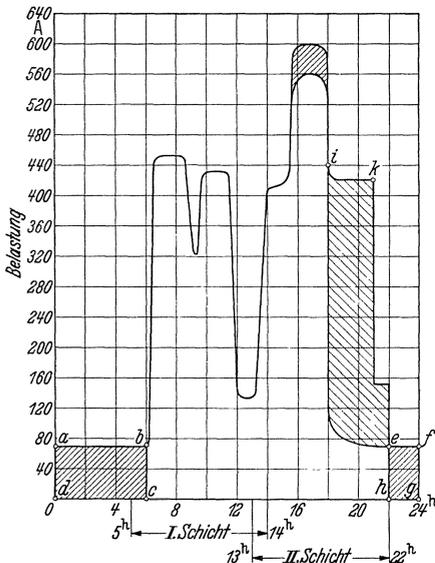


Abb. 34. Batterieentladung und Ladung für eine Fabrikanlage.

▨ Entladung, ▩ Ladung.

strom von 330 A. Aus Abb. 34 ist zu ersehen, daß dieser Ladestrom ohne weiteres von der Betriebsmaschine ohne Beschränkung des Fabrikbetriebes geliefert werden kann. Die gestellten Bedingungen sind somit erfüllt. Da noch eine zweite Maschine vorhanden ist, ist die Fabrikanlage nach allen Richtungen energiewirtschaftlich gesichert.

Für Anlagen zur Eigenversorgung (kleine Gutsanlagen, Warenhäuser, öffentliche Gebäude u. dgl.), die zumeist nur mit einem Maschinensatz ausgerüstet sind und einen Strombedarfverlauf nach Abb. 35 aufweisen, ist ebenfalls die Batteriegröße leicht aus der Größe der angeschlossenen Stromverbraucher und ihrer Einschaltzeit zu ermitteln. Soll die Batterie zu Notzwecken für einen Teil oder die Gesamtanlage Verwendung finden, ist auch hier deren Entladestrom und Entladedauer leicht festzustellen.

Die Stromerzeugung mit nur einer Maschine und einer Batterie hat

allerdings nur für ganz kleine Anlagen Bedeutung, für die als Antriebsmaschinen Wasserturbinen benutzt werden, weil diese die allergeringsten Störungen aufweisen, sofern solche nicht von der Wasserkraft selbst ausgehen (vereister Zulauf, Hochwasser, Trockenzeit). Aus der Betriebskennlinie Abb. 35 ist dies sofort zu ersehen und soll ebenfalls an einem Beispiel erläutert werden.

Den Strombedarf am ungünstigsten, also höchstbelasteten Tage zeigt der Linienzug $a b m e f$. Der Strombedarf zur Spitzenzeit beträgt 160 A und zur Zeit der geringsten Nachtbelastung 20 A. Soll die 220-V-Maschine die Spitzenlast decken, so ist sie für $\frac{160 \cdot 220}{1000} = 36 \text{ kW}$ zu bemessen. Soll die Batterie die Nachtlast allein übernehmen und zwar in der Zeit von 22 bis 6 Uhr — wiederum zur Ersparnis einer Nacht-

bedienung von 8 Stunden —, so ist sie als Durchschnitt aus dem Linienzug $e f a b$ für achtstündige Entladung bei etwa 30 A Entladestrom zu wählen. Um noch eine gewisse Sicherheit zu besitzen, wird sie für 30 A bei zehnstündiger Entladung $= 300 \text{ Ah}$ Kapazität vorgesehen. Um 6 Uhr ist sie fast entladen und muß nun für die Ladung so in den Belastungsverlauf eingeschaltet werden, daß die Leistung der Maschine nicht überschritten wird, wobei der Stromverbrauch der Anlage selbst zu berücksichtigen ist. Bei etwa dreistündiger Ladung ist ein Ladestrom von $\frac{300}{3} = 100 \text{ A}$ erforderlich. Das

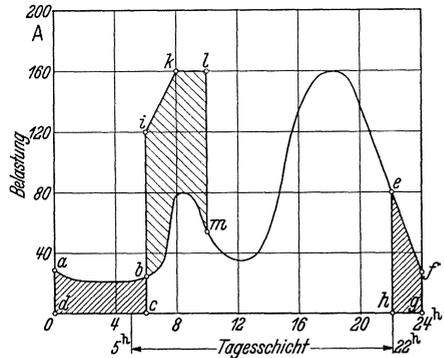


Abb. 35. Batterieentladung und Ladung bei nur einer Maschine für die Bedarfsdeckung (Eigenanlage).

▨ Entladung, ▩ Ladung.

ergibt dann den Ladeverlauf nach dem Linienzug $b i k l m$. Bei sechsstündiger Ladung sinkt der Ladestrom etwa auf die Hälfte, wozu überzugehen wäre, wenn der Stromverbrauch der Anlage größer als 80 A wäre. Es ist also bei einer Störung des Maschinensatzes in der geladenen Batterie nur eine Kapazität von 300 Ah für Deckung des gesamten Netzbedarfes vorhanden. Erfolgt die Störung bei ungünstigem Ladezustand der Batterie, kommt die gesamte Stromerzeugung zum Erliegen.

In Anlagen für öffentliche Stromabgabe, also in allen Elektrizitätswerken und Umformeranlagen wird die Batterie auch zur Spitzendeckung eingesetzt. Es muß dann aus dem Verlauf der Belastungskennlinie festgestellt werden, welche Spitzenleistung und über welche Zeit diese von dem betreffenden Werk verlangt wird. Ist nur eine Betriebsmaschine oder ein Umformer vorhanden, dann muß die Batterie diese Spitzenlieferung übernehmen und gleichzeitig noch während der Nachtstunden in der Lage sein, allein den Leistungsbedarf zu decken. Sind zwei oder mehrere Maschinen vorhanden, die je nach der Höhe der Belastung in Betrieb genommen werden, so entfällt für die Größen-

bestimmung der Batterie die Deckung der Spitze; es ist ihre Größe dann lediglich nach der Nachtbelastung festzulegen. Abb. 36 gibt auch hierfür ein Beispiel. Es sind 2 Maschinen gleicher Leistung vorhanden, von denen die eine in Notbereitschaft bleibt.

Aus Abb. 36 ergibt sich mit Zuschlag eine Kapazität für die Batterie von 1000 Ah bei zehnstündiger Entladung. Mit Rücksicht auf den stark wechselnden Lastverlauf ist anzustreben, daß die zweite Maschine möglichst nicht eingesetzt wird, zumal die eine Maschine mit einer Leistung von $\frac{400 \cdot 220}{1000} = 88 \text{ kW}$ zur Deckung auch der Abendbelastung ausreicht. Bei dreistündiger Ladung beträgt der Ladestrom rd. 330 A. Dieser steht nicht mehr den ganzen Betriebstag über aus der Betriebs-

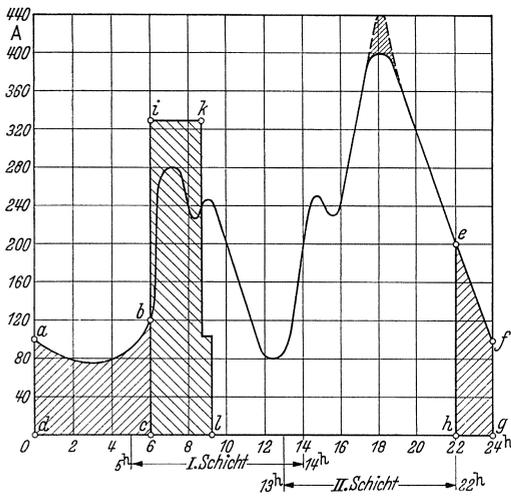


Abb. 36. Batterieentladung und Ladung mit besonderer Maschine (Elektrizitätswerk).

▨ Entladung, ▩ Ladung.

maschine zur Verfügung. Somit muß die Ladung durch die zweite Maschine erfolgen. Das zeigt der Linienzug *c i k l* an. Fällt eine Maschine durch Störung aus, hat der Betrieb schon sorgfältig zu überlegen, wie die Batterie mit verringertem Ladestrom und längerer Ladedauer voll aufgeladen werden kann, um sie nachts zur Verfügung zu haben. Da die Batterie reichlicher bemessen wurde, kann sie auch zur Deckung einer besonderen Abendspitze herangezogen werden, wie in Abb. 36 angedeutet. Die Ersparnis einer Nachtschicht ist ebenfalls möglich.

Der Strombedarf an Sonn- und Feiertagen darf nicht unberücksichtigt bleiben, wenn verlangt wird, daß die Batterie an diesen Tagen die volle Stromlieferung zu übernehmen hat. Das kann wesentliche Ersparnisse an Betriebsausgaben ermöglichen. Ferner soll die Batterie auch eine bestimmte Augenblicksaulhilfe mit Berücksichtigung ihrer Überlastbarkeit bilden, die im Fall von Störungen an einer im Betrieb befindlichen Maschine sofort und so lange einspringen kann, bis eine zweite Maschine angelassen und parallel geschaltet ist.

Zahlenmäßige Angaben über die Größe der Batterie lassen sich naturgemäß nicht machen, denn alle Fälle sind derart verschieden, daß sie jedesmal für sich betrachtet und durchgerechnet werden müssen. Auf Erweiterung der Leistungsfähigkeit der Batterie sollte von vornherein Rücksicht genommen werden. Das geschieht in der Weise, daß bei der ersten Aufstellung die Gefäße für den Einbau der Platten größer gewählt werden als erforderlich, um später durch Hinzufügen neuer Platten

leicht eine Erhöhung der Kapazität erreichen zu können. Wohl zu beachten ist dann bei der Querschnittsfestsetzung der Zellenschalterleiter der durch die Erweiterung bedingte höhere Strom.

Eine besondere Aufgabe fällt der Batterie noch in solchen Anlagen zu, in denen mit starken plötzlichen und häufig auftretenden Belastungsänderungen und Überlastungen zu rechnen ist. Dann soll sie eine Pufferung zum Ausgleich der Belastungsstöße herbeiführen, um die Maschinen zu schonen und eine gleichmäßige Sammelschienenspannung ohne besondere zusätzliche Regeleinrichtungen halten zu können.

c) Der Wirkungsgrad. Wesentlich für die Wirtschaftlichkeit und den Einsatz der Batterie ist der Wirkungsgrad, der zwischen Ladung und Entladung erreicht wird. Es bedarf zu wirtschaftlichen Untersuchungen weiter der Feststellung der Stromkosten bei Lieferung aus den Maschinen oder aus der Batterie. Dazu sind die Aufwendungen an Kapital- und Betriebskosten für die Maschinen bei selbständigem Betrieb gegenüber den gleichen Kosten mit Einschaltung der Batterie zu vergleichen.

Der Wirkungsgrad der Batterie liegt etwa bei $\eta_B = 90$ bis 95 vH bei drei- bis zehnstündiger Entladung. Bei kleinerer Entladezeit sinkt η_B auf 80 bis 70 vH. Voraussetzung für ständig besten Wirkungsgrad ist selbstverständlich, daß die Batterie stets gut gepflegt und in ihrer elektrischen Beanspruchung den Vorschriften des Herstellers entsprechend behandelt wird. Bleibt die Batterie längere Zeit unbenutzt in geladenem Zustand, dann sinkt der Wirkungsgrad durch Selbstentladung ebenfalls.

d) Die Zellenschalter. Mit Ausnahme der Gruppenunterteilung für die Ladung sind für die Entladung und für gleichzeitigen Maschinenbetrieb auf das Netz während der Ladung die bereits erwähnten Zellenschalter und zwar als Einfach- oder Doppelzellenschalter erforderlich. Auf ihre Bauweise in runder oder geradliniger Form soll nicht näher eingegangen werden, da darüber die Preislisten der Hersteller genügende Auskunft geben. Über ihre Arbeitsweise ist folgendes zu sagen.

Die Zellenschalter haben die Aufgabe, die Zellenzahl im Lade- und Entladestromkreis der Batterie einfach und sicher nach bestimmter Richtung und bestimmter Anzahl ändern zu können. Abb. 37 zeigt die Arbeitsweise eines Einfachzellenschalters. Über die Schaltstücke I bis 8 schleift ein Schalthebel K , an den der eine Pol der Leitung angeschlossen wird, während der zweite Pol am Batterieanfang liegt. Wird der Schalthebel K z. B. auf das Schaltstück 5 eingestellt, so ist die Batterie von der ersten bis zur 57. Zelle eingeschaltet. Je nach Stellung des Schalthebels werden also die Zusatzzellen I bis 8 zur Arbeit herangezogen. Beim Beginn der Entladung steht der Schalthebel auf I ; es sind dann nur die 53 Stammzellen im Stromkreis. Mit sinkender Spannung werden die Zusatzzellen I bis 8 zugeschaltet. Um beim Verschieben des Schalthebels K den Stromkreis nicht zu unterbrechen, sind Zwischenschaltstücke I bis VII vorhanden, die mit den Hauptschaltstücken durch Widerstände W verbunden sind. Dadurch wird beim Verschieben des

Schalthebels von einem Schaltstück zum nächsten der dann auftretende Kurzschlußstrom zwischen zwei Zellen so begrenzt, daß letztere keinen Schaden nehmen können.

Der Doppelzellenschalter besteht aus zwei Einfachzellenschaltern, die bautechnisch als ein Schaltgerät ausgebildet sind. Der eine Zellen- schalter dient für die Ladung in gleicher Weise wie oben gesagt. Der zweite Zellen- schalter gibt die Möglichkeit, während der Ladung die Batterie gleichzeitig zur Stromlieferung auf die Sammelschienen heranzuziehen und die richtige Spannung nach dem Spannungszustand der Zellen einzustellen. Aus den folgenden Schaltbildern ist dieses zu er- sehen. Wird je nach dem Ladezustand der Batterie durch den Lade- und Entladehebel des Doppelzellenschalters nicht die gleiche Zellenzahl ein- gestellt, so führen die zwischen beiden Schalthebeln liegenden Zellen den Netzstrom und können, wenn dieser wesentlich größer als der

Batteriestrom ist, gefährdet werden, worauf betrieblich entsprechend zu achten ist.

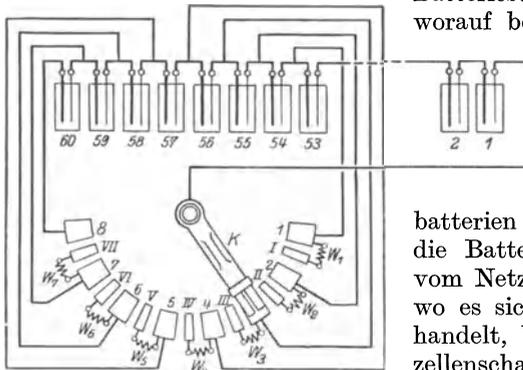


Abb. 37. Einfachzellenschalter mit Haupt- und Zwischenschaltstücken und Übergangs- widerständen.

Von den Einfachzel- lenschaltern wird heute verhältnismäßig selten und zwar nur in kleinen Anlagen oder bei Hilfs-

batterien Gebrauch gemacht, weil die Batterie während der Ladung vom Netz getrennt ist. Überall da, wo es sich um eine große Batterie handelt, benutzt man den Doppel- zellenschalter, weil die Batterie dann dauernd für augenblicklichen Ein- satz am Netz bleibt.

Liegt die Batterie in der Schalt- anlage verhältnismäßig weit vom Standort des Schaltwärters, oder soll die Verstellung des Schalthebels selbsttätig unter dem Einfluß der gleichzuhaltenden Netzspannung erfolgen, so benutzt man den elektro- motorischen Antrieb entweder nur des Ladehebels oder nur des Ent- ladehebels oder beider. Dieser Antrieb wird von der Schalttafel durch Steuerschalter bzw. beim selbsttätigen Arbeiten der Antriebe in Ab- hängigkeit von der Netzspannung oder dem Ladezustand durch be- sondere Steuermeßwerke in dem gewünschten Sinn betätigt. Bei be- sondern reicher Ausstattung können noch Fernzeiger eingebaut werden, die die jedesmalige Stellung der Schalthebel oder die Zahl der zu- und abgeschalteten Zellen anzeigen.

Die selbsttätige Bedienung der Ladung wird selten gewählt¹, weil die Ladung kaum anders als am Tage vorgenommen werden kann und zu dieser Zeit für die Bedienung des Kraft- oder Umformerwerkes stets Schaltwärter vorhanden sind, die die Ladung mit durchführen

¹ Hutt, H.: Selbsttätige Ladebegrenzungseinrichtung bei Bleisammlern. BBC Nachr. 1936 Heft 3 S. 87.

können. An sich besitzt die selbsttätige Bedienung der Ladung die Vorteile, daß sie zum richtigen Zeitpunkt nach dem Entladezustand der Batterie einsetzt und die Ladung ebenfalls zum richtigen Zeitpunkt beendet, die Batterie also vor unzulässiger Erschöpfung oder Überladung schützt. Beides läßt sich mit betrieblich ausreichender Sicherheit auch durch Klang- und Zeichen-Meldeeinrichtungen erreichen.

Die selbsttätige Bedienung der Entladung wird sehr häufig benutzt und ist naturgemäß notwendig, wenn des Nachts die Batterie die Stromlieferung ganz übernimmt und keine Bedienung vorhanden ist. Sie regelt die Spannung durch Verstellen des Zellschalters und wird mit einer Schutzeinrichtung derart versehen, daß die Batterie vor Erschöpfung gesichert ist. Die hierfür verwendeten einfachen Steueranlagen mit Spannungsmeißwerk und motorischem Antrieb des Zellschalters haben sich gut bewährt. Auf die praktische Ausführung solcher Einrichtungen soll nicht näher eingegangen werden. Besondere Bedingungen sind nicht hervorzuheben.

Auf eine besondere Ausführung der Zellschalter muß noch etwas näher eingegangen werden, die namentlich für große Anlagen von nicht zu unterschätzender Bedeutung ist. Es ist das die Leitersparschaltung. In der einfachen Schaltung bei n Regelstufen sind $n + 1$ Ver-

bindungsleiter von den Zellen zum Zellschalter erforderlich. Bei den Zellschaltern mit Leitersparschaltung werden dagegen von den Zellen der Batterie die Abzweigungen in solchen Stufen hergestellt, daß die Spannung zwischen zwei benachbarten Leitern den doppelten Betrag der geforderten Regelspannung aufweist. Infolgedessen sind nur $\frac{n}{2} + 1$ Verbindungsleiter zwischen Zellschalter und Batterie nötig. Um dabei die gewünschte feinstufige Spannungsregelung zu erreichen, werden durch einen Hilfsschalter auf einer Zwischenstufe Hilfszellen ein- und ausgeschaltet. Für diese Hilfszellen sind noch zwei weitere Leiter erforderlich, so daß im ganzen bei einem Einfachzellschalter für eine Zweileiteranlage $\frac{n}{2} + 3$ Leiter gegen $n + 1$ Leiter der einfachen Schaltung zu verlegen sind. Gespart werden daher $\frac{n}{2} - 2$ Leiter.

Durch eine einfache Berechnung der Ersparnis an Baustoff- und Einbaukosten gegenüber den Mehrkosten des Schaltgerätes kann fest-

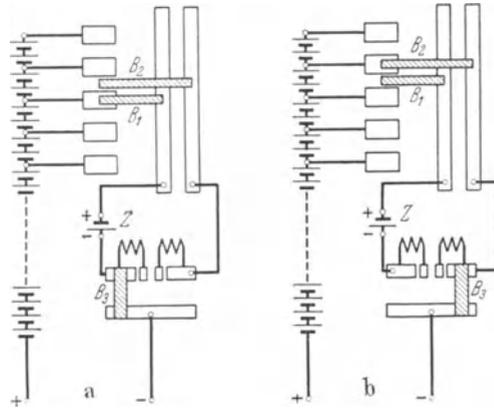


Abb. 38. Zellschalter mit Leitersparschaltung.

a Hilfszellen eingeschaltet, b Hilfszellen ausgeschaltet.

gestellt werden, ob sich diese Ausführung lohnt. Sie ist in der Regel vorteilhaft, sobald es sich um größere Ströme handelt.

In Abb. 38 ist die Ausführung für einen Einfachzellenschalter in den beiden Schalthebelstellungen mit und ohne eingeschaltete Hilfszellen dargestellt. Der Hauptschalter mit den Bürsten B_1 und B_2 ist zwangsweise mit einem Hilfsschalter mit der Bürste B_3 verbunden. Werden die Bürsten B_1 und B_2 um eine halbe Stufe verschoben, so wird durch den Hilfsschalter die Bürste B_3 nach der entgegengesetzten Seite gelegt. Abb. 38a zeigt die Schalterstellung, wenn die Hilfszellen Z eingeschaltet und Abb. 38b diejenige, in der die Hilfszellen ausgeschaltet sind.

Diese Sparschaltung wird natürlich auch beim Doppelzellenschalter sowohl für die Lade- als auch für die Entladeseite angewendet. Es gibt dafür eine ganze Anzahl von Ausführungen. Die Baustoffersparnis für die Leitungsanlage kann hier unter Umständen besonders groß ausfallen.

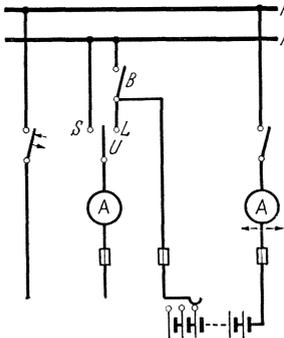


Abb. 39. Batterieladung von der Hauptmaschine über Einfachzellenschalter, ohne Ladeschiene.

Neben der Leitersparnis werden auch die Zellschalter billiger und kürzer, weil die Zahl der Schaltstücke gegenüber der einfachen Ausführung nur die Hälfte beträgt.

e) **Das Schaltbild für Zweileiteranlagen.** Von den vielen Schaltmöglichkeiten sollen nur die heute gebräuchlichsten besprochen werden. Für die Ladung der Batterie muß die zugeführte Spannung veränderlich sein. Zur Spannungserhöhung werden:

- entweder die Hauptmaschinen benutzt,
- die Batterie in Gruppen unterteilt
- oder eine Zusatzmaschine verwendet.

Die Wahl einer dieser Ausführungsformen hängt im wesentlichen von der Größe und der Bedeutung die der Batterie zuzumessen ist und ferner davon ab, ob und in welchem Umfang während des Ladezeitraumes die Stromlieferung der Maschinen auf das Netz mehr oder weniger eingeschränkt werden kann.

Ladung der Batterie durch Regelung der Hauptmaschinen. Diese Form der Ladung hat, wenngleich sie hinsichtlich der Anlagekosten für die gesamten Einrichtungen am billigsten ist, Nachteile, die darin bestehen, daß die Stromerzeuger teurer ausfallen, weil sie für die Spannungserhöhung eingerichtet sein müssen. Ferner wird ihr Wirkungsgrad im Regelbetrieb u. U. schlechter; außerdem werden die Maschinen, wenn sie gegenüber der Ladeleistung der Batterie für wesentlich größere Leistungen gebaut sind, während der Ladung schlecht ausgenutzt und dem Betrieb auf das Netz entzogen, wenn Einfachzellenschalter benutzt werden.

Bei nur einer Maschine und Einfachzellenschalter kann während der Ladung Strom in das Netz nicht abgegeben werden. Diese Ausführungsform wird daher nur in kleinen Anlagen und für Hilfs- und Notbatterien verwendet. Abb. 39 zeigt das Schaltbild.

Die Batterie wird durch den einpoligen Schalter B entweder auf die

negative Sammelschiene bei Entladung oder durch den Umschalter U auf den Stromerzeuger bei Ladung umschaltbar eingerichtet. Soll die Batterie geladen werden, ist U auf den Kontakt L einzustellen und die notwendige erhöhte Spannung durch Änderung der Erregung der Maschine herbeizuführen. Der Schalter B bleibt geöffnet.

Soll auch beim Einfachzellenschalter und nur einer Maschine ein Netzbetrieb möglich sein, so ist der Teil der Batterie, der nicht am Zellschalter liegt, mit der Maschine zu verbinden, und der Zellschalter dann für die Entladung also für die Stromlieferung auf das Netz zu benutzen. Die Spannung muß somit durch

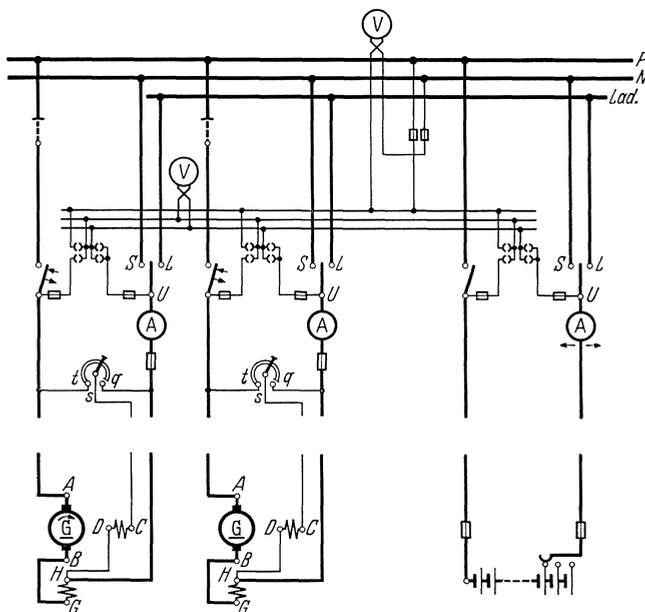


Abb. 40. Zweileiteranlage mit Gleichstromerzeugern mit Nebenschlußwicklung und Batterie; Ladung durch die Hauptmaschinen, Ladeschiene und Einfachzellenschalter.

den Zellschalter auf die erforderliche Höhe eingestellt werden. Diese Schaltform hat, wie bereits gesagt, den großen Nachteil, daß die Zellen unter Umständen von einem größeren Strom durchflossen werden, als ihnen zuträglich ist. Die Folge davon ist eine frühzeitige Zerstörung der einzelnen Batterieelemente. Eine solche Schaltung muß daher als unvorteilhaft verworfen werden.

Bei mehreren Maschinen und Einfachzellenschalter sind sie zweckmäßig sämtlich für die zur Ladung der Batterie erforderliche Spannungserhöhung einzurichten, damit gegenseitige Aushilfe vorhanden ist. Das Schaltbild Abb. 40 läßt ohne besondere Erklärung die erforderlichen Schaltungen und Schaltgeräte erkennen. Es empfiehlt sich, in diesem Fall eine dritte Sammelschiene als Ladeschiene vorzusehen.

Wird der Doppelzellenschalter angewendet, so ist, wie aus dem Schaltbild Abb. 41 hervorgeht, eine Stromlieferung an das Netz während der Ladung der Batterie möglich, indem die erforderliche Netzspannung, die dann niedriger als die Stromerzeugerspannung ist, durch den Entladehebel eingestellt wird. Das Schaltbild Abb. 41 ist verallgemeinert, da dort zwei Maschinen und eine besondere Ladeschiene gezeichnet sind.

Infolge des großen Vorteiles des Doppelzellenschalters wird derselbe bei weitem bevorzugt.

Die Hauptmaschinen zur Speisung des Netzes sind in ihrer Leistung zumeist um ein beträchtliches größer als zur Ladung der Batterie er-

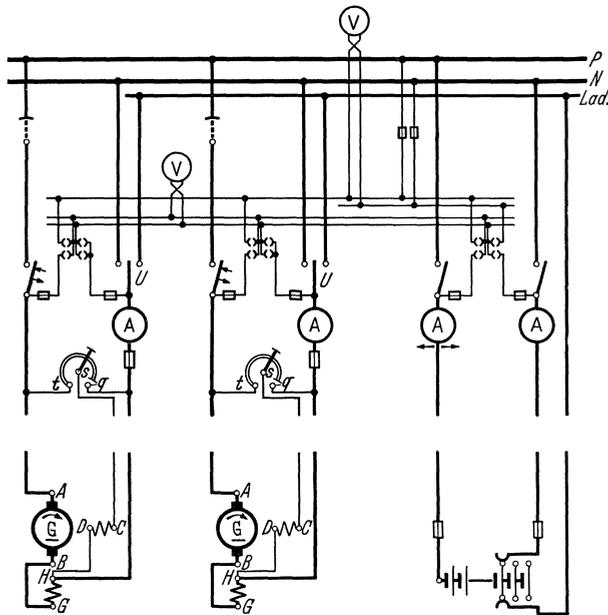


Abb. 41. Zweileitersanlage mit Gleichstromerzeugern mit Nebenschlußwicklung und Batterie; Ladung durch die Hauptmaschinen, Ladeschiene und Doppelzellenschalter.

forderlich. Es ist daher nur dann notwendig die Leistung des zur Ladung benutzten Stromerzeugers nach dieser Richtung zu prüfen, wenn es sich entweder um eine sehr große Batterie oder um die Ladung durch Gruppenunterteilung handelt. Für den ersten Fall gilt folgendes:

Die Größe des Ladestromes hängt abgesehen von der an sich nach den Vorschriften des Batterieherstellers zulässigen Höhe von der Zeitdauer ab, innerhalb welcher die Batterie geladen sein soll. Je länger die Ladezeit genommen werden kann, um so geringer ist der Strom, was ohne weiteres auch aus dem über die Kapazität Gesagten hervorgeht. Muß die Ladung aus betriebstechnischen Gründen in wesentlich kürzerer Zeit als etwa 3 Stunden beendet sein, so ist das bei der Aus-

wahl der Batterie besonders zu beachten, andernfalls können die Platten frühzeitig zerstört werden. Die Höhe der Spannung ist nach den Angaben über die Berechnung der Zellenzahl von letzterer abhängig. Handelt es sich um längere Entladezeiten bei bestimmtem Entladestrom, so müssen unter Umständen mehr Schaltzellen genommen werden.

Bezeichnet U_L die höchste Ladespannung in Volt, so muß die Maschinenleistung für die Ladung:

$$\left. \begin{aligned} N_L &= \frac{I_L \cdot U_L}{1000} \text{ kW} \\ &= \frac{I_L \cdot 2,75 \cdot Z}{1000} \text{ kW} \\ &= \frac{1,49 \cdot U \cdot I_L}{1000} \text{ kW} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

betragen.

Um keinen zu großen und damit teuren Stromerzeuger zu erhalten, ist es üblich, nicht die Höchstspannung bei vollem Strom zugrunde zu legen, sondern die Voraussetzung zu machen, daß letzterer nur bis zur Gasentwicklung in der Zelle zu liefern ist, die bei etwa 2,4 V für die Zelle einsetzt, und dann allmählich bis etwa auf $\frac{1}{3}$ seines Wertes vermindert wird. Damit sind auch für die Batterie selbst Vorteile hinsichtlich der Haltbarkeit und des Wirkungsgrades verbunden. In diesem Fall ist die Ladeleistung des Stromerzeugers:

$$N'_L = \frac{I_L \cdot 2,4 \cdot Z}{1000} = \frac{1,3 \cdot U \cdot I_L}{1000} \text{ kW}. \quad (19)$$

Die derart bemessenen Maschinen lassen nach den Listen der Hersteller ohne weiteres bei $\frac{1}{3}$ Strom eine gesteigerte Spannungserhöhung auf $2,75 \cdot Z$ zu, so daß die Spannungsgrenzen etwa sind: 115 bis 160 oder 230 bis 320 V bei gleichbleibender Leistung und Drehzahl, und als Höchstspannungen bei $\frac{1}{3} I_L$ etwa 165 oder 330 V erreicht werden können. Die zum Zweck der gelegentlichen Überladung noch höhere Spannung muß die Maschine hergeben, oder die Antriebsmaschine muß eine entsprechende Drehzahlsteigerung zulassen (etwa 10 bis 15 vH).

Will man die allgemeinen Nachteile, die die Erhöhung der Spannung der Hauptmaschinen zum Laden an sich aufweist vermeiden, was in großen Anlagen stets vorzuziehen ist, so ist eine der beiden folgenden Formen zweckmäßiger.

Ladung durch Gruppenunterteilung der Batterie. Um die Spannung der Hauptmaschinen unverändert halten zu können, löst man die Batterie zum Zweck der Ladung in drei Gruppen auf, die teilweise parallel und in Reihe geschaltet werden (Abb. 42). Da die Spannung an den Sammelschienen zu hoch ist, um den einzelnen Batteriegruppen unmittelbar zugeführt zu werden, muß sie durch einen Ladewiderstand LW abgedrosselt werden. Es geht dann allerdings eine recht beträchtliche elektrische

Arbeit nutzlos im Ladewiderstand verloren. Die Gruppenschaltung ist also nach dieser Richtung unwirtschaftlich. Außerdem müssen die Maschinen, sobald die Ladung in der Hauptbetriebszeit vor sich gehen soll imstande sein, den durch die Parallelschaltung der Batteriegruppen erforderlichen erhöhten Strom zu liefern.

In Abb. 42 ist die Mika-Schaltung gezeichnet. Der Batterieumschalter U ist so durchgebildet, daß jeder Mißgriff bei der Ladung vermieden wird.

Es wird zuerst Gruppe III in Reihenschaltung mit den parallel liegenden Gruppen I und II geladen. Nach beendeter Ladung der

Gruppe III werden die Gruppen I und II in Reihenschaltung weitergeladen. Der Ladewiderstand LW ist so zu bemessen, daß er beim höchsten Ladestrom etwa ein Drittel der Netzspannung abdröselst. In Abb. 42 ist zur Einstellung gleichbleibender Entladespannung ein Einfachzellenschalter vorgesehen. Die Gruppenschaltung wird nur bei Strömen bis etwa 200 A angewendet.

Ladung mit Benutzung einer Zusatzmaschine. Die dritte Form setzt ebenfalls keine Spannungserhöhung der Hauptmaschinen voraus. Der Ladestrom wird bei der Schaltung nach Abb. 43 und 44 in Reihenschaltung über eine durch einen Elektromotor angetriebene Gleichstrom-Nebenschlußmaschine geführt, mit der die mit fortschreitender Ladung erforderliche Erhöhung der Spannung vorgenommen wird; es ist daher sowohl der Einfach- als auch der Doppelzellenschalter benutzbar.

Die Zusatzmaschine ist in ihrem Spannungsregelbereich

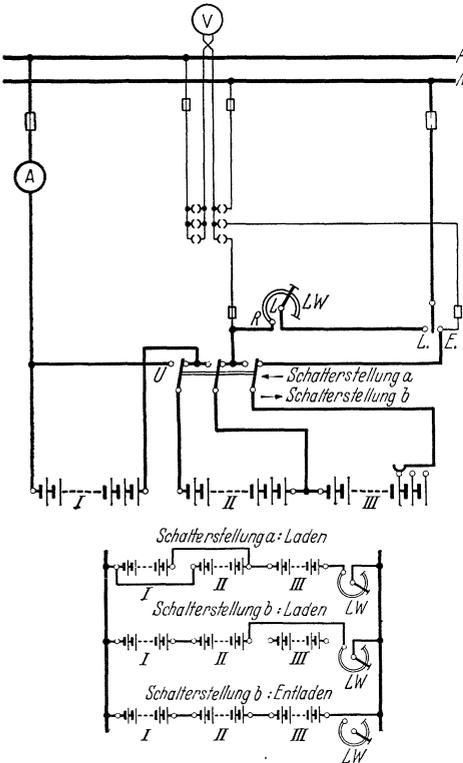


Abb. 42. Zweileiteranlage mit Batterie; Batterie-ladung durch Gruppenunterteilung (Mika-Schaltung). I, II, III Batteriegruppen, LW Ladewiderstand, a, b Schalterstellungen.

bei gleichbleibender Drehzahl des Antriebsmotors so auszuführen, daß sie die Spannungserhöhung auch für die Überladung hergeben kann. Die Erregung hat immer von den Hauptsammelschienen zu erfolgen (Fremderregung). Für die Hauptmaschinen ist nur insofern eine Überprüfung hinsichtlich der Leistung notwendig, ob sie den während des Ladebetriebes vom Netz verlangten Strom zuzüglich des Ladestromes erzeugen können. Die Zusatzmaschine muß, wenn u_L den Spannungs-

unterschied zwischen der höchsten Ladespannung und der festen Sammelschienenspannung bezeichnet, unter Berücksichtigung des Lade-

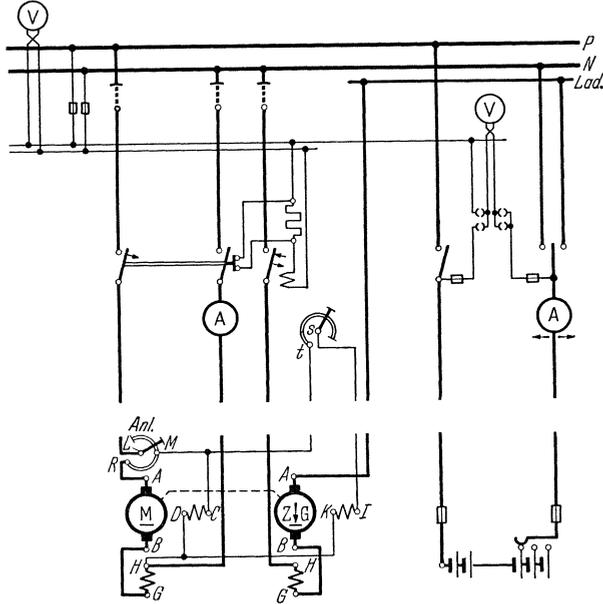


Abb. 43. Zweileiteranlage mit Batterie; Batterieladung durch Zusatzmaschine; Einfachzellenschalter.

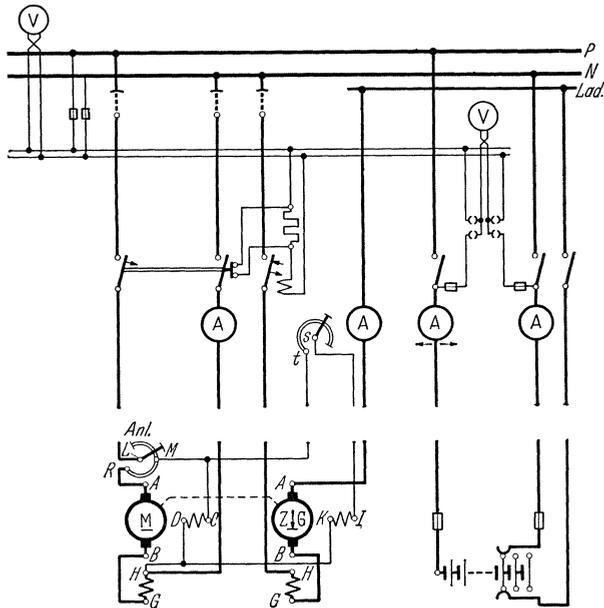


Abb. 44. Zweileiteranlage mit Batterie; Batterieladung durch Zusatzmaschine; Doppelzellenschalter.
Kyser, Kraftübertragung. III/2. 3. Aufl.

stromes eine Leistung besitzen von:

$$N_{z, L} = \frac{I_L \cdot u_L}{1000} \text{ kW}, \quad (20)$$

worin:

$$u_L = 2,4 \cdot Z - U,$$

wenn die Restladung mit $\frac{1}{2} I_L$ erfolgen kann, oder:

$$u'_L = 2,75 \cdot Z - U,$$

wenn während der ganzen Dauer der Ladung der volle Ladestrom gefordert wird.

f) **Das Schaltbild für Dreileiteranlagen.** In Ergänzung des bereits bei den Gleichstromerzeugern Gesagten ist besonders noch auf die

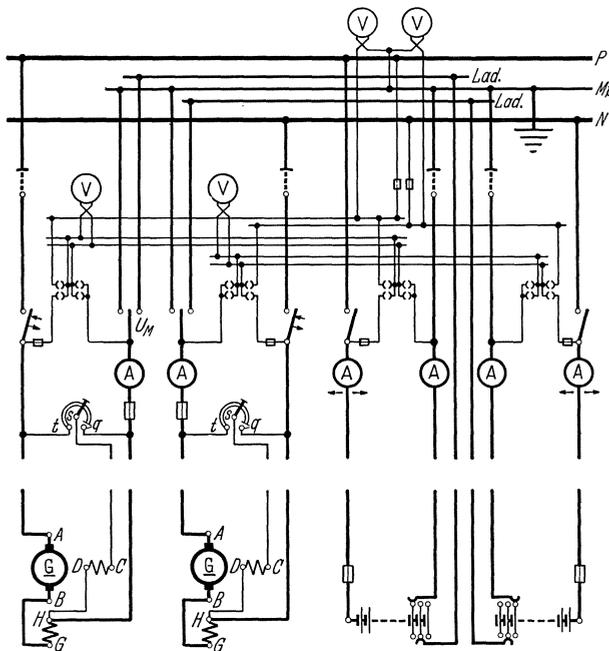


Abb. 45. Dreileiteranlage mit Batterie und Gleichstromerzeugern mit Nebenschlußwicklung für halbe Außenleiterspannung; Ladung mit den Hauptmaschinen; Ladeschienen; Doppelzellschalter.

Lage der Zellschalter zu achten. Da hier nur Doppelzellschalter benutzt werden, können diese entweder in die beiden Hauptleitungen oder in den Mittelleiter gelegt werden. Das letztere ist mit Rücksicht auf die geringere Spannung und dann, wenn der Mittelleiter geerdet ist, vorteilhafter.

Abb. 45 zeigt das Schaltbild für ein Kraftwerk mit Maschinen für halbe Außenleiterspannung. Die Ladung erfolgt über besondere Ladesammelschienen. Die Zellschalter liegen an der Nullschiene, die geerdet ist. Die Maschinen erhalten Überstrom- und Rückstromschalter im Plus- und Minuspol.

Das Schaltbild bei Maschinen für die volle Außenleiter-

spannung und Spannungsteiler ist in Abb. 46 gezeichnet. Beim Ladebetrieb wird der Spannungsteiler zweckmäßig vom Mittelleiter abgeschaltet. Es sind auch hier besondere Ladesammelschienen vorgesehen, auf die die zur Ladung benutzte Hauptmaschine und die Batterie umgeschaltet werden. Die Batterie ist mit außenliegenden Doppelzellenschaltern ausgerüstet. Soll nur eine Batteriehälfte nachgeladen werden, dann geschieht das ebenfalls mit einer Hauptmaschine,

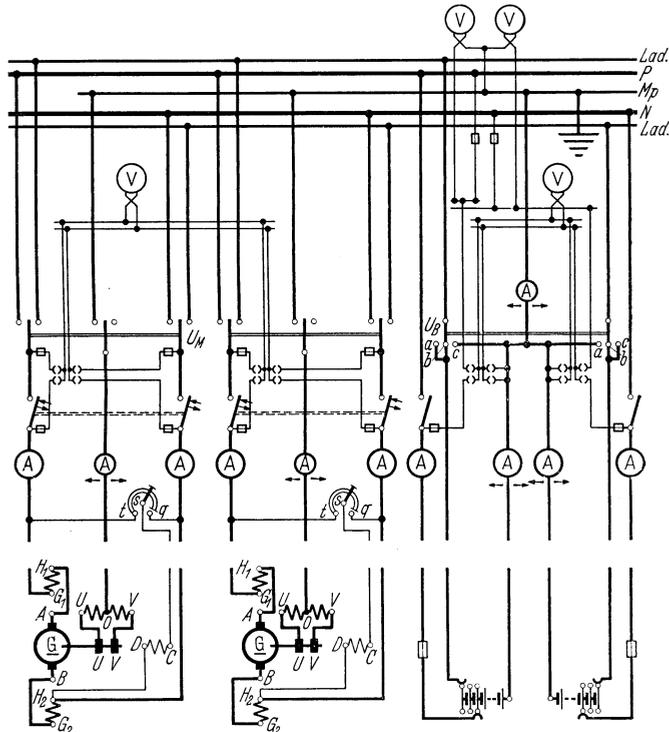


Abb. 46. Dreileiteranlage mit Batterie und Gleichstromerzeugern mit Nebenschlußwicklung für volle Außenleiterspannung und Spannungsteiler; Ladung mit den Hauptmaschinen; Ladeschienen; Doppelzellenschalter.

Umschalterstellungen U_B :

a Ladung der P-Batterie, b Ladung der P- und N-Batterie, c Ladung der N-Batterie.

die demnach auf jede Batteriehälfte umschaltbar sein muß. Die Nebenschlußregler der Maschinen müssen für entsprechend weiten Regelbereich (Spannungsverminderung) ausgeführt werden. Die Überstrom- und Rückstromschalter sind in beide Maschinenpoleitungen einzubauen; Sicherungen sind in den Maschinenstromkreisen unzulässig, da sie nicht auf Rückstrom ansprechen.

Schließlich zeigt Abb. 47 die Schaltung für eine Dreileiteranlage mit Spannungsteiler und Ladung der Batterie durch einen Zusatzausgleichmaschinensatz bei Verwendung von Doppelzellenschaltern (Abb. 30 zeigte die Schaltung mit Einfachzellen-

schaltern). Die mit zwei Motoren gekuppelte Zusatzmaschine liegt in der Mitte zwischen den beiden Batteriehälften und kann durch einen Umschalter U , auch zum Nachladen einer Batteriehälfte herangezogen werden. Sie arbeitet dann als Zusatzstromerzeuger und nicht als Lademaschine. Für die Bestimmung ihrer Spannungsgrenzen ist daher die notwendige Zusatzspannung der Gesamtbatterie maßgebend. Beim Übergang von Entladung auf Ladung ist der Ladeschlitten der Zellen-

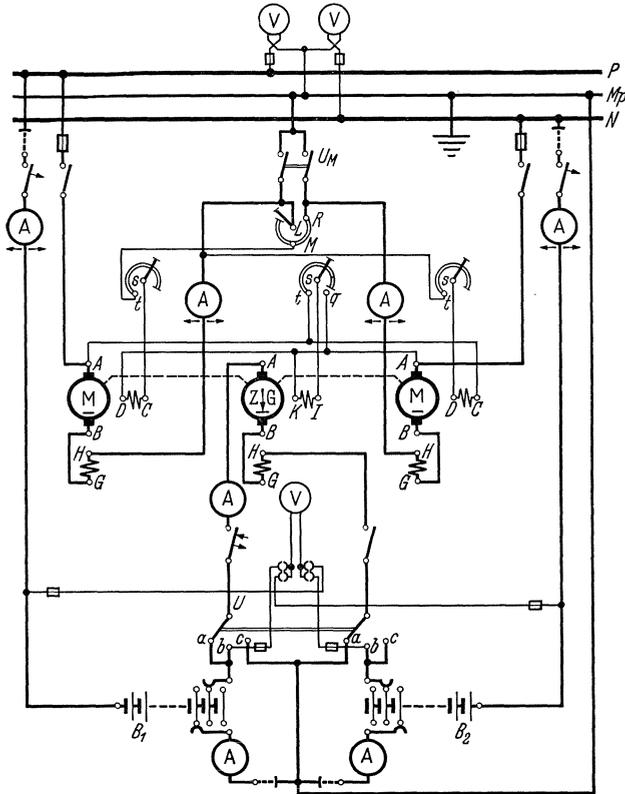


Abb. 47. Dreileiteranlage mit Batterie; Ladung und Spannungsteilung durch Zusatz-Ausgleichsmaschinen; Dreimaschinensatz; Doppelzellenschalter.

Umschalterstellungen U :

a Ladung der P-Batterie, b Ladung der P- und N-Batterie, c Ladung der N-Batterie.

schalter auf dasselbe Schaltstück zu stellen wie der Entladeschlitten. Der Ladestromkreis wird über die laufende, aber noch unerregte Zusatzmaschine geschlossen und nun erst der Ladestrom durch Regelung der Zusatzspannung eingestellt, wobei gleichzeitig der Ladeschlitten auf die höchste Zellenzahl geschaltet wird.

g) Besondere Schaltungen. Eine Schaltanordnung zum Laden durch die Hauptmaschinen während des Regelbetriebes ohne Verwendung von Zellenschaltern ist von der AEG entwickelt worden. Die Batterie wird in eine Haupt- und eine Nebengruppe aufgeteilt. Beide

liegen ständig mit der Hauptmaschine parallel. Die Hauptgruppe erhält so viel Zellen, daß bei einer mittleren Entladespannung von etwa 2 V je Zelle die Maschinenspannung erreicht ist. Dann bleibt dieser Batterieteil ständig aufgeladen, so lange die Batteriespannung höher als die Maschinenspannung ist. Sinkt letztere, übernimmt die Batterie selbsttätig die Stromlieferung. Sinkt die Batteriespannung, erfolgt ebenfalls selbsttätig die Aufladung. Die Nebengruppe entsprechend der Gesamtzellenzahl abzüglich der mit 2 V je Zelle festgelegten Hauptgruppe bleibt mit letzterer in Reihenschaltung und ist mit dem Maschinenstromkreis über einen selbsttätigen Stromwächter verbunden. Beim Ausbleiben der Maschinenstromlieferung oder Sinken der Netzspannung schaltet der Stromwächter die Nebengruppe ein. Da diese Schaltung selten angewendet wird, soll auf Einzelheiten nicht näher eingegangen werden¹.

In Drehstromanlagen mit Gleichrichtern² werden zur Regelung des Ladestromes Ladedrosselspulen auf der Wechselstromseite benutzt, die so bemessen oder eingestellt werden, daß der jeweils notwendige Ladestrom nicht überschritten wird. Da die Drosselspulen wegen ihres induktiven Blindwiderstandes große Phasenverschiebung also starke Leistungsfaktorenverschlechterung herbeiführen, ist die Regelvorrichtung nur für kleine Batterien geeignet oder zulässig. Für größere Batterien wird der Umspanner herangezogen und mit Anzapfungen versehen (Abb. 49). Die Spannungs- und Stromregelung erfolgt dann durch Schalten von Windungen. Unter Umständen sind aber auch hier noch Drosselspulen erforderlich. Näheres ist im Band I bereits behandelt. Soll die Gleichstromanlage unveränderte Sammelschienenspannung liefern, dann erfolgt die Ladung der Batterie mit Hilfe einer Zusatzmaschine.

h) Die Batterie für Steuer- und Sicherheitseinrichtungen (Betätigungs-batterie). Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Stromversorgung der heute in großem Umfang zur Verwendung kommenden Steuer- und Sicherheitseinrichtungen wie Meldelampen, Meßwerke, Schalterbetätigungsverfahren und Notbeleuchtung in Drehstromanlagen aus einer Batterie erfolgt, um für diese Zwecke eine vollständig unabhängige Stromquelle jederzeit verfügbar zu haben. Neben der Bleibatterie werden dazu neuerdings Stahllakkumulatoren (Edison-Akkumulatoren) verwendet³.

Die Vorteile der Stahlbatterie (Abb. 48) liegen in der Hauptsache darin, daß sie geringerer Wartung bedarf, unempfindlicher bei der Ladung und Entladung ist, eine gute Leistungsabgabe besitzt und eine

¹ Uhde, A.: Neue Schaltanordnungen für Akkumulatorenbatterien in Stromversorgungsanlagen: AEG-Mitt. 1928 Heft 1 S. 30.

² Müller, G. W. und A. Schellenberger: Zweckmäßige Ladung von Akkumulatorenbatterien durch Gleichrichter. AEG-Mitt. 1929 Heft 5 S. 360. Landsmann, K.: Glasgleichrichter zum selbsttätigen Laden von Akkumulatorenbatterien. BBC Nachr. 1930 S. 42 und 217.

Das Laden von Akkumulatoren-Batterien durch Gleichrichtergeräte. Elektr.-Wirtsch. 1938 Heft 28 S. 734.

³ AEG-Mitt. 1938 Heft 5 S. 300. Nife-Stahllakkumulatoren G. m. b. H. Berlin-Steglitz.

längere Lebensdauer aufweist als die Bleibatterie. Allerdings ist der Preis höher als für letztere. Die mittlere Entladespannung eines Stahlakkumulators beträgt aber nur 1,2 V. Die Zellenzahl wird also größer. Während der Ladung steigt die Spannung von 1,45 auf 1,8 V je Zelle. Der Ladestrom kann dagegen unverändert bleiben, weil die Gasentwicklung in der Stahlzelle nur gering ist und die Masse nicht angreifen kann, die in Schutzröhren liegt.

Die Größe der Betätigungsbatterie richtet sich nach der im einzelnen festzulegenden Beanspruchung durch die von ihr zu versorgenden Stromkreise, wobei zwischen vorübergehender und dauernder Einschaltung zu unterscheiden ist.

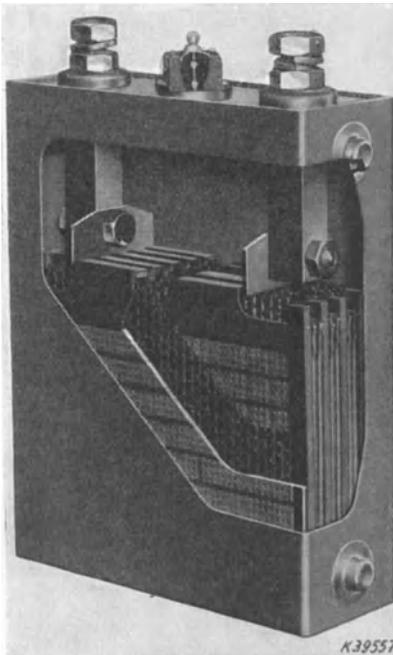


Abb. 48. Stahl-Akkumulatorenzelle mit hohem Elektrolytraum.

Die Sollspannung der Betätigungsbatterie wird in der Regel zu etwa 40 V gewählt. Unter eine Spannung von etwa 32 V sollte nicht gegangen werden, weil die Übergangswiderstände der zumeist mit leichter Oxydation oder mit Staub belegten Schaltstücke der Meßwerke, Meldeeinrichtungen usw. besonders bei der Arbeitsstromschaltung von einer geringeren Spannung nicht schnell genug durchschlagen werden, die Schaltsicherheit also beeinträchtigt wird. Ferner erfordert eine geringe Spannung wesentlich stärkere Leiterquerschnitte, was bei langen Verbindungsleitungen zu beachten ist. Die anzuschließenden Betätigungseinrichtungen sollen in ihrem Aufbau darauf durchgebildet sein, daß die Sollspannung der Betätigungsbatterie in den Grenzen zwischen

—15 bis +10 vH schwanken kann.

Abgesehen von kleinen nicht mit Schaltwärtern besetzten Umspannwerken oder selbsttätigen Kraftwerken, für die auswechselbare Batterien gewählt werden, werden zur Ladung gerne Dauerladeeinrichtungen benutzt, um in jedem Fall hinsichtlich des guten Ladezustandes der Batterie gesichert zu sein. Der Dauerladestrom richtet sich nach der Beanspruchung der Batterie. Für mittlere Verhältnisse wird dieser Dauerladestrom zu etwa $\frac{1}{50}$ bis $\frac{1}{100}$ des Ladestromes bei sieben- bis achtstündiger Entladezeit gewählt. Die Stahlbatterie gestattet hierzu bei gutem Ladezustand Stoßstromentnahmen bis zum achtfachen Wert des Nennstromes, ohne daß die Sollspannung um mehr als 10 vH absinkt. Nach dem Abklingen der Stoßbeanspruchung muß sich die Spannung schnell

wieder auf den Sollwert erhöhen. Das tritt bei der Stahlbatterie ein und läßt sich noch durch Einschaltung der Dauerladeeinrichtung sicherer gestalten. Entsprechend ist bei einer Bleibatterie auf diese Gesichtspunkte zu achten.

Die Dauerladevorrichtung ist bei beiden Batteriearten zweckmäßig. Bei der Bleibatterie vermeidet sie die Neuformung der Platten, die sonst nach längerer Nichtbeanspruchung infolge der Selbstentladung notwendig wird. Bei der Stahlbatterie ist diese Plattenneuformung nicht erforderlich. Ferner läßt sich bei dieser Batterieart auch eine Schnellaufladung herbeiführen, ohne die Platten dabei zu gefährden.

Als Ladestromquelle in Drehstromanlagen werden Glimm-, Trocken-, Glühkathoden- oder Selenplatten-Gleichrichter verwendet. Sparschaltung des vorgeschalteten Umspanners soll nicht benutzt werden, um einen Erdschluß auf der Oberseite nicht auf die Unterseite zu übertragen, der unter Umständen schwere Störungen in der Betätigungsanlage herbeiführen kann, wenn der Isolationszustand der Verteilungsleitungen an irgendeiner Stelle unzureichend geworden ist.

Abb. 49 zeigt das Schaltbild für einen Trockengleichrichter mit Spannungsmeßwerk zur selbsttätigen Batterie-ladung, Abb. 50 das vollständige Schaltbild einer Batterie mit Ladung durch Gleichstrommaschine, für das eine besondere Erläuterung nicht erforderlich erscheint.

i) Die Pufferung von Belastungsstößen¹. Handelt es sich um Betriebe, in denen fortdauernd plötzliche und starke Belastungsschwankungen und Überlastungen auftreten wie z. B. in Fabrikanlagen, Hütten-

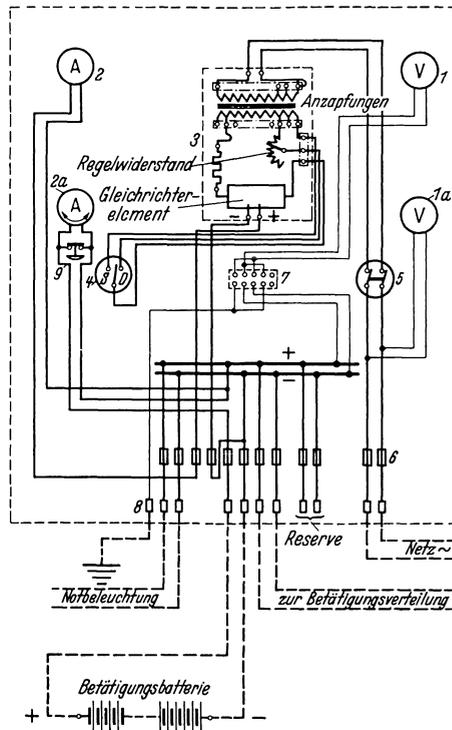


Abb. 49. Schaltbild für eine Betätigungsbatterie mit Ladeeinrichtung durch Gleichrichter.

1 Gleichstrom-Spannungsmesser, 1a Wechselstrom-Spannungsmesser, 2 Gleichstrommesser für Ladung, 2a Gleichstrommesser für Verbrauch, 3 Trockengleichrichter, 4 Umschalter für Schnell- und Dauerladung, 5 Wechselstromschalter, 6 Sicherungen, 7 Umsteckschalter für Spannungsmessung und Erdschlußprüfung, 8 Anschlußklemmen, 9 Kurzschließer für Strommesser 2a.

¹ Wenngleich heute die hier behandelten Puffereinrichtungen nur noch selten angewendet werden, erschien es dem Verfasser doch angebracht, diesen Abschnitt aus der II. Auflage noch zu übernehmen.

und Walzwerken, Kran- und Aufzugsanlagen, Bahnkraftwerken, so ist selbst mit den besonderen Spannungsreglern kein befriedigender Betrieb durchführbar. Man muß dann andere Einrichtungen treffen und zwar die Maschine entweder mit einer Doppelschlußwicklung versehen, sie mit zusätzlichen Schwungrädern ausrüsten oder schließlich ständig eine Batterie als Pufferbatterie mitarbeiten lassen. Da sich diese letzte Schaltung in sehr rauen Betrieben vorzüglich bewährt hat, soll auch hierüber Einiges gesagt werden.

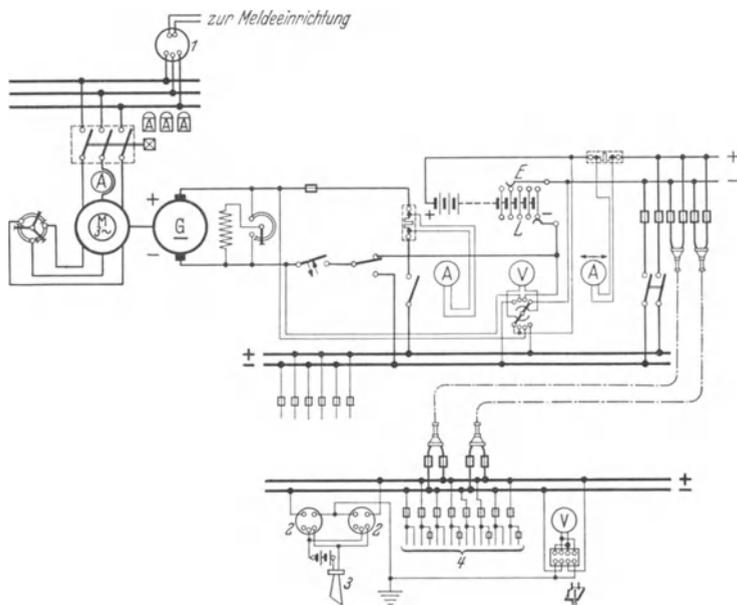


Abb. 50. Schaltbild für eine Betätigungsbatterie bei Ladung durch Gleichstromerzeuger mit Nebenschlußwicklung und Antrieb durch Drehstrom-Schleifringankermotor.

1 Überspannungs-Schutzmeßwerk, 2 Erdschluß- und Unterspannungsmeßwerk, 3 elektrisches Meldegerät, 4 Niederspannungsverteilung.

Die Pufferbatterie hat die Aufgabe, die Belastungsstöße von den Stromerzeugern abzuhalten und den Belastungsausgleich zu übernehmen dadurch, daß sie beim plötzlichen Anstieg der Belastung die erforderliche Leistung liefert, sich also entladet, und beim Sinken der Belastung die von den Maschinen freiwerdende, in diesem Augenblick überflüssige Leistung aufnimmt, sich also ladet (Abb. 51). Auf diese Weise kann nicht nur die Belastung der Hauptmaschinen, sondern auch die Sammelschienenspannung unverändert gehalten werden.

Alle solche Einrichtungen haben somit den Vorteil, daß die Hauptmaschinen gleichmäßig belastet laufen, also voll ausgenutzt werden. Infolgedessen können sie mit dem günstigsten Wirkungsgrad arbeiten, ein Umstand, der keineswegs in gleichem Maß bei der einfachen Parallelschaltung von Stromerzeugern und Batterie zu erreichen ist, zumal im letzteren Fall die Batteriespannung bei plötzlicher stärkerer Beanspruchung

rascher fällt als die Maschinenspannung. Diese gleichmäßige Belastung der Maschinen beeinflusst vorteilhaft den Betriebsstoffverbrauch der Antriebsmaschinen, hat also nach dieser Richtung eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit zur Folge. Weiter ermöglicht die Anwendung von Zusatzmaschinen mit oder ohne Zuhilfenahme von Schnellreglern eine gleichmäßige Spannung an den Sammelschienen und eine dauernde vorteilhafte Beanspruchung der Batterie, was zumeist namentlich bei größeren Anlagen sonst nicht möglich ist. Unter Umständen können die Hauptmaschinen und die Antriebsmaschinen in ihren Leistungen kleiner gewählt werden, da die Überlastungen aus dem Netz durch die Batterie gemildert werden. Auch in bestehenden Anlagen ist eine gesteigerte Ausnutzung der vorhandenen Maschinen durch nachträgliches Einbauen einer solchen Puffereinrichtung erzielbar.

Es gibt eine große Zahl von Schaltungen, nach welchen die Hauptmaschinen mit zusätzlichen Wicklungen versehen durch das Einwirken letzterer gezwungen werden, in der Spannung bei Belastungsstößen abzufallen und dadurch die Pufferbatterie zum kräftigen Einspringen zu veranlassen. Derartige Schaltungen sind mehr und mehr verlassen worden. An ihre Stelle ist die Benutzung besonderer Hilfsmaschinen (Zusatz- oder Puffermaschinen) getreten, die die Pufferwirkung der Batterie augenblicklich, sicher und dadurch verstärkt zur Geltung bringen, daß sie in Reihe mit derselben geschaltet den jeweiligen Unterschied zwischen der Batterie- und der Sammelschienenspannung aufbringen.

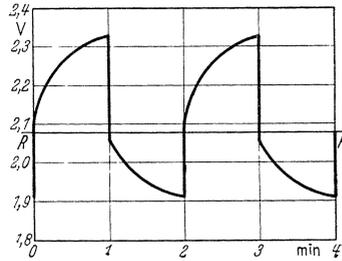


Abb. 51. Spannungsverlauf für die Pufferbatteriezelle.

Bei der Schaltung dieser Puffermaschinen ist ganz allgemein zu unterscheiden, ob zur Erregung der Netzstrom oder der Batteriestrom zu Hilfe genommen wird. Das erstere ist das bessere, da dann die Sammelschienenspannung bei Belastungsstößen gleichbleibend gehalten werden kann. Bei der zweiten Schaltung muß sich die Spannung an den Sammelschienen ändern, damit die Pufferung durch Zusatzmaschine und Batterie auch tatsächlich und befriedigend in Wirkung tritt. Die Sammelschienenspannung kann daher nicht in gleichem Maß wie bei der ersten Schaltung unverändert bleiben. Nach dem auf S. 23 Gesagten hängt der Grad der Pufferung von dem Verlauf der äußeren Kennlinie der Hauptmaschinen ab. Die Maschinen müssen bei Überlastungen mit großem Spannungsabfall gebaut sein.

Die Zusatzmaschine mit Nebenschluß- und Hauptschlußwicklung in Gegenschaltung ist eine der bekanntesten Ausführungen. In Abb. 52 ist ein vollständiges Schaltbild für eine derartige Anlage gezeichnet. Der Anker der Zusatzmaschine liegt in Reihe mit der Batterie. Die Nebenschlußwicklung *N.W.* der Zusatzmaschine *Z.G.* ist unmittelbar an die Batterie angeschlossen, während die Hauptschlußwicklung *H.W.* vom Netzstrom oder einem Teil desselben entsprechend dem Neben-

schlußwiderstand W . durchflossen wird und ersterer entgegengesetzt wirkt. Ist die Belastung im Netz Null, so kommt allein die $N.W.$ zur Wirkung und die Zusatzmaschine gibt eine derart hohe Spannung, daß die Ladung der Batterie durch den Maschinenstrom erfolgt. Tritt eine Belastung im Netz auf, so durchfließt ein entsprechender Strom die $H.W.$ und bewirkt dadurch eine Schwächung der Wirkung der Nebenschlußwicklung. Die Folge davon ist eine Verminderung der Zusatzspannung und daher die Ladung der Batterie. Ist der Stromverbrauch

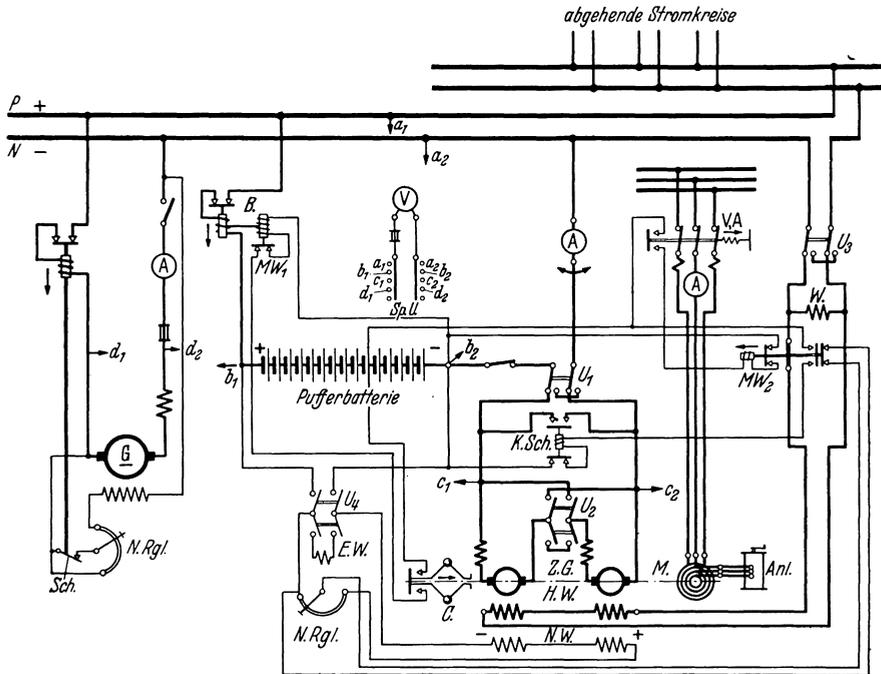


Abb. 52. Pufferung durch Zusatzstromerzeuger mit Neben- und Hauptschlußwicklung in Gegenschaltung.

im Netz gleich der Maschinenleistung, so findet weder Ladung noch Entladung der Batterie statt. Steigt schließlich die Netzbelastung weiter, so überwiegt die Hauptschlußwicklung, die Zusatzspannung nimmt entgegengesetzt zu und die Batterie wird zur Entladung gezwungen.

Damit diese Arbeitsweise der Zusatzmaschine erreicht wird, muß dieselbe im geraden Teil der Leerlaufkennlinie (Abb. 53) arbeiten. Um das zweckmäßigste Verhältnis der beiden Wicklungen leicht einstellen zu können, wird ein besonderer Regler für den Nebenschlußstrom eingebaut.

Die Zusatzmaschine muß für den Höchstentladestrom bemessen sein. Da sie auch zum Aufladen der Batterie verwendet wird, die Ladespannung aber 3- bis 4mal höher als die Sammelschienen­spannung ist,

wird sie mit zwei Stromwendern ausgerüstet, die beim Ladebetrieb in Reihe und beim Pufferbetrieb parallel geschaltet sind. Ferner wird die Zusatzmaschine stets mit Wendepolen versehen, um bei allen Strömen und Spannungen eine funkenfreie Stromwendung zu erreichen. Der Antrieb kann auch in Abänderung zu Abb. 52 durch einen unmittelbar gekuppelten Gleichstrom-Nebenschlußmotor erfolgen, der an die Sammelschienen angeschlossen ist, und dessen Drehzahl beim Ladebetrieb etwas erhöht werden kann.

Wenn diese ganz selbsttätig und zuverlässig arbeitende Pufferschaltung auch für alle Betriebe ausreicht, bei denen es nicht so genau darauf ankommt, die Sammelschienenenspannung innerhalb verhältnismäßig sehr enger Grenzen unverändert zu halten, so muß sie aber, wenn besonders hohe Anforderungen gestellt werden, noch erweitert werden, indem eine Nachregelung der Nebenschlußerregung der Zusatzmaschine durch einen Schnellregler vorgenommen wird. Dieser Regler muß seinerseits von den Änderungen der unverändert zu haltenden Maschinen- oder Sammelschienenenspannung beeinflusst werden. Eine derart feine Zusatzregelung ist darum notwendig, weil sich die Spannung der Batterie auch bei gleichbleibendem Lade- und Entladestrom rasch in den ersten Sekunden nach Eintritt der Ladung bzw. Entladung ändert. Das ist aus dem Verlauf der Kennlinien Abb. 32 und 33 zu ersehen.

Hinsichtlich der für die Pufferanlage zu verwendenden Schaltgeräte ist folgendes zu bemerken.

Wird durch irgendeinen Umstand z. B. durch das Ansprechen der Sicherungen oder des Selbstschalters der Stromkreis des Antriebsmotors der Zusatzmaschine unterbrochen, geht die in Reihe mit der Batterie liegende Zusatzmaschine durch, weil ein Entladestrom durch die Zusatzmaschine fließt, während eine Ladespannung erzeugt wird und umgekehrt. Die einfachste Schaltung zur Verhinderung dieser Gefahr ist die, die Zusatzmaschine kurzzuschließen, sobald der Antriebsmotor abgeschaltet wird, wie das in Abb. 52 angegeben ist. Der Motorstromkreis wird durch einen Selbstschalter gesichert, der besondere Hilfsschaltstücke besitzt, über die beim Ansprechen ein Meßwerk MW_2 in Tätigkeit gesetzt wird. Durch dieses wird die Hauptschlußwicklung $H.W.$ der Zusatzmaschine geöffnet und in die Nebenschlußwicklung $N.W.$ der ganze Regelwiderstand $N.Rgl.$ eingeschaltet. Dann wird der Meßwerkstromkreis des selbsttätigen Kurzschlußschalters $K.Sch.$ und damit dieser selbst geschlossen. Die Zusatzmaschine ist dadurch überbrückt.

Dient ein asynchroner Drehstrommotor zum Antrieb der Zusatzmaschine, so muß der Selbstschalter im Motorstromkreis noch

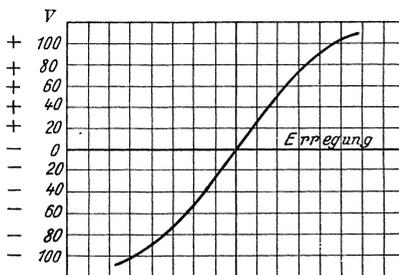


Abb. 53. Verlauf der Leerlaufkennlinie für eine Zusatzmaschine zur Pufferung.

mit verzögerter Nullspannungsauslösung versehen sein, um auch dann Sicherheit zu bieten, wenn die Spannung auf der Drehstromseite über eine bestimmte Zeit fortbleibt. Außerdem muß dieser Schalter so gebaut sein, daß er beim Betätigen von Hand den Meßwerkstromkreis der Schutzanordnung nicht schließt.

Ganz besonders ist darauf hinzuweisen, daß Streifsicherungen im Motorstromkreis nicht benutzt werden dürfen.

Zur weiteren Sicherung kann der Puffermaschinensatz noch mit einem Fliehkraftschalter *C*. versehen werden, durch welchen beim Versagen der anderen Schutzvorrichtungen ein besonderes, unabhängiges

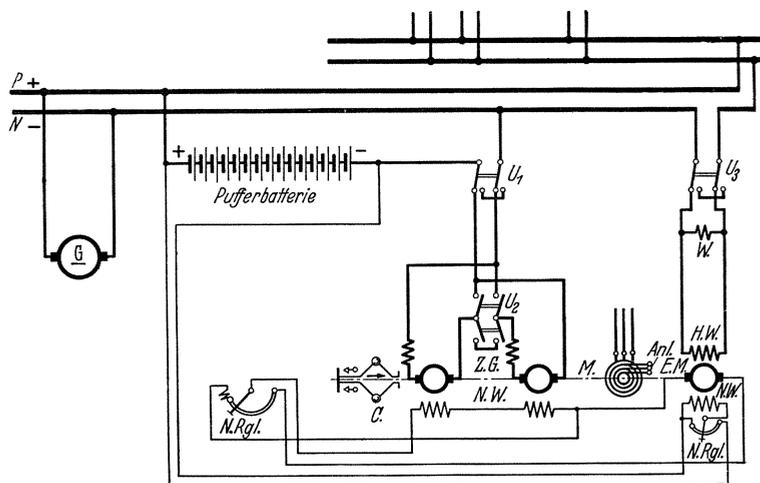


Abb. 54. Pufferung nach der Pirani-Schaltung.

Meßwerk MW_1 geschlossen wird, das das Ansprechen des Batterieschalters bewirkt. In Abb. 52 ist auch diese Sicherheitsschaltung eingezeichnet.

An sonstigen Schaltgeräten sind zu benutzen: ein zweipoliger Umschalter U_2 für die Schaltung der beiden Stromwender in Reihe oder parallel, ferner ein Umschalter U_1 ohne Unterbrechung zum Ein- und Ausschalten der Zusatzmaschine. Der Umschalter U_3 dient zum Kurzschließen des Regelwiderstandes für die Hauptschlußwicklung, während mittels des doppelpoligen Aus- und Umschalters U_4 , der mit einem Entladewiderstand $E.W.$ versehen ist, die Nebenschlußwicklung $N.W.$ aus- und eingeschaltet wird.

Eine andere, von den bisher behandelten grundsätzlich abweichende, häufig benutzte Schaltung ist die von Pirani angegebene, die besonders dann Anwendung findet, wenn es sich um sehr stark schwankende Belastungsverhältnisse, sowie um Umformerwerke handelt. Abb. 54 zeigt das Schaltbild für eine derartige Anlage unter Fortlassung aller Schaltgeräte.

Bei der **Pirani-Schaltung** wird ein Maschinensatz verwendet bestehend aus einer Gleichstrom-Zusatzmaschine mit Fremderregung *Z.G.*, einer unmittelbar gekuppelten kleinen Erregermaschine *E.M.* und dem Antriebsmotor *M.* Die Zusatzmaschine ist ständig mit der Batterie in Reihe geschaltet; sie erhält aber gegenüber Abb. 52 den Strom für ihre Erregung von der besonderen Erregermaschine. Diese besitzt eine Haupt- und eine Nebenschlußwicklung, die sich in ihren Wirkungen auf den Anker der Maschine wiederum entgegenarbeiten. Je nachdem die Hauptschluß- oder die Nebenschlußwicklung überwiegt, wird die Richtung des von der Erregermaschine und infolgedessen von der Zusatzmaschine gelieferten Stromes gewechselt. Die *N.W.* liegt an den Klemmen der Batterie und die *H.W.* an der negativen Sammelschiene. Die Wirkung der Hauptschlußwicklung ist somit von der Belastung abhängig, erhält also mit derselben veränderlichen Strom, während die *N.W.* von der Spannung der Batterie, die mit der Belastung schwankt, beeinflusst wird.

Durch diese Schaltung wird ebenfalls erreicht, daß sich die Richtung der von der Zusatzmaschine erzeugten Spannung entsprechend dem jeweiligen Belastungszustand des Netzes ändert und zur Batteriespannung oder zur Sammelschienenspannung hinzugefügt wird.

Die Arbeitsweise der gesamten Schaltung ist folgende: Durch das Gegeneinanderschalten der beiden Wicklungen der Erregermaschine kommt je nach den Stromverhältnissen im Netz bald die eine, bald die andere zur Wirkung; die Batterie wird veranlaßt, bei Überlastungen kräftig an der Stromlieferung ins Netz teilzunehmen, bei Entlastungen den überflüssigen Strom aufzunehmen und sich zu laden.

Tritt im Netz keine Belastung auf, dann arbeitet die Erregermaschine als reine Nebenschlußmaschine. Der von ihr der Magnetwicklung der Zusatzmaschine zugeführte Strom bringt ein Feld in solcher Richtung hervor, daß sich die Spannung derselben zu der Sammelschienenspannung zusetzt, und somit ein Aufladen der Batterie entsprechend ihrem jeweiligen Zustand erfolgt.

Wird das Netz zunächst unterhalb der Nennleistung der Hauptmaschine belastet, so durchfließt der Strom in der negativen Sammelschiene gleichzeitig die Hauptschlußwicklung der Erregermaschine in entgegengesetzter Richtung als der Strom in der Nebenschlußwicklung und schwächt das Feld der Erregermaschine. Dadurch sinkt die Spannung der Erregermaschine, der Ankerstrom nimmt ab, die Zusatzmaschine wird also schwächer erregt. Die von letzterer erzeugte Zusatzspannung für die Batterie geht zurück. Die Batterie wird demnach nur noch so viel Strom von den Hauptmaschinen erhalten, als gegenüber dem vom Netz geforderten an den Sammelschienen zur Verfügung steht.

Bei zunehmender Belastung im Netz stellt sich, wenn Netzbelastung und Hauptmaschinenleistung gleich sind, für die Erregermaschine ein Zustand ein, bei dem das von der Hauptschlußwicklung erzeugte Feld gleiche Stärke wie das von der Nebenschlußwicklung hervorgebrachte besitzt. Die Zusatzmaschine wird also spannungslos, die Batterie weder geladen noch entladen.

Übersteigt die Belastung des Netzes diejenige, die die Hauptmaschinen bei Vollbelastung abgeben können, so wird die Wirkung der *H.W.*

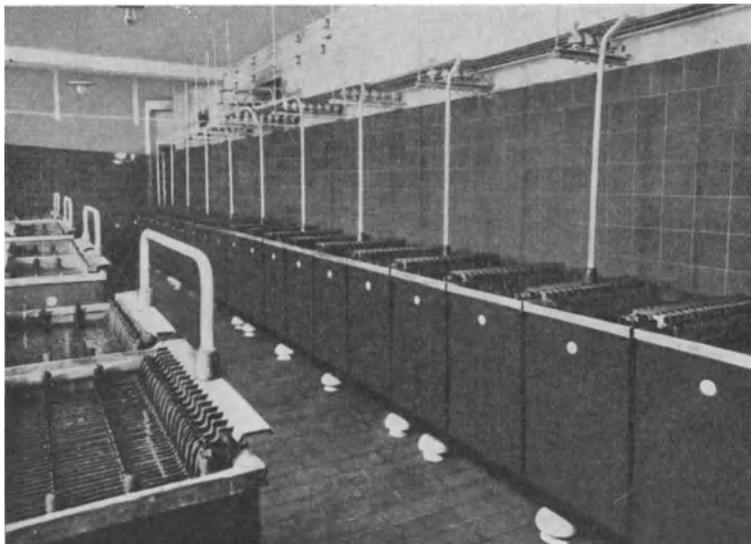


Abb. 55. Batterieraum mit Batteriezellen in Bodengestellen.



Abb. 56. Batteriezellen in Stockwerkaufstellung.

der Erregermaschine gegenüber derjenigen der *N.W.* vorherrschend, die Erregermaschine und somit die Zusatzmaschine polt sich um. Wenn letztere bisher eine Spannung erzeugte, die sich zur Sammelschienenspannung zusetzte, so erhält die Zusatzspannung jetzt eine derartige Richtung, daß sie sich zur Spannung der Batterie zusetzt. Die Batterie wird also je nach der Stärke der Belastung mehr oder weniger kräftig zur Stromlieferung herangezogen.

Diese Arbeitsweise der Zusatzmaschine geht selbsttätig vor sich, ohne daß ein Eingreifen des Maschinenwärters notwendig ist. Mit

Hilfe der im Schaltbild angegebenen Nebenschlußregler *N.Rgl.* kann das Arbeitsverhältnis je nach Wunsch verschoben und eine große Feinheit der Regelung eingestellt werden:

k) Die Akkumulatorenräume in bautechnischer Hinsicht bedürfen besonderer Behandlung.

Der Batterieraum muß trocken, gut belüftet, erschütterungsfrei sein und in staubfreier Umgebung liegen. Starke Temperaturschwankungen sollen ferngehalten werden. Bei Aufstellung der Batterie in Bodengestellen (Abb. 55) muß der Raum mindestens eine Höhe von 2 m erhalten. Stehen die Batteriegefäße übereinander (Abb. 56), muß die Höhe entsprechend größer gewählt werden. Die Auskleidung der Innenwände hat mit Zementputz zu erfolgen, der mit einem säurefesten Anstrich zu versehen ist. An Stelle des Zementputzes kann auch eine Verblendung aus Klinkern oder glasierten Tonplatten gewählt werden, wobei die Ausfugung wiederum mit Zement vorzunehmen ist. Das gleiche gilt für die Decke, damit keine Deckenputzteilchen in die Batteriegefäße fallen können.

Der Fußboden muß einen säurefesten Belag z.B. Eisenklinker mit ausgegossenen Fugen erhalten. Bei Spannungen über 250 V gegen Erde ist die Batterie mit einem isolierenden Bedienungsgang zu umgeben.

Die Fenster sind ebenfalls mit säurefestem Anstrich zu versehen und müssen so angeordnet sein, daß die entweichende säurehaltige Luft keine Gefährdung benachbarter Räume oder der Umgebung verursacht. Die Zeit der Ladung ist hierbei besonders zu beachten. Schutzgitter in den geöffneten Fenstern müssen säurefest gestrichen sein. Reicht die natürliche Belüftung nicht aus, dann muß eine künstliche Belüftung mit Lüftern angewendet werden, wobei der Lüfter außerhalb des Batterieraumes aufzustellen ist und als Drucklüfter arbeiten muß.

Der Batterieraum muß vor Frost geschützt sein, darf aber keine

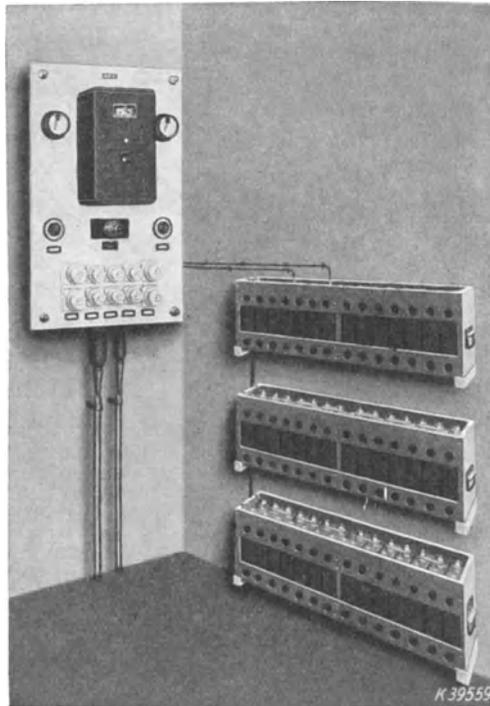


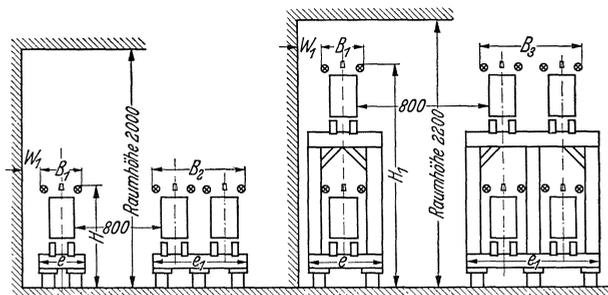
Abb. 57. Stahl-Batterien für 40 V auf Wandträgern mit Lade- und Verteilungsschalttafel.

Zahlentafel 3.

Planungsabmessungen für Bleibatterien in Boden (B)-, Doppelboden (DB)-, Stockwerk- (E)- und Doppelstockwerk- (DE)-Gestellen¹.
Sämtliche Maße in mm.

Zellen- größe	Kapazität in Ah bei drei- stündiger Entladung	Baulänge	Baubreite				Größte Breite der Gestelle			
			B_1	B_2	B_3	W_1	e		e_1	
						B	B	DB	DE	
						E	E	DE	DE	
LA	12	85	181	381	446	67 97	265	325	375	590
LB	24	120	181	381	446	67 97	265	325	375	590
LC	36	155	181	381	446	67 97	265	325	375	590
LD	48	195	181	381	446	67 97	265	325	375	590
$L 1$	27	105	279	594	679	25,5 125,5	280	480	595	880
$L 2$	54	140	279	594	679	25,5 125,5	280	480	595	880
$L 3$	81	175	279	594	679	25,5 125,5	280	480	595	880
$L 4$	108	280	200	450	535	57,5 137,5	265	425	515	760
$L 5$	135	280	240	530	615	57,5 137,5	305	465	595	840
$L 6$	162	280	280	610	695	57,5 137,5	345	505	675	920
$L 8$	216	280	200	450	—	50	250	—	500	—
$L 10$	270	280	240	530	—	50	290	—	580	—
$L 12$	324	280	280	610	—	50	330	—	660	—
$L 14$	378	280	315	680	—	50	365	—	730	—

¹ Angaben der Akkumulatoren-Fabrik AG. Berlin—Hagen (Westf.).



Ofenheizung oder andere Heizung solcher Art erhalten, daß offenes Feuer vorhanden ist, da während und kurz nach der Batterieladung Entzündungsgefahr der Gase besteht. Während dieser Zeit darf der Raum auch nicht mit offenem Licht betreten werden.

Die Zellenleiter werden in blankem Kupfer oder Aluminium, entweder eingefettet oder mit säurefestem Anstrich versehen, auf Isolatoren verlegt. Dafür sowie für die Beleuchtung, für Anbringen von Steckdosen und dgl. gelten die Vorschriften des VDE. Die Polbezeichnung ist blau für den Minus- und rot für den Pluspol.

Batterieräume gelten als elektrische Betriebsräume.

Der Vollständigkeit wegen zeigt Abb. 57 noch die Aufstellung einer Betätigungsbatterie mit Stahlzellen und die zugehörige Ladeschalttafel. Besonderes ist hierzu nicht mehr zu bemerken.

Aus Zahlentafel 3 können die Batterie-Raumabmessungen für verschiedene Zellaufstellung festgestellt werden.

4. Die Synchron-Wechselstromerzeuger.

Der grundsätzliche Aufbau eines Ein- oder Mehrphasen-Synchron-Wechselstromerzeugers wird wieder als bekannt vorausgesetzt. Für den den Entwurfs- und Betriebsingenieur besonders interessierenden elektrischen Aufbau, damit für die Angebotsausschreibung und die betriebliche Beurteilung sind unter Verweisung auf das auf S. 2 Gesagte bestimmend:

die Leistung in kW oder kVA (MW, MVA) und der Leistungsfaktor $\cos \varphi$,

die Spannung in V oder kV,

die Form der Erregung,

die Spannungsregelung,

die Frequenz,

die Drehzahl

das Parallelarbeiten.

a) **Leistung, Leistungsfaktor, Erregung.** Die Leistung, für die Synchron-Stromerzeuger gebaut werden können, ist nur begrenzt durch die ausführbare Leistung der Antriebsmaschinen. Da mit Rücksicht auf die Wicklungserwärmung der Belastungsstrom maßgebend ist, muß für die Größenbemessung der Maschine nicht die verlangte Wirkleistung (kW), sondern die vom Netz geforderte Scheinleistung (kVA) zugrunde gelegt werden. Der Strom (Nennstrom) ergibt sich aus der bekannten Gl. (21 a):

$$I_n = \frac{N_W \cdot 1000}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi} = \frac{N_n \cdot 1000}{U \cdot \sqrt{3}} \text{ A}, \quad (21 \text{ a})$$

oder

$$I_n = \frac{N_n}{U \cdot \sqrt{3}} \text{ kA}^1 \quad (21 \text{ b})$$

¹ In allen folgenden Gleichungen und Rechnungen wird zur klaren Übersicht und Rechnungsgestaltung

**nicht mit Volt, kW, kVA und A,
sondern mit kV, MW, MVA und kA (Kiloampere)**

gerechnet. Dadurch werden die Formeln eindeutig. Es entfällt die Umrechnung bei kW usw. mit 1000 und jede Verwechslung, ob die Spannung U in Volt oder kV einzusetzen ist.

In Gl. (21 b) ist:

N_W die Wirkleistung in MW,

N_n die Nennleistung (Scheinleistung) in MVA,

U die Spannung in kV,

$\cos \varphi$ der Leistungsfaktor der Netzbelastung bezogen auf die Stromerzeugerklemmen.

Bei der Festsetzung des Leistungsfaktors für die Maschine ist zu berücksichtigen, ob der Strom gegenüber der Klemmenspannung U nach- oder voreilen kann.

Für die Größenbestimmung der Antriebsmaschine ist nur die Wirkleistung maßgebend, so daß:

$$\left. \begin{aligned} N_A &= \frac{N_W}{\eta_G} \text{ MW} \\ &= 1,36 \cdot \frac{N_W}{\eta_G} \cdot 10^3 \text{ PS.} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Schon hier sei eingeschaltet, daß die Regelung der Leistungsabgabe der Synchronmaschine durch Regelung der Leistungszufuhr also der Antriebsmaschine erfolgt. Dazu ist die Drehzahl letzterer zu verstellen. Die Spannungsregelung geschieht durch Änderung der Erregung.

Die Maschinenleistungen für Drehstrom-Turbostromerzeuger werden in Deutschland in der letzten Zeit nach gewissen Normenvorschlägen¹ bestimmt, um die Herstellung zu vereinfachen und zu verbilligen.

Es sind hierfür die in Zahlentafel 4 angegebenen Werte festgelegt, die eine genügende Unterteilung aufweisen und allen Ansprüchen ohne Beeinträchtigung der Wirtschaftlichkeit zu entsprechen in der Lage sind.

Zahlentafel 4. Einheits-Maschinenleistungen für Drehstrom-Turbostromerzeuger.

Höchste Turbinen- dauerleistung MW	Stromerzeuger bei $\cos \varphi = 0,8$ MVA
1,25	1,6
2,0	2,5
3,2	4,0
5,0	6,4
8,0	10,0
12,5	16,0
20,0	25,0
32,0	40,0
50,0	64,0

Für Diesel- und Gasmotoren sind gleiche Normenvorschläge bisher nicht aufgestellt worden. Aber auch hier haben sich feste Einheitsleistungen herausgebildet, die bei 20, 50, 100, 300 PS und in größeren Stufen darüber liegen.

Bei Wasserturbinenantrieb ist die Leistungsaufteilung nach den Verhältnissen für Wassermenge und Fallhöhe vorzunehmen. Daher ist hier eine Leistungsnormung nur schwer durchzuführen, zumal auch die wirtschaftlich und betrieblich günstigste

¹ Taschenbuch für Energiewirtschaft 1939 S. 73/74.

Drehzahl für jede Anlage besonders festgestellt werden muß. Als Anhalt können die in Zahlentafel 4 angegebenen Leistungen für Turboströmerzeuger dienen.

Um zunächst die elektrische Abhängigkeit zwischen Belastung, Leistungsfaktor, induzierter EMK und Erregung d. h. also die elektrischen Verhältnisse eines Synchronstromerzeugers kennenzulernen, so weit ihre Erörterung in den Rahmen dieses Werkes fällt, soll eine einfache vektorielle Darstellung zu Hilfe genommen werden, die die Vorgänge in einer für den Entwurfs- und Betriebsingenieur genügend durchsichtigen Form übersehen läßt. Diese Einzelheiten müssen klar sein, weil sie bei der Leistungsbestimmung der Stromerzeuger in großen Kraftwerken von hervorragender Bedeutung sind. Eine mathematische Behandlung soll unterbleiben. Für das Vektorbild wird das des allgemeinen Umspanners herangezogen. Die mit Gleichstrom gespeiste Erregung ist die Oberseite, die induzierte Wicklung die Unterseite. Die Periodenzahl des Oberstromes ist Null, die des Unterstromes entspricht der verlangten Frequenz. Streuung und Einwirkung der einzelnen in der Maschine vorhandenen Felder aufeinander sollen unberücksichtigt bleiben.

Ausgegangen wird von der verlangten Klemmenspannung U , der Leistung N_n , daraus dem Strom I und einer bestimmten Phasenverschiebung zwischen Strom und Klemmenspannung, die ausgedrückt wird durch den Leistungsfaktor, den das zu versorgende Netz bei bestimmten Lastzuständen aufweist oder aufweisen wird. Die folgenden Schaubilder lehnen sich an die an, die bereits im Band I aufgestellt sind. In Abb. 58 wird die Klemmenspannung U dargestellt durch den Vektor \vec{Oa} , der Belastungsstrom I , der der Klemmenspannung um den Winkel φ nacheilt (gewöhnlicher Betriebsfall) durch den Vektor \vec{Ob} . Der gesamte Phasen-Spannungsabfall der Ständerwicklung¹ bei Belastung setzt sich zusammen, aus:

dem Ständer-Streuspannungsabfall:

$$E_s = I \cdot Z_s = \sqrt{(I \cdot R_s)^2 + (I \cdot x_s)^2} \text{ kV} \quad (23)$$

und dem Spannungsabfall durch die Ständer-Rückwirkung:

$$E_q = I \cdot x_a \text{ kV};$$

¹ Da in der Mehrzahl der Ausführungsformen synchroner Stromerzeuger die induzierte Wicklung im ruhenden Teil der Maschine (im Ständer) liegt, soll stets von der Ständerwicklung, statt von der induzierten Wicklung gesprochen werden. Über die Berechnung der einzelnen Werte siehe S. 182.

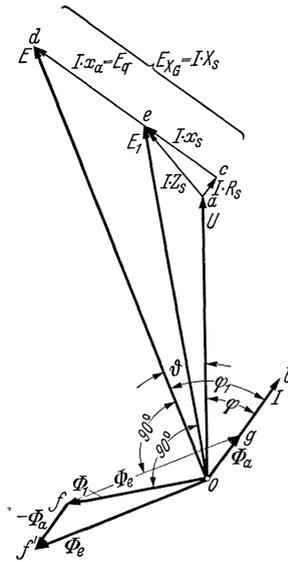


Abb. 58. Vektorschabild des Synchronstromerzeugers für Wirk- und Blindbelastung bei $\cos \varphi = 0,8$ nacheilend.

- Z_s gesamtter Scheinwiderstand der Ständerwicklung in Ohm/Phase,
- R_s Wirkwiderstand der Ständerwicklung in Ohm/Phase,
- x_a Ständer-Rückwirkungsblindwiderstand in Ohm/Phase,
- x_s Ständer-Streublindwiderstand bei eingefahrenem Läufer in Ohm/Phase,
- $X_s = x_a + x_s$ synchroner Blindwiderstand in Ohm/Phase.

Diese Spannungsabfälle sind bekannter Weise an den Vektor der Klemmenspannung anzutragen und ergeben in geometrischer Addition mit \overline{U} die vom Erregerfeld in der Erregerwicklung induzierte EMK $E = \overline{O\bar{d}}$ (fiktive Größe). E schließt mit dem Strom I den Phasenverschiebungswinkel φ_1 und mit U den Winkel ϑ (Polradwinkel) ein. Zur Erzeugung dieser EMK ist ein Kraftfluß $\Phi_e = \overline{O\bar{f}} = \overline{fg}$ erforderlich, der der EMK um 90° voreilt. In Abb. 58 ist also der Vektor dieses Kraftflusses senkrecht zu E im Punkt O anzutragen. Dieser Kraftfluß ist abgesehen von der Streuung in Abweichung vom gewöhnlichen

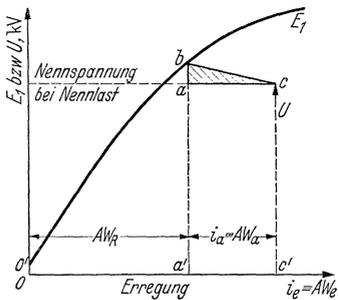


Abb. 59. Magnetisierungskennlinie des Synchronstromerzeugers mit Potierdreieck.

Umspanner mit der Belastung stark veränderlich und muß von der Gleichstrom-Erregerwicklung hervorgerufen werden. Es ist infolgedessen die Erregerdurchflutung AW_e maßgebend, die aus der Magnetisierungskennlinie und dem Potierdreieck (S. 72) Abb. 59 gefunden wird, oder da :

$$AW_e = i_e \cdot W_e$$

i_e Erregerstrom bei Nennlast A,

W_e Windungszahl der Erregerwicklung,

so ist der Erregerstrom ein unmittelbares Maß für den Kraftfluß Φ_e . Gibt in Abb. 59 der Punkt c die Spannung des Stromerzeugers bei Nennlast an, so ist der zugehörige Wert auf der wagerechten Achsenkreuzachse gleich dem Erregerstrom i_e . Auf dem Vektor Φ_e kann daher durch die Strecke $\overline{O\bar{f}} = \overline{fg} = i_e$ der Erregerstrom gekennzeichnet werden.

Die Ständerdurchflutung $AW_a = I \cdot W_a$ erzeugt den Ständerfluß Φ_a , der in Phase mit dem Strom I ist und daher auf dem Stromvektor \overline{Ob} abgetragen die Strecke $\overline{O\bar{g}}$ ergibt. Der vom Gleichstrom erzeugte Fluß Φ_e muß nach Aufhebung der Ständerdurchflutung $I \cdot W_a$ noch den resultierenden Fluß Φ_1 (AW_r) hergeben. Φ_1 erhält man somit als geometrische Summe von $-\Phi_a$ und $+\Phi_e$. Die von diesem resultierenden Fluß Φ_1 im Luftspalt induzierte EMK $E_1 = \overline{O\bar{e}}$ eilt Φ_1 um 90° nach. Damit ist ein einfaches Vektorbild des Synchronstromerzeugers für den Betriebszustand der Belastung mit nachteilendem Strom aufgestellt.

Der Wirkspannungsabfall in der Ständerwicklung ist vernachlässigbar klein. In der Hauptsache sind die Streufelder zu berücksichtigen. Das entsprechend vereinfachte Vektorbild wird im II. Abschnitt bei der Besprechung des Parallelbetriebes noch im einzelnen behandelt.

Das Folgende bezieht sich nur auf eine Maschine. Es ist daher der Einfachheit wegen das Schaubild Abb. 58 für die folgenden Betrachtungen zugrunde gelegt, um den Zusammenhang nicht zu zerreißen.

Drei Belastungsarten des Stromerzeugers sollen kurz besprochen werden.

1. Fall. Reine Wirkbelastung, also $\cos \varphi = 1$:

Der Strom $I = \overline{Ob}$ hat die Richtung des Vektors der Klemmenspannung $U = \overline{Oa}$. Da nunmehr der Wirkspannungsabfall \overline{ac} in die Richtung von U fällt, erhält das Schaubild die in Abb. 60 gezeichnete Form. Daraus geht hervor, daß bei dieser Belastungsart die zu induzierende EMK $E = \overline{Od}$ kleiner wird; die Erregung ist somit zu schwächen.

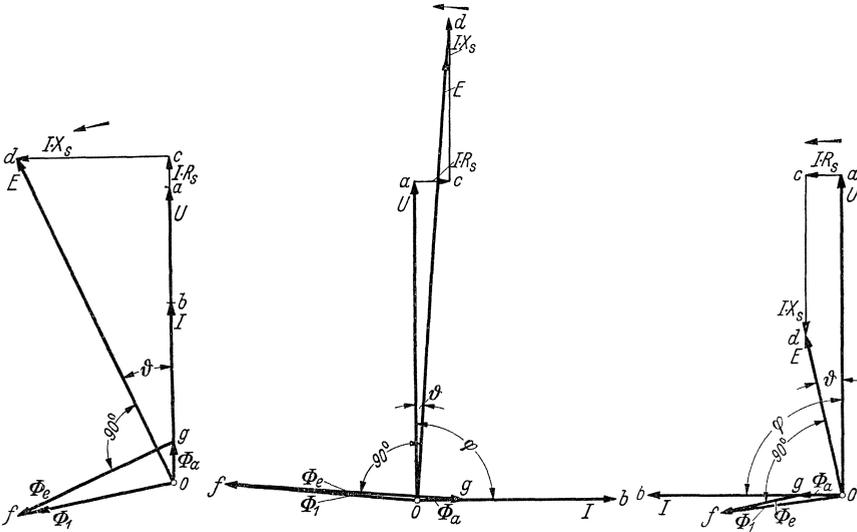


Abb. 60. Reine Wirkbelastung, $\cos \varphi = 1$.

Abb. 61. Reine induktive Belastung, $\cos \varphi = 0$ nachteilend.

Abb. 62. Reine kapazitive Belastung, $\cos \varphi = 0$ vorteilend.

Vektorschaubilder des Synchronstromerzeugers.

2. Fall. Reine Blindbelastung, also $\cos \varphi = 0$ nachteilend:

Der Belastungsstrom I und das von ihm erzeugte Feld Φ_a eilen der Klemmenspannung um 90° nach. Der induktive Blindspannungsabfall \overline{cd} fällt in die Richtung der Klemmenspannung. Das gesamte Erregerfeld $\Phi_e = fg$ wird annähernd gleich der arithmetischen Summe der Einzelfelder $\Phi_1 + \Phi_a$. Man sieht aus Abb. 61 nach der Lage der Vektoren, daß die Felder geometrisch zu subtrahieren sind, da nunmehr das Ständerfeld dem Erregerfeld unmittelbar entgegengesetzt ist. Die Erregung ist infolgedessen mit schlechterem Leistungsfaktor zu verstärken.

3. Fall. Reine kapazitive Belastung, also $\cos \varphi = 0$ vorteilend:

Das vom Strom I herrührende Feld Φ_a fällt in die Richtung des

Feldes Φ_1 und das gesamte Erregerfeld Φ_e ist nahezu gleich der arithmetischen Differenz $\Phi_1 - \Phi_a$. Da ferner der induktive Blindspannungsabfall \overline{cd} der induzierten EMK entgegenwirkt, steigt die Klemmenspannung. Ständer- und Erregerfeld wirken im gleichen Sinn, es tritt eine Spannungserhöhung an den Klemmen des Stromerzeugers ein (Abb. 62), der durch starke Schwächung der Erregung begegnet werden muß.

Ein Synchronstromerzeuger kann daher aus Spannungsabfall und Erregerstrom und mit den aus diesen Größen feststellbaren Werten für die induzierte EMK, die induktiven Verluste, die Ständer- und Erregerverluste und dem Wirkungsgrad beurteilt werden.

Für die elektrische Größenbestimmung eines Synchronstromerzeugers ist nach diesen kurzen Erläuterungen der wechselnde elektrische Zustand des Netzes von besonderer Bedeutung und muß in seinen Grenzen möglichst genau bekannt sein, um die Maschine zweckentsprechend zu bemessen und betrieblich entsprechend verwenden zu können. Es genügt nicht, die Maschine nach der verlangten Leistung, Spannung und dem etwa zu erwartenden Leistungsfaktor nacheilend auslegen zu lassen, sondern es müssen auch die wechselnden Blindstromverhältnisse des Netzes im gewöhnlichen Tages- und Nachtbetrieb, bei Störungen und beim Verbundbetrieb mit anderen Werken berücksichtigt werden. Je genauer das insbesondere bei großen Anlagen geschieht, um so mehr ist der Betrieb in der Lage, die Kraftwerksspannung schon mit den Maschinen entsprechend sicher zu regeln.

Es soll über den Blindstrom noch eine weitere kurze Erläuterung eingeschaltet werden. Der der Spannung nacheilende Blindstrom für die Magnetisierung, der das magnetische Feld von Motoren, Umspannern und Leitungen aufrecht erhält, belastet den Stromerzeuger induktiv, d. h. dieser gibt Blindstrom ab. Der Magnetisierungsstrom eilt der Maschinenspannung um 90° nach. Um diesen Magnetisierungsstrom zusätzlich zu erzeugen, muß der Stromerzeuger übererregt werden. Die zweite Art des Blindstromes ist der Ladestrom zur Aufladung des elektrischen Feldes von Leitungen, wobei Kabel einen wesentlich höheren Ladestrom erfordern als Freileitungen. Dieser Ladestrom belastet den Stromerzeuger kapazitiv, d. h. dieser nimmt Blindstrom auf. Der Ladestrom eilt der Maschinenspannung um 90° vor und ist somit um 180° gegenüber dem Magnetisierungsstrom versetzt, d. h. der Ladestrom ist gleich einem negativen Magnetisierungsstrom, der von der Maschine aus dem Netz aufgenommen werden muß. Um das zu erreichen, muß der Stromerzeuger untererregt werden.

Da Magnetisierungsstrom und Ladestrom in großen Hochspannungsanlagen stets zusammen auftreten, der erste von der Belastung, der zweite von der Spannung abhängig und der Gesamtstrom geometrisch festzustellen ist, kann der erste oder der zweite so überwiegen, daß der Stromerzeuger mehr induktiv oder stark kapazitiv belastet wird. Dem betreffenden Zustand muß mit der Erregung gefolgt werden können, wenn die Klemmenspannung U einen bestimmten Wert beibehalten soll.

Wird der Stromerzeuger stark untererregt betrieben, so kann unter Umständen seine Stabilitätsgrenze so nahe liegen, daß ein Belastungsstoß selbst kleineren Ausmaßes die Maschine zum Kippen und damit zum Außertrittfallen bringt also zum Abschalten vom Netz zwingt. Näheres hierzu wird beim Parallelbetrieb behandelt. Das Überwiegen des Ladestromes tritt besonders in den Nachtzeiten bei langen leerlaufenden, oder nur sehr schwach belasteten Leitungen hoher Spannung auf. Sind Kabel hoher Spannung vorhanden, so ist ganz besondere Vorsicht am Platz und rechnerische Überprüfung erforderlich.

Sind zur Verbesserung des Netzleistungsfaktors Kondensatoren aufgestellt, so wird es Fälle geben, in denen zu bestimmten Belastungszeiten diese Kondensatoren abgeschaltet werden müssen, um die Kraftwerksmaschinen überhaupt noch untererregt im Betrieb halten zu können und eine gefährliche Spannungserhöhung zu verhüten.

In den Unterlagen für das Angebot auf Synchronstromerzeuger ist daher auf die Belastungsverhältnisse und die geforderte Untererregung hinzuweisen. Wenngleich es selbstverständlich außerordentlich schwer ist, bestimmte Wertangaben zu machen, so lassen sich doch Zahlen für die induktive und besonders für die kapazitive Belastung des Kraftwerkes nach den Angaben im Band II berechnen.

Zu den Netz- und den Betriebsverhältnissen der Synchronstromerzeuger muß der Maschinenhersteller eingehend Stellung nehmen. Bei Aufstellung neuer Maschinen zu bereits vorhandenen oder bei Auswechslung alter Maschinen sind die Netzverhältnisse zumeist so bekannt oder lassen sich für die weitere Zukunft so beurteilen, daß die wirtschaftliche Eingliederung der neuen Maschinen auch betrieblich hinsichtlich der Beherrschung der Deckung der kapazitiven Netzlast oder der erforderlichen Untererregung in weitgehendem Maß möglich ist.

Für die Betriebsführung sind folgende Fragen durch den Maschinenhersteller zu beantworten:

mit welcher Blindleistung kann der Stromerzeuger bei unveränderter Klemmenspannung untererregt belastet werden;

welche Höchstleistung in Abhängigkeit vom Leistungsfaktor ist bei Untererregung und verschiedenen Klemmenspannungen zulässig;

bis zu welcher niedrigsten Klemmenspannung kann der Stromerzeuger bei verschiedenen Werten für Belastung und Leistungsfaktor untererregt belastet werden, ohne daß die Stabilitätsgrenze überschritten wird; wie liegen die Werte bei einer Spannungsabsenkung um 10 vH und einem gleichzeitigen Belastungsstoß von 15 vH; welche Sicherheit bis zum Kippen der Maschine ist noch vorhanden;

wie ändert sich der Leistungsfaktor bei Untererregung mit veränderlicher Spannung.

Zu diesen Betriebsfragen wird der Synchronmaschine am einfachsten eine Kennlinientafel beigegeben, aus der das Verhalten der Maschine festgestellt werden kann. Es ist zu beachten, daß auch sehr große Kraftwerke des Nachts zumeist sehr gering belastet sind und dann oft nur eine Maschine im Betrieb haben, die die erforderliche Spannungshöhe zu regeln sicher imstande sein muß. Ist das nicht möglich, muß eine zweite

leerlaufende Maschine oder eine Luftspalt- bzw. gesättigte Drosselspule u. U. unwirtschaftlich zugeschaltet werden, um die für die Stabilität des Stromerzeugers erforderliche Erregung einzuhalten¹. Gegebenenfalls muß auch noch die Umspannerspannung geregelt werden, was teure Zusatzeinrichtungen bedingt und oftmals darauf schließen läßt, daß der Maschinenspannungsregelung nicht in allen Punkten beim Entwurf der Maschinen Rechnung getragen worden ist, also ein Entwurfsfehler vorliegt.

Den Belastungszustand reiner Blindleistung bei der Erregung = 0 und damit den Blindstrom der Stabilitätsgrenze kann man aus der Leerlauf- und Kurzschlußkennlinie und der prozentualen Streuspannung feststellen, die für jede Maschine aus der Berechnung oder aus der Prüfung zur Verfügung stehen. Man bedient sich dazu des sogenannten Potierdreieckes², das aus der Streuspannung E_s (S. 67 und 182) und der Ständer-Rückwirkung gebildet wird und dessen lineare Abmessungen verhältnismäßig der Strombelastung der Maschine bei $\cos \varphi = 0$ sind. In Abb. 63 sind die Leerlauf- und Kurzschlußkennlinie sowie das Potierdreieck eines Synchronstromerzeugers eingetragen. Dem Kurzschlußstrom $I_{K,a} = I_n$ entspricht die Erregung i_K ; das Potierdreieck abc ist für den Nennstrom I_n gezeichnet. Die Spannung wird als unverändert vorausgesetzt. Aus dem Vektorbild in Abb. 63 links ist für verschiedene Winkel φ also verschiedene Leistungsfaktoren der Maschinenbelastung die Lage und daraus die Größe von E_s zu ersehen. Bei kapazitiver Belastung ist die EMK E_1'' kleiner als die Klemmenspannung. Für diesen Fall ist die Spitze b des Potierdreieckes nach unten gerichtet. Legt man demnach ein zweites Potierdreieck so, daß die Kathete \overline{ac} auf der Wagerechten durch die Nennspannung der Maschine und die Hypothenuse parallel zur Strecke \overline{bc} im Schnittpunkt der Wagerechten mit der senkrechten Achsenkreuzachse liegt, so schneidet diese Linie die Leerlaufkennlinie im Punkt b'' . Diese Kathete $\overline{a''c''}$ des neuen Potierdreieckes im Verhältnis zur Kathete des Dreieckes bei Nennbetrieb gibt den Blindstrom $I_{B\max}$ bzw. die Blindleistung der Stabilitätsgrenze im Verhältnis zum Nennstrom bzw. zur Nennleistung. Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich die Durchflutungsverhältnisse in der Maschine mit wachsendem $\cos \varphi$ ändern. (AW_a Abb. 59.) Für Schenkelpolmaschinen kann allgemein gesetzt werden $AW_{a,\varphi} = AW_{a,90^\circ} \cdot \sin \varphi_1$ (Abb. 58). Für Volltrommelmaschinen, für die mit der hier praktisch genügenden Genauigkeit das Verhältnis

$$\frac{\text{Ankerdurchflutung bei } \cos \varphi = 0}{\text{Leerlaufdurchflutung}} = 1,2 \div 1,5$$

angesetzt werden kann, ist zu rechnen³:

¹ v. Mangoldt, Dr. W.: Gesättigte Drosseln zur Spannungshaltung in Großkraftübertragungen. VDE-Fachberichte 1938 S. 2.

² Binder, L.: Streuspannung und Ständerückwirkung von Synchronmaschinen aus der Erregerstrom-Kennlinie (Tangenten-Methode). ETZ 1938 Heft 19. S. 492. Walter, E.: Untererregung von Synchronmaschinen mit ausgeprägten Polen. Siemens-Z. 1932 S. 254.

³) Richter, R.: Elektrische Maschinen Bd. II S. 276. Berlin: Julius Springer.

$$\begin{aligned}
 \text{bei } \cos \varphi = 1 & : AW_{a,1} = AW_{a,0} \cdot 0,69, \\
 & = 0,9 : AW_{a,0,9} = AW_{a,0} \cdot 0,83, \\
 & = 0,8 : AW_{a,0,8} = AW_{a,0} \cdot 0,88, \\
 & = 0,7 : AW_{a,0,7} = AW_{a,0} \cdot 0,92, \\
 & = 0,6 : AW_{a,0,6} = AW_{a,0} \cdot 0,94.
 \end{aligned}$$

Diese Verhältnisse müssen bei den Untersuchungen mit dem Potierdreieck in Abb. 63 berücksichtigt werden, indem der für die Stabilitätsgrenze aus dem Verhältnis der Strecken \overline{ac} und $\overline{a''c''}$ zu ermittelnde Blindstrom nach der Beziehung $I_n = I_n'$: Durchflutungsänderung festgestellt wird.

Tritt infolge eines starken Belastungsstoßes eine Spannungssenkung auf, so kann die Stabilitätsgrenze verschoben werden und die Maschine

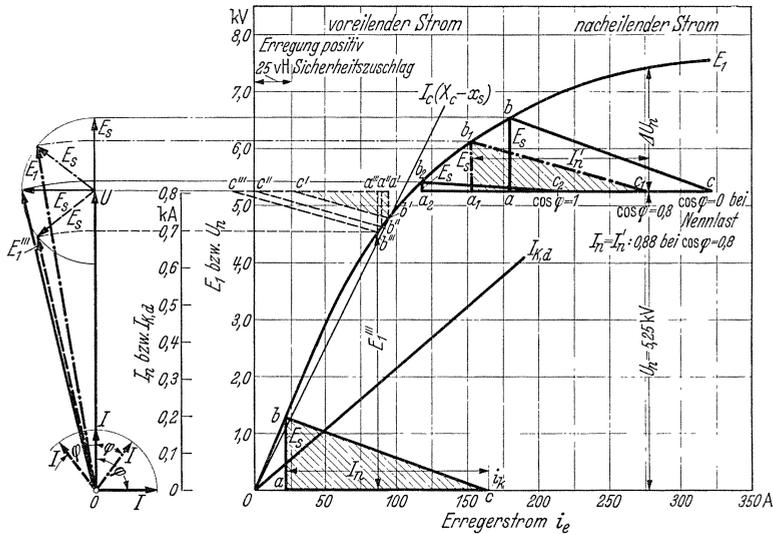


Abb. 63. Leerlauf- und Kurzschlußkennlinie mit Vektorschraubild und Potierdreieck für einen Synchronstromerzeuger bei verschiedenen Belastungszuständen, für $\cos \varphi = 1, 0,8, 0$ nach- und voreilend.

$N_n = 5,0 \text{ MVA}, U_n = 5,25 \text{ kV}.$

wiederum zum Kippen kommen. Es ist daher aus Sicherheitsgründen erforderlich, die Stabilitätsgrenze nicht zu erreichen, sondern von ihr etwa 20 bis 25 vH entfernt zu bleiben.

Liegt der Punkt c' nach dieser zeichnerischen Behandlung außerhalb der senkrechten Achsenkreuzachse, so bedeutet das, daß einmal die Stabilitätsgrenze überschritten wird (labiler Betriebszustand) und zum anderen, daß nunmehr nicht nur die Erregung auf Null zu bringen ist, sondern daß sogar Gegenerrregung gegeben werden muß. Ein solcher Betrieb ist nur sehr begrenzt und nur bei Schenkelpolmaschinen überhaupt möglich. Da er aber so gut wie nie vorkommt, für den praktischen Betrieb also keine wesentliche Bedeutung hat, soll auf ihn nicht weiter eingegangen werden.

Bei Turbostromerzeugern, die nicht für kapazitive Belastung von vornherein gebaut sind, ist der erzeugbare Strom bei Voreilung zumeist nur gering. Also ist bei dieser Maschinengattung besondere Vorsicht nach dieser Richtung am Platz.

In Abb. 63 ist eine Turbo-Synchronmaschine für $N_n = 5$ MVA, 5,25 kV, 0,5 kA, $\cos \varphi = 0,8$ nacheilend behandelt. Die Streuspannung E_s beträgt 24,7 vH der Nennspannung bei Vollast = 1,3 kV, der Erregerstrom $i_K = 165$ A bei $I_{K,a} = I_n$. Aus Abb. 63 folgt $I_{B \max}$ bei $\cos \varphi = 0,8$ voreilend $\frac{a'' c''}{I_n / I_n} = \frac{0,348}{0,88} = 0,391$ kA, und somit liegt die Stabilitätsgrenze bei $\frac{0,391}{0,55} \cdot 5,0 = 3,55$ MVA. Wird von dieser Blindleistung der notwendige Sicherheitsabschlag z. B. mit 15 vH abgesetzt, so ergibt sich eine höchstzulässige voreilende Blindleistung von 3,0 MVA. Wird weiter noch eine Spannungsschwankung von 10 vH berücksichtigt (insgesamt dann also 25 vH), so kann diese Maschine mit etwa 2,7 MVA voreilender Blindlast belastet werden. Dabei ist aber noch festzustellen, mit welcher Wirkleistung zu rechnen ist, um bei Stoßbelastungen das Außertrittfallen der Maschine mit Sicherheit zu vermeiden. Bei plötzlicher Entlastung und unveränderter Erregung ($\cos \varphi = 0,8$, Nennbetrieb) beträgt die Spannungserhöhung an den Klemmen der Maschine

$$\Delta U_n = \frac{E_1 - U_n}{U_n} \cdot 100 = \frac{7,4 - 5,25}{5,25} \cdot 100 = 41 \text{ vH.}$$

Sie liegt also noch unter dem nach den REM zulässigen Wert (S. 92).

K. Krapp¹ hat hierzu sehr übersichtliche zeichnerische Behandlungen angegeben, auf die verwiesen werden muß.

Die untererregte Belastung des Synchronstromerzeugers stellt auch an die Erregung bestimmte Anforderungen, um der Gefahr des labilen Zustandes der Maschine möglichst weit zu begegnen. Das gilt besonders für die Erregermaschine, wenn sie mit Eigenerregung betrieben und im Nebenschluß geregelt wird. Es werden dann besondere Maßnahmen zur Erhöhung der Stabilität notwendig, auf die bei der Behandlung der Erregermaschinen besonders eingegangen wird.

Um auch diese Verhältnisse schnell und einfach übersehen und dem Maschinenrechner entsprechende Unterlagen an die Hand geben zu können, muß der gesamte Ausbau des Netzes — soweit er sich bei Neuanlagen natürlich übersehen läßt — bekannt sein. Die Wahl der Netzspannung ist nach den Erörterungen im Band II leicht durchführbar. Ist diese bestimmt, kann aus Gl. (24):

$$I_G = \frac{U \cdot (l_F + 25 l_{Kab})}{13 \cdot (325 \div 385)} \cdot 10^{-3} \text{ kA bei } f = 50 \text{ Per/s} \quad (24a)$$

l_F Freileitungslänge, l_{Kab} Kabellänge in km,
325 für Spannungen zwischen 30 ÷ 60 kV,
385 für Spannungen zwischen 100 ÷ 120 kV

¹ Krapp, K.: Synchronmaschinen im untererregten Betrieb. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 1926 Bd. V Heft 2 S. 8.

und bei Umrechnung von der Hochspannung auf die Stromerzeugerspannung U_{n2} :

$$I_{C2} = I_{C1} \cdot \frac{U_{n1}}{U_{n2}} \text{ kA} \quad (24b)$$

der zu erwartende Kapazitätsstrom für eine Einfach- und verdrißte Doppel-Freileitung bzw. ein Drehstromkabel mit genügender Genauigkeit ermittelt und nunmehr geprüft werden, ob derselbe einen merklichen Einfluß auf den Betrieb der Anlage insbesondere bei wechselnder Belastung also namentlich bei stark sinkender Last, oder plötzlichem Ansprechen eines Schalters in weiter Entfernung vom Kraftwerk (plötzlicher Leerlauf einer Strecke) auszuüben imstande ist.

Für genauere Rechnungen ist nach den Angaben im Band II bei einer Einfach-Drehstromleitung:

$$I_C = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot C_b \cdot 2\pi \cdot f \cdot 10^{-6} \text{ kA/km} \quad (25)$$

C_b Betriebskapazität einer Phase in $\mu\text{F/km}$
 f Frequenz in Per/s

und die Ladeleistung:

$$N_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_C = U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_b \cdot 10^{-6} \text{ MVA/km} . \quad (26)$$

In Zahlentafel 9, S. 124 des Bd. II sind die Ladeleistungen für unbelastete Leitungen bei verschiedenen Spannungen und Leiterquerschnitten zusammengestellt.

Ist die Belastung des Stromerzeugers kapazitiv, so kann Selbsterregung eintreten, d. h. die Maschine unterliegt nicht mehr der Erregung aus der besonderen Gleichstromquelle. Im ersten Augenblick wird infolge des magnetischen Rückstandes eine kleine EMK induziert, die einen kleinen voreilenden Strom zur Folge hat. Die magnetische Wirkung dieses Stromes addiert sich zu der des magnetischen Rückstandes. Die Feldverstärkung und damit die Höhe der Selbsterregung hängt von der Größe des kapazitiven Blindwiderstandes des Netzes $X_C = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_C}$ ab. Es ist:

$$U_p = I_C \cdot X_C \text{ kV}$$

und

$$E_1 = U_p - E_s = I_C \cdot X_C - I_C \cdot x_s = I_C (X_C - x_s) \text{ kV}$$

U_p Phasenspannung in kV.

Schneidet die Gerade $I_C (X_C - x_s)$ in Abb. 63 die Leerlaufkennlinie, so stellt dieser gemeinsame Punkt einen Betriebspunkt dar. Im anderen Fall wird sich die Maschine nicht selbst erregen. Im ersten Fall läßt sich die Klemmenspannung durch zusätzliche Erregung erhöhen, im zweiten Fall kann die Klemmenspannung durch Verminderung der Erregung bis nahezu auf Null herabgeregelt werden. Tritt Selbsterregung ein, so genügt der dann nun 90° voreilende Strom zur Magnetisierung der Maschine. Die Spannung der Maschine wird höher, und dieser höheren Spannung entspricht ein höherer Strom, bis die Sättigung der Maschine erreicht ist. Der Betrieb mit Selbsterregung ist naturgemäß unzulässig. Bei Maschinen, deren Ladeleistung in der Nähe

der Selbsterregergrenze liegt, muß der Erregerstrom sehr feinstufig von Null an regelbar sein. Es ist bei sehr großen Anlagen zu prüfen, wieweit bis an die Selbsterregungsgrenze gegangen werden kann. Gegebenenfalls müssen die Maschinen entsprechend gebaut, oder es müssen z. B. Drosselspulen bzw. stark streuende Umspanner verwendet werden. Bei großen Hochspannungsnetzen wird man unter Umständen bis an die Selbsterregungsgrenze gehen müssen, um nach einer umfangreichen Störung das Netz wieder unter Spannung setzen zu können.

Auch hier gibt die vektorielle Behandlung der Frage dem entwerfenden Ingenieur ein sehr einfaches Mittel an die Hand, die Verhältnisse für alle möglichen Betriebsfälle zu untersuchen und zu klären. Schwieriger werden diese Feststellungen allerdings dann, wenn zwei oder mehrere Kraftwerke parallel arbeiten, worauf später näher eingegangen werden wird.

Ist I_C nach Gl. (24) ermittelt, so müssen eine Reihe solcher Vektorbilder entworfen und aus denselben die verschiedenen Betriebszustände ermittelt werden, die dann dem Maschinenrechner die Richtlinien für den Maschinenentwurf geben. Sind mehrere abgehende Hochspannungsleitungen vorhanden, deren Belastungen verschiedene Leistungsfaktoren aufweisen, so ist durch geometrische Addition bzw. Subtraktion der tatsächliche Strom für ebenfalls verschiedene, voneinander abweichende Betriebszustände auf den einzelnen Leitungstrecken festzustellen und dieser der Größenbestimmung der Stromerzeuger zugrunde zu legen.

Für die rechnerische Verfolgung gilt folgendes:

Der Belastungsstrom I wird in seine beiden Teilströme — den Wirkstrom und den Blindstrom — zerlegt, also:

$$I = \sqrt{I_W^2 + I_B^2} \text{ kA.} \quad (27)$$

Im Blindstrom I_B muß sowohl der nacheilende als auch der vor-eilende Strom berücksichtigt werden, und da letzterer gegenüber dem ersteren um 180° in der Phase verschoben ist, ist I_B durch numerische Rechnung zu finden, so daß:

$$I_B = I_b - I_C.$$

Die Gl. (27) geht damit über in:

$$I = \sqrt{I_W^2 + (I_b - I_C)^2}.$$

Der nacheilende Blindstrom ergibt sich aus der Belastung:

$$I_b = I \cdot \sin \varphi = \frac{N_W}{U \cdot \sqrt{3}} \cdot \text{tg } \varphi \text{ kA.} \quad (28)$$

In Zahlentafel 5 sind die Werte für $\cos \varphi$, $\sin \varphi$ und $\text{tg } \varphi$ zusammengestellt.

Zahlentafel 5. Ermittlung von $\text{tg } \varphi$.

$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$\text{tg } \varphi$	φ
0,99	0,141	0,143	$8^\circ 30''$
0,95	0,312	0,329	$18^\circ 12'$
0,90	0,436	0,485	$25^\circ 51'$
0,85	0,527	0,620	$31^\circ 47'$
0,80	0,600	0,750	$36^\circ 52'$
0,75	0,661	0,882	$41^\circ 25'$
0,70	0,715	1,02	$45^\circ 34'$
0,65	0,760	1,168	$49^\circ 27'$
0,60	0,800	1,33	$53^\circ 8'$
0,55	0,835	1,518	$56^\circ 38'$
0,50	0,866	1,732	$60^\circ 0'$
0,45	0,890	1,985	$63^\circ 15'$
0,40	0,916	2,290	$66^\circ 25'$
0,35	0,937	2,676	$69^\circ 30'$
0,30	0,954	3,180	$72^\circ 33'$

Die Belastung des Synchronstromerzeugers mit der auf dem Maschinenschild angegebenen Nennleistung in MVA ist nur zulässig, wenn der Leistungsfaktor gleich oder besser ist als auf dem Maschinenschild angegeben, denn es ist:

$$MVA = \sqrt{MW^2 + BMVA^2},$$

$$\cos \varphi = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}},$$

$$\text{oder Scheinleistung} = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Leistungsfaktor}}.$$

Je schlechter der Leistungsfaktor, um so größer wird die Scheinleistung $\sqrt{3} \cdot U \cdot I$ und bei unveränderter Spannung der Strom. Andererseits berechnen sich die Verluste in der Maschine und damit die erzeugte Wärmemenge zu $3 \cdot I^2 \cdot R_s$ angenähert. Diese Wärmemenge muß von der Kühlluft ständig abgeführt werden. Steigt I über das zulässige Maß, erwärmt sich die Maschine stärker, weil die Kühlluftmenge nicht ohne weiteres geändert werden kann. Das ist ganz besonders im Sommer zu beachten, wenn auch die Temperatur der Kühlluft hoch liegt.

Weiter ist darauf hinzuweisen, daß die Synchronmaschine auch dann nur mit dem vollen Ständerstrom belastet werden darf, wenn dabei der höchst zulässige Erregerstrom nicht überschritten wird. Also ist der Nennstrom im Ständer, wenn dabei der Leistungsfaktor schlechter ist als bei der Auslegung der Maschine angenommen, ebenfalls nicht ohne weiteres erreichbar, weil die in der Erregerwicklung auftretende Wärmemenge überschritten wird. Die Erregerwicklung kann in ihrer Isolation Schaden nehmen, damit in der sicheren Lagerung der Spulen und der Festigkeit dieser gegenüber den Erschütterungen und Schwingkraftbeanspruchungen. Für den zulässigen Erregerstrom, der nicht auf dem Leistungsschild angegeben ist, hat der Hersteller Angaben zu machen. Der auf dem Maschinenschild der Erregermaschine verzeichnete Strom gilt nur für die Belastung der Erregermaschine, nicht aber auch für die Synchronmaschine. Das gleiche gilt für die Erregerspannung. Zumeist wird die Erregermaschine für eine höhere Spannung und einen größeren Strom ausgelegt, um eine bestimmte Überlastung der Hauptmaschine zu ermöglichen.

In Abb. 64 ist die Belastungsfähigkeit einer 5,0 MVA Drehstrommaschine gezeichnet, aus der zu ersehen ist, um wieviel vH. der Nennleistung die Belastung (wärmemäßig) herabgesetzt werden muß, wenn der Leistungsfaktor zwischen Nacheilung und Voreilung schwankt. In

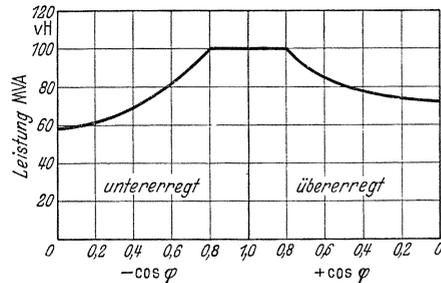


Abb. 64. Belastungsfähigkeit (wärmemäßig) eines Drehstrom-Synchronstromerzeugers bei vor- und nacheilendem Leistungsfaktor, gebaut für 5,0 MVA, $f = 50$ Per/s, $\cos \varphi = 0,8$ nacheilend.

Zahlentafel 6. Leistungen und Wirkungsgrade eines 5,0-MVA-Drehstrom-Turbostromerzeugers bei verschiedenen Leistungsfaktoren.

Leistungs- faktor $\cos \varphi$	Leistung MVA	Wirkungsgrad bei Belastung			
		$4/4$	$3/4$	$2/4$	$1/4$
1,0	5,0	96,5	95,7	94,0	89,0
0,8	5,0	95,5	94,5	92,5	86,5
0,7	4,575	94,8	93,7	91,4	84,7
0,6	4,250	93,7	92,4	90,1	81,8
0,5	3,950	92,3	90,5	87,2	78,1
0,4	3,925	90,4	88,3	84,0	73,5

Zahlentafel 6 sind diese Werte noch besonders aufgeführt. Auf die Nichtbeachtung dieser Betriebsvorschrift ist schon manche Maschinenzerstörung zurückzuführen gewesen. Ist starke Blindleistung zu decken, so wird eine unzulässige Überlastung der Maschine dadurch vermieden, daß nur die

höchste Erregerstromstärke eingestellt und nach dieser gefahren wird. Da in den Großkraftübertragungen durch die Kapazität der Leitungsanlagen ein schlechter Belastungs-Leistungsfaktor u. U. recht beträchtlich von selbst verbessert wird (Selbstkompensierung), ist hier nur auf die Belastungsfähigkeit und die Spannungsregelung bei stark verminderter Erregung und voreilem Strom zu achten. In Anlagen mit mittleren Spannungen muß dagegen der Betrieb mit mehr Vorsicht geführt werden, weil in diesen mit wenigen Ausnahmen ein zumeist sehr schlechter Leistungsfaktor herrscht und eine nennenswerte Verbesserung desselben in bezug auf das Kraftwerk durch die Kapazität der Leitung nicht eintritt. Dann können nur ruhende oder umlaufende Phasenschieber helfen, über die im Bar d I gesprochen worden ist.

Alle diese Untersuchungen und Feststellungen sind für den späteren ordnungsmäßigen Betrieb unbedingt notwendig, wie hier ausdrücklich nochmals betont sein soll.

Um diese für die wechselnden Belastungen bei Tages- und Nachtzeit, im Winter und Sommer, beim plötzlichen Abschalten von Last usw. bequem in geschlossener Form übersehen zu können, empfiehlt es sich, das vollständige Leistungsfaktor-Schaubild zu entwerfen, das in Abb. 65 gezeichnet ist. Sein Aufbau bedarf keiner besonderen Erläuterung. Die Einteilung des Leistungsfaktorkreises in $\cos \varphi$ Werte (voreilem und nacheilend) gestattet die sofortige Ablesung des jedem Netz- und Belastungszustand zugehörigen Gesamt-Leistungsfaktors in bezug auf das Kraftwerk oder einen anderen bestimmten Punkt der Anlage. So zeigt Abb. 65, daß sich bei einer kapazitiven Leistung $N_c = \bar{b}_2 \bar{b}_1$ der Leistungsfaktor der Belastung $\cos \varphi_2 = 0,7$ nachteilend für das Kraftwerk auf $\cos \varphi_1 = 0,9$ bei vollem Strom und auf $\cos \varphi'_1 = 0,4$ voreilem bei $1/10$ Belastung ändert.

Als Leistungsfaktoren werden im allgemeinen der Maschinenberechnung die genormten Werte nach REM zugrunde gelegt (1,0, 0,8, 0,7, 0,6). Sofern nicht anderes angegeben ist, wird vorausgesetzt, daß der Nennleistungsfaktor bezogen auf die Nennspannung an den Klemmen der Maschine bei Synchronstromerzeugern 0,8 nachteilend beträgt. Praktisch erscheint es aber immer vorteilhafter, um der zukünftigen Entwicklung des Netzes und seiner Belastung Rechnung zu tragen,

jedenfalls bei der öffentlichen Stromversorgung einen Leistungsfaktor von 0,7 bis 0,6 nacheilend vorzusehen. Bei Industriekraftwerken wird mit 0,8 nacheilend im allgemeinen auszukommen sein.

b) **Die Überlastung.** Hierzu gilt zunächst das auf S. 2 Gesagte hinsichtlich der REM. Weiter sind in den REM die Grenzwärmungen für die einzelnen Teile der Maschine festgelegt, die bei Nennlast und einer Kühlmitteltemperatur von $+35^{\circ}\text{C}$ gelten. Abb. 66 zeigt den Temperaturverlauf in einem Turbostromerzeuger bei verschiedenen Belastungen. Aus dem Betrieb wird oft die Frage gestellt, wieweit eine Maschine zusätzlich überlastet werden darf, wenn die Frischlufttemperatur unter $+35^{\circ}\text{C}$ liegt. Die Frage kann nur vom Maschinenhersteller beantwortet werden, da die Überlastbarkeit von dem ganzen Aufbau der Maschine abhängig ist, so von der gewählten Stromdichte in den Wicklungen, der Art der Isolation, der Höhe und Dauer der Vor-

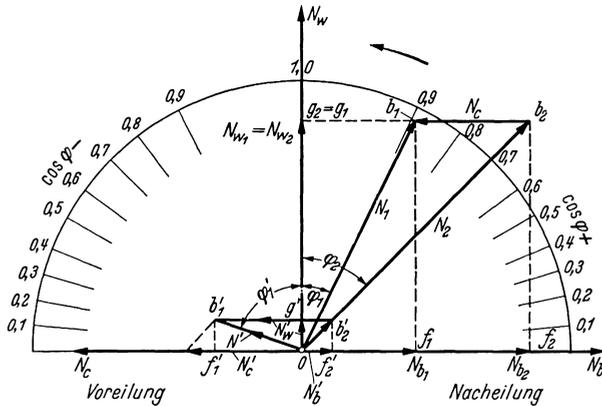


Abb. 65. Einfluß des Last-Leistungsfaktors (Leistungsfaktor-Schaubild).

belastung und der Kühlwege. Die in den REM festgelegten Höchsttemperaturen (Frischlufftemperatur + Erwärmung) sollen mit Rücksicht auf die Beständigkeit bzw. Lebensdauer der Isolation eingehalten werden¹. Es ist daher die Belastung der Maschine nicht nach den Grenzttemperaturen zu bemessen, wenn das Kühlmittel eine tiefere Temperatur besitzt, zumal die betriebsmäßige Temperaturüberwachung durch eingebaute Temperaturzeiger in den Ständerwicklungen nur Teilerwärmungen dieser Maschinenteile je nach ihrer Lage anzeigen. Liegen die Temperaturzeiger im Eisen, so zeigen sie diese Temperatur an, während die Wicklungstemperatur infolge der zwischen Eisen und Kupfer liegenden Isolation um 15° und mehr höher liegt (Abb. 66).

Ist die Maschine reichlich ausgelegt, was bei der Abnahmebelastungsprobe festzustellen ist, dann wird eine gewisse zusätzliche Überlastung bei niedrigerer Kühlmitteltemperatur möglich sein, wobei die vorausgegangene Belastung nach Höhe und Dauer zu berücksichtigen ist.

¹ Die thermischen Lebensbedingungen der elektrischen Maschinen im Betrieb. ETZ 1938 Heft 46 S. 1241.

sichtigen ist. Bestimmend ist der Erwärmungszeitfestwert, nach welchem die Maschine beim Anfahren aus dem kalten Zustand die zulässige Endtemperatur erreicht. Gute Maschinen lassen etwa um je 5° tieferliegende Frischlufttemperatur eine Leistungssteigerung um 1 bis 2 vH zu (Abb. 67), allerdings nur bis zu einem bestimmten Endwert (Abb. 68).

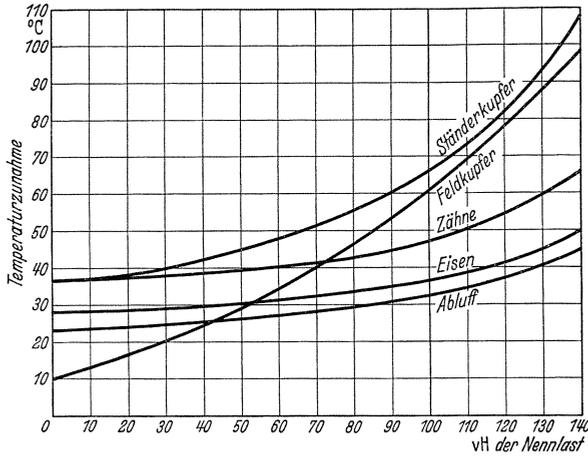


Abb. 66. Temperaturverlauf in einem Turbo-Stromerzeuger bei verschiedener Belastung.

Zu beachten ist, daß mit der Lasterhöhung auch die Erregung gesteigert werden muß, daß also auch auf die Leistung der Erregermaschine und wie bereits gesagt auf die Erwärmung der Erregerwicklung zu achten

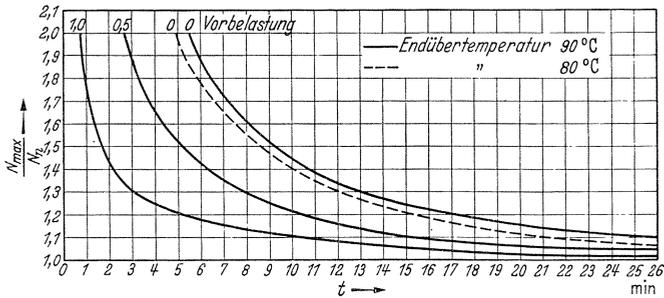


Abb. 67. Überlastbarkeit eines Drehstromerzeugers bis 80 und 90° Endtemperatur und verschiedener Vorbelastung (angenommen 80° Erwärmung bei Nennleistung).

ist. Da die Erregung zumeist für Regelvorgänge und kurzzeitige Überlastungen reichlicher bemessen wird, wird die Leistungssteigerung an den Verhältnissen der Erregung oft kaum scheitern. Schließlich ist auch die Stabilitätsgrenze für die Überlastung zu berücksichtigen.

Während sich das bisher Gesagte auf Kupferwicklungen bezog, ist bei Aluminiumwicklungen wesentlich größere Vorsicht geboten und die Überlastungsfähigkeit stärker beschränkt, weil das Aluminium

einen größeren Wärmeausdehnungswert besitzt (0,024 bei Al gegenüber 0,017 bei Cu). Infolgedessen können Isolationsbeschädigungen leichter auftreten.

e) Der Wirkungsgrad. Bei der Beurteilung der Wirkungsgrade von Drehstrom-Synchronstromerzeugern ist auf die Bauausführung, ferner wiederum auf die Art der Belastung und auf die jeweils eingeschlossenen Verluste auch durch Lagerreibung, Belüftung und Erregung zu achten. Die REM geben für Synchronmaschinen genaue Anweisungen über die Feststellung des Wirkungsgrades. Je nach der Höhe der induktiven Belastung ändert sich der Wirkungsgrad, und es muß daher stets darauf geachtet werden, bei welchem

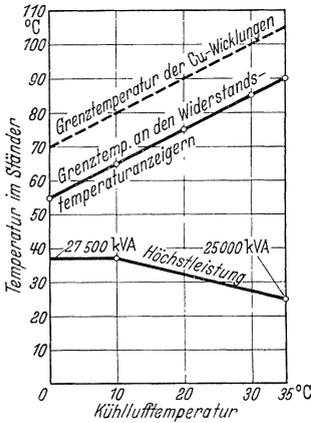


Abb. 68. Belastungsfähigkeit eines 25-MVA-Schenkelpol-Drehstrom-Synchronstromerzeugers in Abhängigkeit von der Kühllufttemperatur.

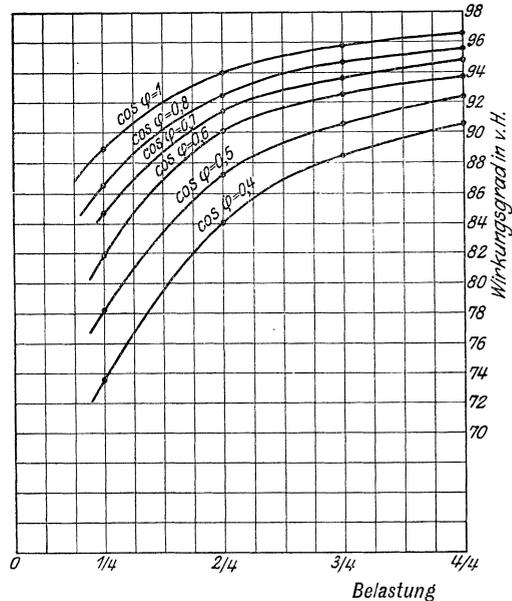


Abb. 69. Wirkungsgradkennlinien eines 5-MVA-Drehstrom-Synchronstromerzeugers bei verschiedenen Belastungen und Leistungsfaktoren.

Leistungsfaktor dieser gilt. Er ist naturgemäß am höchsten, wenn $\cos \varphi = 1$ ist, die Maschine also nur mit reiner Wirklast belastet arbeitet. In Abb. 69 sind für die in Abb. 63 behandelte 5,0-MVA-Maschine die η_G -Kennlinien für verschiedene Teilbelastungen und Leistungsfaktoren (nacheilend) zusammengestellt.

d) Die Spannung. Für die Wahl der Maschinenspannung sind zu meist zwei Gesichtspunkte bestimmend, die sich aus dem zu versorgenden Netz ergeben und gleichzeitig von der Größe der Maschinen abhängig sind. Da Synchronmaschinen mittlerer Leistung für Spannungen bis etwa 15 kV, bei großer Leistung bis etwa 35 kV ausgeführt werden können, können Netze mit diesen Spannungen unmittelbar also ohne Zwischenschaltung von Umspannern gespeist werden. Das ergibt die einfachste Anlage sowohl hinsichtlich der Schalteinrichtungen als auch der Raumbeanspruchung und unter Umständen wirt-

schaftlich den höchsten Gesamtwirkungsgrad. Allerdings steigt der Preis der Maschine mit der Spannung etwa in den Grenzen zwischen 10 und 15 vH gegenüber niedrigerer Spannung, während der Maschinenwirkungsgrad sowohl für Voll- als auch für Teillast kaum schlechter wird. Ferner sind die Maschinen gegen Gewitter- und Schaltüberspannungen durch Vorschalten von Überspannungsschutzeinrichtungen zu schützen und die Kurzschlußströme durch Schutzdrosselspulen zu begrenzen. Es verlohnt daher die Mühe, wenn die Maschinenspannung frei wählbar ist, mit dem Maschinenhersteller zusammen zu untersuchen, ob hohe Maschinenspannung ohne Umspanner oder mäßige Spannung mit Umspannern, im letzteren Fall entweder in der Kurzkupplung „Stromerzeuger—Umspanner“ oder mit Sammelschienen und gleichen oder

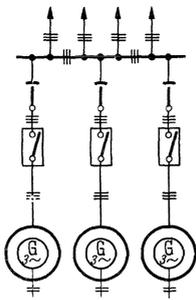


Abb. 70. Kraftwerkschaltung; Stromerzeuger- und Verteilungsspannung gleich.

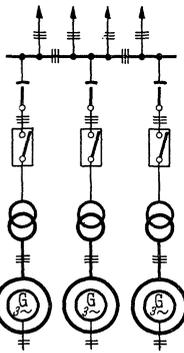


Abb. 71. Kraftwerkschaltung; Stromerzeuger-Umspannergruppen in Kurzkupplung. Gleiche Leistungsgrößen.

größeren unabhängigen Umspannern betriebliche und wirtschaftliche Vorteile bringt. Die grundsätzlichen Schaltungsmöglichkeiten, die hier schon vorangestellt sein sollen, zeigen Abb. 70 bis 74. Dabei ist darauf hinzuweisen, daß bei der Kurzkupplung stets die Stromerzeuger-Umspannergruppe vollständig ausfällt, wenn eine Störung im Stromerzeuger oder im Umspanner eintritt, während die Schaltung nach Abb. 72 bequemere und gegebenenfalls auch wirtschaftlichere Aushilfsmöglichkeiten besitzt.

Hinsichtlich der Kurzschlußstromverhältnisse ist auf das im 13. Kap. Gesagte zu verweisen. Nicht vergessen darf dabei die Beurteilung des Jahreswirkungsgrades (Band I) werden, der sich aus dem Lastverlauf und dem Einsatz der Maschinen ergibt. Die jeweils notwendigen Schaltanlagen und der Raumbedarf für diese müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

Bei der Gegenüberstellung der Vorzüge und Nachteile ist weiter die Spannungsregelung zu beachten, die nach den Belastungsverhältnissen des Netzes erforderlich ist. Der Wechselstrom hat im regelbaren Umspanner und in der Beeinflussung der Blindleistungen sehr einfache Mittel, jede gewünschte Spannungsregelung betrieblich in einfachster Form durchführen zu können (Abb. 73). Die Schaltung mit Dreiwicklungsumspannern zeigt Abb. 74.

Bei der Wahl der Maschinenspannung gleich der Netzspannung (Abb. 70) können sich hinsichtlich der Spannungsregelung Schwierigkeiten ergeben, die zur nachträglichen Aufstellung von Umspannern für einzelne Stromkreise zwingen. Damit wird dann aber einer der Hauptvorteile dieser Ausführung hinfällig.

Zu den Gefahren aus unmittelbar einwirkenden Überspannungen

ist auch die weitere Gefahr der unmittelbaren Kurzschlußübertragung auf die Wicklungen und die Fundierung der Maschinen zu beachten, gegen die der Einbau von Kurzschlußdrosseln notwendig wird. Ihre hohe Induktivität muß dann bei der Spannungsregelung berücksichtigt werden. Bei kapazitiver Belastung können sie von Vorteil sein. Zwischengeschaltete Umspanner mit ihren Induktivitäten machen solche Drosselspulen entbehrlich.

Die Wicklungsisolations¹ wird für Spannungen bis 10 kV als Papierisolation, darüber als Glimmerisolation ausgeführt. Maschinen für hohe Spannungen bei kleinen Leistungen wickeln zu lassen, kann auch mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit nicht empfohlen werden, weil die Raumaussnutzung in der Maschine so schlecht und die Ausladung der Wicklungsköpfe so groß wird, daß einerseits eine unnötig große Ausführung genommen werden muß, und andererseits die sichere Isolierung und Versteifung der Wicklungen, wenn sie häufiger vorkommenden Kurzschlüssen und Überspannungen in genügendem Maße gewachsen sein sollen, praktisch schwer ausführbar ist. Auf die verstärkte Isolation der Eingangsspulen wird noch besonders eingegangen werden.

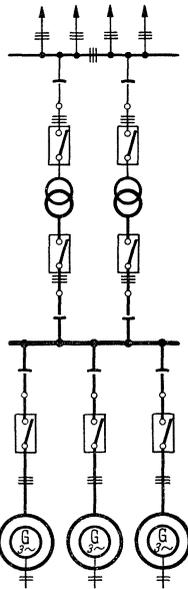


Abb. 72. Kraftwerkschaltung; abweichende Leistungsgrößen für Stromerzeuger und Umspanner.

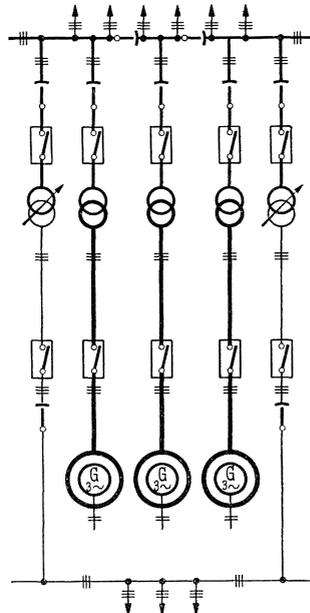


Abb. 73. Kraftwerkschaltung; Stromerzeuger- und Umspannerleistungen gleich; zwei Verteilungsspannungen über getrennte Umspanner.

Synchronstromerzeuger für Leistungen von 1,0 MVA bis etwa 5,0 MVA und darüber sind mit Spannungen bis 15 kV schon seit Jahren anstandslos im Betrieb, und auch Spannungen von 35 kV sind bei sehr großen Maschinen bereits ausgeführt worden². Für Industrieanlagen ist die Wahl der Maschinenspannung wesentlich einfacher. Sie wird am vorteilhaftesten nach der Netzausdehnung und der Größe der

¹ Eberspächer, W., u. H. Stach: Beitrag zur Isolierung von Hochspannungsmaschinen. Siemens-Z. 1934 Nr. 3 S. 88.

² In amerikanischen Anlagen wird die Maschinenspannung häufig mit 30 kV gewählt. Dabei ist aber zu beachten, daß der Nullpunkt der Wicklung kurz geerdet ist, so daß die Wicklungen nur für das $1/\sqrt{3}$ -fache der Spannung zu isolieren sind

Motoren bestimmt und die Beleuchtung mit Nebenbetrieben über einen Umspanner angeschlossen. Dabei ist aber zu beachten, daß die Kurzschlußverhältnisse der Schaltanlagen und des Netzes auch hier Grenzen setzen.

Als Spannungen sind die in den REM genormten Werte zu benutzen (Zahlentafel 7). Abweichungen von diesen werden heute in

Deutschland nur noch selten vorgenommen. Dabei gilt als Spannung bei Drehstrom die verkettete Spannung.

Um den im Netz auftretenden Spannungsabfall wenigstens zum Teil decken zu können, werden die Maschinen für eine Spannung $U + 5 \text{ vH}$ gewickelt und sollen nach den REM bei Nennleistung, Nenndrehzahl und Nennleistungsfaktor eine Spannung entwickeln können, die bis zu $\pm 5 \text{ vH}$ von der Nennspannung abweicht. Bei Betrieb mit diesen Grenzwerten der Spannung darf die Erwärmung die vorgeschriebenen Grenzwerte um nicht mehr als 5° überschreiten. Soll die Spannung in weiteren Grenzen veränderlich sein, dann müssen besondere Vereinbarungen mit dem Maschinenhersteller getroffen werden.

e) Die Kennlinien für Spannung, Strom und Feld. Die Spannung von Synchronmaschinen soll bei Leerlauf und bei Belastung auf einen induktionsfreien Widerstand einen praktisch sinusförmigen Verlauf auf-

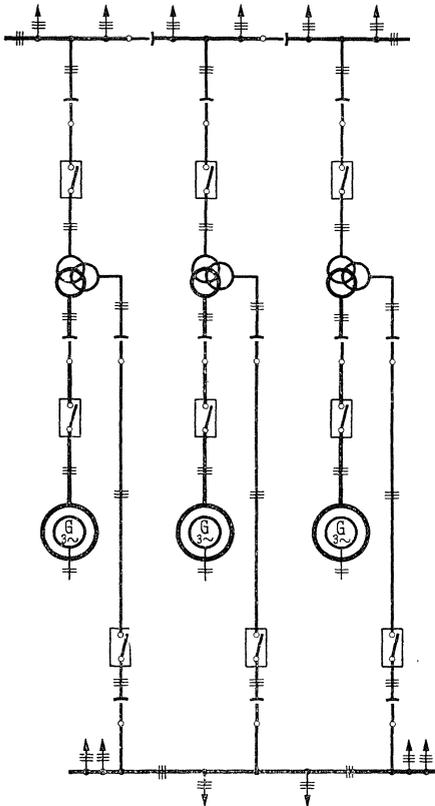


Abb. 74. Kraftwerksschaltung; Stromerzeuger- und Umspannerleistungen gleich; zwei Verteilungsspannungen über Dreiwicklungsumspanner.

weisen, wobei die Spannungswelle dann als praktisch sinusförmig gilt, wenn keiner ihrer Augenblickswerte a (Abb. 75) vom Augenblickswert gleicher Phase der Grundwelle g (1. Harmonische) um mehr als 5 vH des Grundwellenscheitelwertes S abweicht.

Die Bestimmungen der REM über Leistungsfaktor, Erwärmung und Prüfung für Wechselstrom-Synchronmaschinen gelten unter dieser Voraussetzung. Auf die Mittel, eine sinusförmige Spannungskennlinie zu erreichen, wird später näher eingegangen werden. Jedenfalls ist diejenige Maschine die bessere, die in ihrer Spannungskennlinie bei Leerlauf und Belastung zum mindesten auf einen Wirkwiderstand oder mit stark verzerrtem Strom und ungünstiger Feldkennlinie der reinen

Sinusform am nächsten kommt. Bei der Abnahme der Maschine muß der Verlauf der Spannungskennlinie oszillographisch festgestellt und geprüft werden.

Weicht die Spannungskennlinie von der Sinusform ab, so enthält sie Oberwellen der 3-, 5-, 7-, 9fachen Frequenz, die die Verzerrung herbeiführen und die

Zahlentafel 7. Genormte Spannungen.

Genormte Betriebs- spannung nach VDE 0176 V	Wechselstrom 50 Per/s	
	Nennspannung	
	für Stromerzeuger	für Motoren
125	130	125
220	230	220
380	400	380
500	525	500
1000	1050	1000
3000	3150	3000
6000	6300	6000
10 000	10 500	10 000
15 000	15 750	15 000

erzeugen. Letztere bewirken unter Umständen erhebliche Zusatzwärmeverluste in der Maschine, in den Umspannern (erhöhte Eisenverluste) und in den Übertragungsanlagen, ferner Bremsdrehmomente in den Motoren, verschlechtern den Wirkungsgrad, erschweren den Parallelbetrieb und haben erhöhten Spannungsabfall in Umspannern und Asynchronmotoren zur Folge. Außerdem verursachen sie

Feuern der Umformerbürsten, Erschwerung der Erdschlußlöschung, Überlastung der Kondensatoren. Störungen in Fernsprechanlagen mit geerdetem Leiter und erhöhen die Überspannungsgefahr. Die Oberwellen im Strom haben Überströme zur Folge, die bei Isolationsdurchschlägen erhöhten Schaden verursachen¹.

Die in der Spannungskennlinie enthaltenen Oberwellen können im Zusammenwirken mit den Induktivitäten der Maschine und den Kapazitäten der Übertragungsanlagen (Reihenschaltung von Widerstand, Induktivität und Kapazität), insonderheit der Leitungen, vergrößert werden und bei Resonanz einen Höchstwert erreichen, wenn:

$$\omega \cdot L_G = \frac{1}{\omega \cdot C_l}, \quad \text{oder} \quad \omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot \frac{p \cdot n}{60} = \frac{1}{\sqrt{L_G \cdot C_l}} \quad (29)$$

wird, worin L_G die Induktivität der Maschine in Henry, C_l die Kapazität der Leitungen in Farad und ω die Kreisfrequenz bedeutet. Der

Die fettgedruckten Spannungen sollen in erster Linie für Neuanlagen und auch für umfangreiche Erweiterungen gewählt werden.

Blindleistungsmaschinen sind hinsichtlich ihrer Nennspannung stets als Stromerzeuger zu messen.

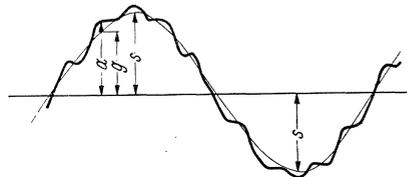


Abb. 75. Soll-Spannungskennlinie eines Synchron-Stromerzeugers (REM/VDE).

¹ Neuhaus, H., und R. Strigel: Der Verlauf von Wanderwellen in elektrischen Maschinen und deren Anschluß von Freileitungen. Arch. Elektrotechn. XXIX. Bd. 1935 Heft 10.

Strom erreicht in diesem Fall einen Wert:

$$I_{Re} = \frac{U_x}{r_x} \text{ kA}, \tag{30}$$

U_x Spannung der betreffenden x -ten Harmonischen der Maschinenspannung in kV,

r_x Wirkwiderstand des Stromkreises für diese x -te Harmonische (des Resonanzkreises) in Ohm/Phase,

d. h. die Induktivität und die Kapazität des Stromkreises heben sich auf, und es verbleibt nur noch der Wirkwiderstand. Da r_x stets sehr klein ist, kann I_{Re} außerordentliche hohe Werte erreichen.

Die Resonanzspannung ist dann:

$$U_{Re} = I_{Re} \cdot \omega \cdot L_G = I_{Re} \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_l} \text{ kV}. \tag{31}$$

Verlaufen die Augenblickswerte eines Wechselstromes in Abhängigkeit von der Zeit nicht nach der Sinusfunktion, sondern nach einer

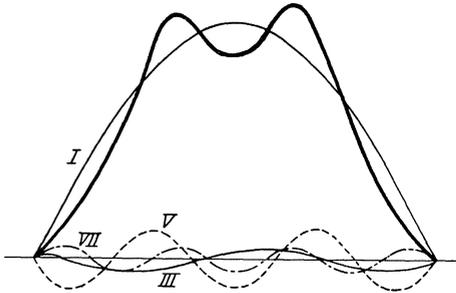


Abb. 76. Spannungskennlinie in ihre Oberwellen (Harmonischen) zerlegt.

anderen beliebigen periodischen Funktion, so kann man nach Fourier jede solche periodische Funktion durch die Summe einer Anzahl einfacher Sinusfunktionen von verschiedener Periodenzahl darstellen. Die Sinusfunktion mit der kleinsten Periodenzahl nennt man die Grundwelle oder 1. Harmonische, alle übrigen Sinusfunktionen mit Periodenzahlen, die ein Vielfaches derjenigen der

Grundwelle sind, die Oberwellen oder höheren Harmonischen. Abb. 76 zeigt eine Spannungskennlinie und ihre Zerlegung in die Oberwellen (Halbperiode). In der Elektrotechnik kommen praktisch nur Kennlinien vor, deren beide Hälften in bezug auf die wagerechte Achsenkreuzachse gleichlaufend sind. Bei diesen treten dann nur diejenigen Glieder in der Reihenentwicklung, die ein ungerades Vielfaches der Grundwelle sind, in Erscheinung.

Die Oberwellen werden außerordentlich vergrößert, wenn die Betriebsspannung nur um 10 bis 20 vH erhöht wird. Eine Spannungserhöhung im gewöhnlichen Betrieb um 10 vH muß aber jeder Stromerzeuger zulassen, um einen gewissen Teil der Spannungsregelung damit zu erfassen. Ferner beeinflusst das Netz mit seinen Induktivitäten und Kapazitäten die Phasenlage zwischen der Spannung der Oberwelle gegenüber der Grundwelle, und somit ist diese auch von der Änderung der Induktivitäten und Kapazitäten abhängig. Als Ursachen dieser Verzerrungen sind in der Hauptsache die Magnetisierungsströme der Umspanner¹

¹ Koller, A.: Über Kurvenformen von Spannungen und Strömen in Wechselstromnetzen. BBC-Mitt. 1921 Heft 10 S. 171.

zu betrachten, die zumeist viele bei Spannungserhöhung besonders stark ansteigende Oberwellen enthalten. Auch der Gleichrichterbetrieb hat zusätzliche Belastung durch nicht sinusförmige Ströme zur Folge. Das gleiche gilt von Lichtbogenöfen. Alles dieses läßt erkennen, daß einer möglichst reinen Spannungskennlinie der Maschinen auch bei Belastung ganz besonderer Wert beizumessen ist.

Da häufig über den Kennlinienverlauf von Spannung und Strom, sowie über die Wirkung der Oberwellen gesprochen wird, sollen hierzu kurz einige Erläuterungen gegeben werden.

Die allgemeine Differentialgleichung der EMK lautet:

$$u = i \cdot r + L \frac{di}{dt} + \int \frac{i dt}{C} \quad (32)$$

und diejenige des Stromes für jede beliebige Spannung:

$$\frac{1}{L} \cdot \frac{du}{dt} = \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{r \cdot di}{L \cdot dt} + \frac{i}{L \cdot C}. \quad (33)$$

Erzeugt ein Stromerzeuger eine Spannung u nach dem reinen Sinusverlauf und sind r , L und C unveränderlich, so ist nach Eintritt des Endzustandes:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}} \cdot \sin \left[\omega t - \arctan \left(\frac{\omega \cdot L}{r} - \frac{1}{\omega \cdot C \cdot r} \right) \right] \text{ kA}, \quad (34)$$

d. h. bei sinusförmiger Klemmenspannung ist die Kennlinie des Stromes ebenfalls sinusförmig und besitzt dieselbe Frequenz wie die Spannung.

In Gl. (34) ist:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}} \text{ der Höchstwert des Stromes} \quad (35)$$

und

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\omega \cdot L}{r} - \frac{1}{\omega \cdot C \cdot r} \right) \text{ der Phasenverschiebungswinkel.} \quad (36)$$

Der Höchstwert des x -ten Oberstromes ist:

$$I_x = \frac{U_x}{\sqrt{r_x^2 + \left(x \cdot \omega \cdot L - \frac{1}{x \cdot \omega \cdot C}\right)^2}} \text{ kA}, \quad (37)$$

und der Phasenverschiebungswinkel dieses Stromes:

$$\varphi_x = \arctan \left(\frac{x \cdot \omega \cdot L}{r_x} - \frac{1}{x \cdot \omega \cdot C \cdot r_x} \right). \quad (38)$$

Ist der Verlauf der EMK-Kennlinie der Maschine nicht sinusförmig, so erzeugt jede Oberwelle einen besonderen Strom von der ihr zugehörigen

Frequenz. Alle diese Oberströme sind voneinander unabhängig. Ferner ist zu beachten, daß die Höchstwerte der Oberströme nicht alle in demselben Verhältnis zu den Höchstwerten der Oberwellen der EMK stehen, denn aus Gl. (37) folgt:

$$\frac{U_x}{I_x} = \sqrt{r_x^2 + \left(x \cdot \omega \cdot L - \frac{1}{x \cdot \omega \cdot C}\right)^2} = Z_x = \text{Scheinwiderstand in Ohm} \quad (39)$$

des betreffenden Oberwellenkreises. Das gleiche gilt für die Phasenverschiebung, und es kann nicht gleichzeitig Resonanz bei mehreren Oberwellen eintreten. Infolge der Verschiedenheit der Höchstwerte der Spannungs- und Stromkennlinie in bezug auf Größe und Zeitlage hat die Stromkennlinie im allgemeinen einen ganz anderen Verlauf als die Spannungs-kennlinie.

Da nun r , L und C in der Gesamtheit der Strombahn Maschinenwicklung — Leitung — Verbraucher, also die Wirkwiderstände und Induktivitäten der Maschinenwicklung, diejenigen der Leitungen und die Kapazitäten der Leitungen innerhalb des durch die Anlage gebildeten Kreises nicht unveränderlich sind, beeinflußt ihre Veränderlichkeit die Stromkennlinie in folgender Weise:

a) Stromkreis nur mit Wirkwiderstand r_x :

$$I_x = \frac{U_x}{r_x} \text{ kA}, \quad \varphi_x = 0, \quad (40)$$

also hat die Stromkennlinie genau die gleiche Form wie die Spannungs-kennlinie und ist in Phase mit letzterer.

b) Stromkreis mit r_x und L :

$$I_x = \frac{U_x}{\sqrt{r_x^2 + (x \cdot \omega \cdot L)^2}} \text{ kA}, \quad \varphi_x = \text{arc tg } \frac{x \cdot \omega \cdot L}{r_x}; \quad (41)$$

die Oberwellen in der Spannungs-kennlinie prägen sich nicht gleich stark in der Stromkennlinie aus, da I_x um so kleiner wird, je größer x ist. Ferner wird φ_x um so größer, je größer x ist, also bewirkt L , daß die Stromkennlinie sich der Sinusform nähert.

c) Stromkreis mit r_x , L und C :

$$I_x = \frac{U_x}{\sqrt{r_x^2 + \left(x \cdot \omega \cdot L - \frac{1}{x \cdot \omega \cdot C}\right)^2}} \text{ kA}, \quad \varphi_x = \text{arc tg } \left(\frac{x \cdot \omega \cdot L}{r_x} - \frac{1}{x \cdot \omega \cdot C \cdot r_x} \right). \quad (42)$$

Je größer C ist, um so stärker treten die Oberwellen der Spannungs-kennlinie in der Stromkennlinie in Erscheinung; unter Umständen kann die Stromkennlinie vollständig verzerrt werden. Die Kapazität hat einen erheblichen Einfluß auf den Kennlinienverlauf der Netzspannung und des Stromes. Die fünfte Oberwelle ist oft stark vorhanden. Das ist besonders zu beachten für alle Hochspannungskraftübertragungen mit höheren Spannungen und langen Leitungsstrecken, bei denen erhebliche Werte für C auftreten.

Da die Oberströme voneinander unabhängig fließen, erzeugt jeder

Oberstrom für sich die bereits genannten Verluste und Nebenerscheinungen. Auch die Leistungen aller Oberwellen sind voneinander unabhängig. Der Strom der einen Oberwelle bringt mit der Spannung einer anderen Oberwelle keine Leistung hervor. Er ist also in bezug auf die Spannung der anderen Oberwelle Blindstrom. Für besondere Berechnungen gilt, daß jede Oberwelle rechnerisch und zeichnerisch für sich behandelt werden kann, so daß bei einer beliebig verlaufenden Spannungskennlinie aus jeder Oberwelle der Strom, die Leistung dieser Oberwelle und der Wirkungsgrad zu ermitteln sind.

Aus letzterem folgt, daß die der Oberwelle der Spannung zugehörigen Oberwellen des Stromes mit den ihnen jeweils entsprechenden Frequenzen Einfluß auf die prozentuale Strom- und Spannungsänderung im Stromkreis haben, da sich der induktive Widerstand verhältnismäßig und der kapazitive Widerstand umgekehrt verhältnismäßig mit der Frequenz ändert. Der Wirkwiderstand r_w ist unabhängig von der Frequenz für Kupfer und Aluminium, dagegen nicht mehr für Stahlaluminium (Band II). Für praktische Fälle kann jedoch dieser Einfluß vernachlässigt werden.

Rechnungen, auf die hier näher einzugehen zu weit führen würde, zeigen, daß die 3., 5. und

7. Oberwelle bei Kraftübertragungsanlagen mit Selbstinduktion und Kapazität sehr stark von der Belastungsart der Anlage beeinflußt werden, weil die Oberströme leichter zu Resonanzerscheinungen Veranlassung geben können als der Grundstrom.

Abb. 77 und 78 zeigen einige Stromkennlinien mit 3. und 5. Oberwelle und ihren Einfluß in bezug auf Abweichung von der reinen Sinusform.

Das Verhältnis zwischen dem Effektivwert einer periodischen Kennlinie und dem wahren Mittelwert nennt man den Formfaktor f_e ;

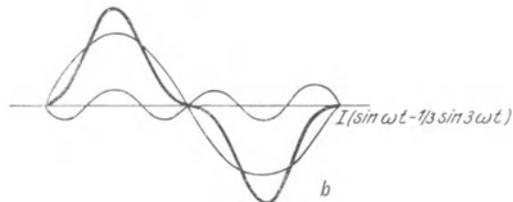
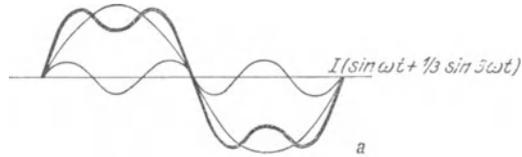


Abb. 77.

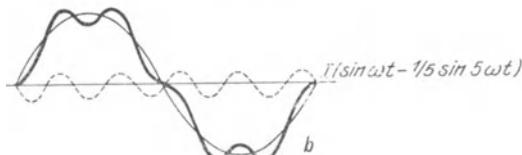
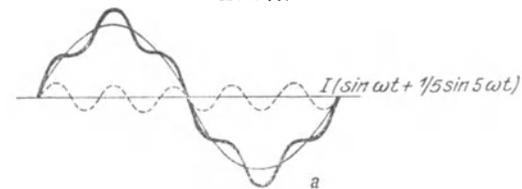


Abb. 78.

Abb. 77 und 78. Stromkennlinien in ihre Oberwellen (Harmonischen) zerlegt.

für eine EMK-Kennlinie ist:

$$f_e = \frac{\sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} u^2 dt}}{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} u dt} \tag{43}$$

$$T = \frac{1}{f} \text{ Periodendauer in s.}$$

Es ist f_e um so größer, je spitzer die Kennlinie ist; bei Sinusform wird $f_e = 1,11$. Nach la Cour¹ ist der Hysteresisverlust $V_{H, Tr}$ in einem Umspanner bei verschiedenen Formfaktoren unter der Voraussetzung unveränderter Klemmenspannung in vH vom Hysteresisverlust bei sinusförmigem Spannungsverlauf:

$f_e = 1$	1,05	1,11	$V_{H, Tr} vH = 118$	109	100
	1,15	1,20		94,5	88,5
	1,30	1,35		77,6	73,3
		1,40			69,3

Eine spitze Spannungskennlinie hat aber den Nachteil, daß die Isolation der Wicklungen bei gleicher Spannung stärker beansprucht wird als bei flacher. Daher ist besonders bei hohen Spannungen auf einen möglichst flachen Verlauf der Spannungskennlinie zu achten.

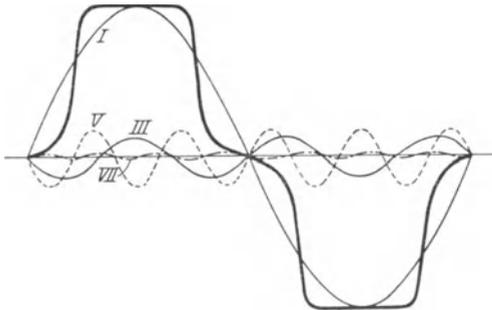


Abb. 79. Feldkennlinie eines Synchronstromerzeugers in ihre Oberwellen (Harmonischen) zerlegt.

Bei den Wechselstrom-Synchronmaschinen ist die Kennlinie der EMK von der Form des Feldes im Luftspalt d. h. von der Kennlinie, welche die Feldstärke im Luftspalt in Abhängigkeit vom Ständerumfang darstellt, abhängig. Abb. 79 zeigt eine Feldkennlinie und die Zerlegung derselben in ihre Harmonischen. Die in der Wicklung induzierte EMK enthält dieselben Oberwellen wie die Feldkennlinie. Auf die Form letzterer haben Einfluß das Verhältnis Polbogen zu Polteilung, dasjenige zwischen Luftzwischenraum und Polbogen, zwischen Polschuhhöhe und Polbogen, ferner die Form des Polschuhes (abgerundete, abgeschrägte Ecken), die Nutenform und die Nutenzahl je Pol und Phase. Bei Trommelläufern erhält der unbewickelte Teil auch andere Nuten als der bewickelte (schmäler, niedriger, auch geringere Anzahl), um nahezu gleiche Luftspaltinduktion in beiden Teilen zu erhalten. Mit der Verkürzung des Wicklungsschrittes können die 5., 7., 11. Oberwelle in der Feldkurve unterdrückt werden. Mehrfachwicklungen und unterteilte

¹ Arnold, E., u. J. L. la Cour: Die Wechselstromtechnik. Berlin: Julius Springer.

Wicklungen verkleinern stark die Oberwellen, Einfachwicklungen bringen verzerrte Spannungskennlinien hervor. Bei letzteren, die bei Hochspannungsmaschinen oft zur Anwendung kommen, muß dann durch besondere Ausbildung der Polschuhe auf die Unterdrückung der Oberwellen eingewirkt werden (Abb. 80).

Zur Beschränkung der Nutenüberschwingungen werden die Keile für das Verschließen offener Nuten aus Stahl, Bronze oder anderen Baustoffzusammensetzungen gewählt. Diese Keile bilden dann gleichzeitig eine Dämpferwicklung, durch die das bei Kurzschlüssen auftretende gegenläufige Drehfeld mit unterdrückt wird.

Bei der Feldkennlinie ist noch zu beachten, daß ein sinusförmiger Verlauf bei Leerlauf infolge der Ständer-Rückwirkung bei Belastung stark verzerrt werden kann; besonders bei Einphasenmaschinen ist dies der Fall.

Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß bei einer in Stern geschalteten Dreiphasenwicklung die dritte und ein Vielfaches (neunte) dieser Oberwelle keinen Einfluß auf die Klemmenspannung haben, weil sie in den einzelnen Phasen von gleichem Sinn sind und sich daher aufheben. Sie kommen also in der verketteten Spannung einer Sternschaltung nicht zur Wirkung, sofern es sich um gleichbelastete Phasen handelt. Bei ungleichbelasteten Phasen verschieben sich diese Verhältnisse.

Wird der Sternpunkt entweder unmittelbar oder über einen Wirk- bzw. induktiven Blindwiderstand geerdet, so haben die dritten Oberwellen der Spannung Ladeströme in den Kapazitäten des ganzen Netzes gegen Erde zur Folge, die sehr unangenehme Störungen auf benachbarte Schwachstromleitungen, insbesondere Fernsprechleitungen hervorrufen können, worauf bereits kurz hingewiesen wurde. Hier besteht weiter die Gefahr, daß die Oberströme in ihrem Verlauf Netz-Maschinenwicklung mit einer Eigenschwingung des Netzes in Resonanz kommen können.

Bei Dreieckschaltung der Maschinenwicklung werden die dritten Oberwellen in Reihe geschaltet. Sie liefern daher keinen Strom in die äußeren Leiter und erzeugen keine Spannungen zwischen den äußeren Klemmen. Da die von ihnen herrührenden Ströme auf die Selbstinduktion der Wicklung kurzgeschlossen sind, sie somit nur innerhalb der Wicklung verlaufen, erhöhen sie die Stromwärmeverluste und verzerren das Erregerfeld. Die Dreieckschaltung wird daher bei Stromerzeugern nur selten angewendet.

Abb. 80 zeigt einige oszillographisch aufgenommene Kennlinien für Turbo- und Schenkelpolmaschinen, die das bisher Gesagte deutlich vor Augen führen. Bei Turbostromerzeugern liegen die Verhältnisse wesentlich günstiger. Die reine Sinusform der Spannung ist hier durch die große Polteilung, die große Nutenzahl je Pol und Phase, die nicht ausgeprägten Pole und die verteilte Erregerwicklung leichter zu erreichen.

f) **Die Spannungsänderung** ist die Spannungserhöhung bei Eigen- oder Fremderregung, die beim Übergang vom Nennbetrieb auf Leerlauf

auftritt, wenn die Drehzahl der Maschine unverändert bleibt und der Erregerstrom ebenfalls nicht geändert wird. Nach den REM soll die Spannungsänderung 50 vH bei $\cos \varphi = 0,8$ nachteilig (Abb. 63) nicht überschreiten. Sie ist in vH der Nennspannung anzugeben.

Die Spannungsänderung ist bei Wechselstrommaschinen keine eindeutige Größe. Sie hängt also von der Ausführung der Maschinenwicklung

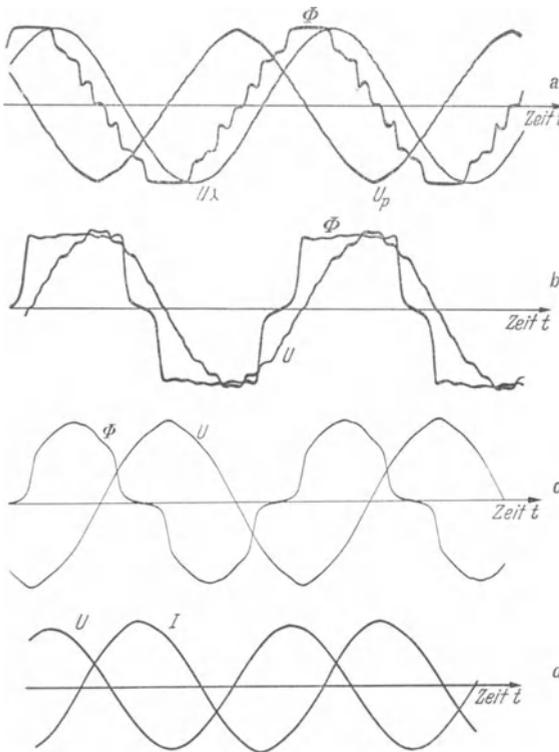


Abb. 80. Oszillogramme für den Kennlinienverlauf von Feld, Spannung und Strom bei ausgeführten Drehstrom-Synchronerzeugern.

a Feldkennlinie (Φ), Phasen- (U_p) und verkettete Klemmenspannung (U) eines Turboerzeugers. b rechteckige Feldkennlinie (Φ), treppenartiger Verlauf der Spannungskennlinie (U) eines Schenkelpolstromerzeugers. c Feldkennlinie durch Polformgebung abgerundet; keine Treppenbildung der Spannungskennlinie. d Strom- und Spannungskennlinie eines Turboerzeugers.

und dem Leistungsfaktor der Belastung ab. Es muß daher bei der Festsetzung der Werte für die Spannungsänderung stets der Leistungsfaktor mit festgelegt werden, bei welchem die Werte gelten sollen. Die Abhängigkeit von der Wicklungsausführung ergibt sich aus dem Kurzschlußstrom, für den die Maschine gebaut wird. Die Forderung nach geringem Kurzschlußstrom, die heute fast ausnahmslos gestellt wird (13. Kap.), hat zur notwendigen Folge, daß die Klemmenspannung der Maschine sich bei Änderung der Belastung in erheblichem Maß ändert, also große Spannungsänderung besitzt. Dies rührt daher, daß bei Entlastung des Stromerzeugers einerseits der bei Nennlast durch die Streuspannung aufgezehrte Spannungsbetrag frei wird und einen Teil der Klemmenspannung bildet und andererseits

der Teil der Felderregung, der zur Aufhebung des Ständer-Rückwirkungsfeldes bei Nennlast erforderlich ist, bei Entlastung felderzeugend wirkt und damit ebenfalls zur Änderung der Klemmenspannung beiträgt. Stromerzeuger mit 15fachem plötzlichem Kurzschlußstrom entwickeln bei Fortnahme der vollen Belastung Spannungserhöhungen bis zu 50 vH der Nennspannung, sofern mit einem Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,8$ nachteilig gefahren wird. Im gewöhnlichen Betrieb tritt allerdings eine

vollständige Entlastung zum mindesten größerer Maschineneinheiten sehr selten ein, sondern es werden betriebsmäßig nur Teillasten abgeschaltet, wobei die Spannungsänderung entsprechend geringer ist. Vollständige Entlastung kommt nur dann vor, wenn stark belastete lange Leitungsstrecken durch Ansprechen des Überstromschutzes plötzlich abgeschaltet werden. Auf alle Fälle ist es zweckmäßig, eine erhebliche Spannungssteigerung dadurch zu verhindern, daß eine selbsttätige Spannungsregelung durch Einbau eines entsprechenden Reglers in den Erregerkreis der Maschine angewendet wird.

Für die Spannungserhöhung erscheint noch folgende kurze Betrachtung zweckdienlich¹ (Abb. 81). Fällt die Last plötzlich vollständig ab,

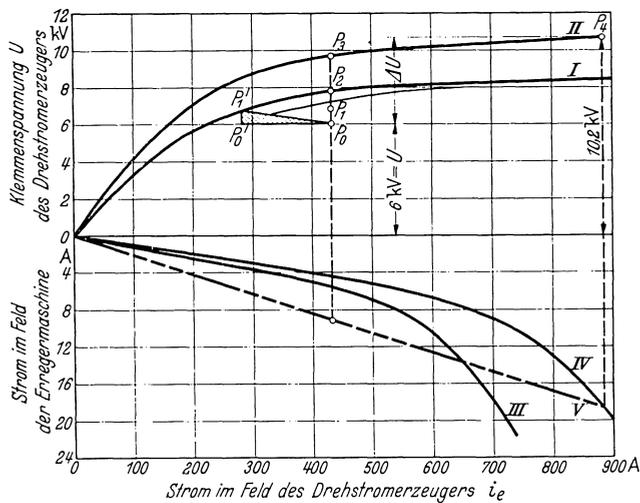


Abb. 81. Spannungserhöhung des Drehstrom-Synchronstromerzeuger mit Eigenerregermaschine bei plötzlicher Entlastung.

I Leerlaufkennlinie der Drehstrommaschine bei N_n , *II* Leerlaufkennlinie der Drehstrommaschine bei erhöhter Drehzahl, *III* Leerlaufkennlinie der Erregermaschine bei N_n , *IV* Leerlaufkennlinie der Erregermaschine bei erhöhter Drehzahl, *V* Widerstandsgrade der Erregermaschine, ΔU = Spannungsanstieg.

so verschwindet damit zunächst der innere Spannungsabfall in der Ständerwicklung des Stromerzeugers, und die Maschinenspannung steigt vom Wert P_0 bei Vollast auf P_1' . Vorausgesetzt, daß ein Schnellregler nicht eingreift, steigt die Spannung weiter auf den Wert P_2 , weil nunmehr auch die Ständer-Rückwirkung allmählich verschwindet. Die Leerlaufkennlinie der Erregermaschine hat sich zwischenzeitlich infolge des Drehzahlanstieges der Antriebsmaschine von *III* nach *IV* und die Leerlaufkennlinie der Drehstrommaschine ebenfalls von *I* nach *II* verschoben. Bleibt die Erregung unverändert, so erreicht die Klemmenspannung des Drehstromerzeugers zunächst den Wert P_3 und schließlich etwa den Wert P_4 , der wesentlich über der Nennspannung liegt. Erfolgt der Last-

¹ Das Verhalten der Synchronmaschine bei veränderlicher Spannung, Frequenz und Belastung. Elektrotechn. u. Maschinenb. 1928 Heft 26 S. 671.

abfall am Ende einer langen Hochspannungsleitung, so darf der Einfluß des Ladestromes auf die Spannungserhöhung nicht unberücksichtigt bleiben, sofern nicht Induktivitäten z. B. Umspanner diesen Einfluß mildern oder beseitigen. Über die Mittel, die Spannungserhöhung zu beherrschen, wird auf S. 345 eingehend gesprochen.

In früheren Jahren wurden die Maschinen mit geringer Spannungserhöhung bei Entlastung und möglichst geringem Spannungsabfall bei Belastung gebaut (harte Maschinen), um bei schwankenden Belastungen ohne Nachregelung der Erregung eine unveränderte Spannung im Netz zu erhalten. Diese elektrische Baurat ist heute vollständig verlassen worden, weil der dann im Kurzschlußfall auftretende Stoß- und Dauerkurzschlußstrom so groß werden kann, daß ihre Wirkungen gefährlich werden. Alle Maschinen werden daher, wie bereits gesagt, neuerdings mit größerer Spannungsänderung ausgeführt, so daß der Kurzschlußstrom in mäßigen Grenzen bleibt. Die Maschinen arbeiten dann bei allen starken Belastungsänderungen sehr weich. Schwierigkeiten im Parallelbetrieb treten nicht auf.

g) Die Erregung. Das über die Erregung bisher Gesagte bezog sich in der Hauptsache auf die damit im Zusammenhang stehenden Leistungs- und Spannungsverhältnisse. Die Stromlieferung für die Erregung erfolgt mit Rücksicht auf die Spannungsregelung stets von einer Gleichstrommaschine, die entweder mechanisch mit dem Stromerzeuger verbunden oder getrennt durch eine besondere Maschine angetrieben wird. Es bedarf besonderer Untersuchungen, welche Form zu wählen ist namentlich dann, wenn im Kraftwerk mehrere Stromerzeuger vorhanden sind, und wenn Verbundbetrieb in Frage kommt.

Die Eigenerregermaschine. In Deutschland wird in der Mehrzahl der Fälle jeder Stromerzeuger mit seiner eigenen Erregermaschine ausgestattet. Bei mittleren und hohen Drehzahlen und bei allen Turbo-stromerzeugern wird die Erregermaschine zumeist unmittelbar mit der Hauptmaschine zusammengebaut und zwar flicgend angeflanscht oder auf die Welle aufgesetzt. Eine Abweichung davon zeigt Abb. 125. Bei langsamlaufenden Maschinen, insbesondere bei großen Wasserkraftmaschinen, und dann, wenn der Stromerzeuger zwischen zwei Turbinen liegt, ist festzustellen, ob die zusammengebaute Erregermaschine mechanisch und preislich nicht ungünstiger ist als eine durch andere mechanische Verbindung (Riemen, Reibkupplung, Stirn- oder Kegelantrieb) angeschlossene Maschine, die dann für eine höhere Drehzahl gewählt werden kann. Zumeist wird das Ergebnis solcher Untersuchungen das sein, daß unter Berücksichtigung aller Verhältnisse, auch der Betriebssicherheit, des Platzbedarfes, der Geräuschbildung die angebaute Erregermaschine die vorteilhafteste Lösung darstellt.

Bei der Wahl der Eigenerregermaschine wird der ganze Maschinensatz eine vollständige unabhängige Einheit. Betriebsstörungen an der Erregermaschine beeinflussen die anderen Maschinensätze nicht. Es fällt nur der betroffene Stromerzeuger aus. Die angebaute Erregermaschine bedingt ferner die geringsten Anschaffungskosten für sie selbst, für die Kabelleitungen zur Schalttafel, für die Regelvorrichtung, für die Schaltgeräte.

Die Haltung von Ersatzteilen beschränkt sich dabei in größeren Anlagen auf die Beschaffung eines zweiten Ankers und gegebenenfalls einer Ersatzmagnetspule, wenn gleich große Maschinensätze vorhanden sind.

Der Umstand, daß die angebaute Erregermaschine beim Durchgehen des Stromerzeugers (Dampfturbinen- oder Wasserturbinenantrieb) die Spannungserhöhung an den Klemmen der Drehstrommaschine infolge ihrer eigenen Spannungserhöhung vergrößert, ist bei Handregelung allerdings ein Nachteil, dem aber durch geeignete Schaltung vollständig zu begegnen ist. Beim Überschreiten einer bestimmten Drehzahl wird die Erregung selbsttätig geschwächt, so daß die Spannungserhöhung auf der Drehstromseite die zulässige Grenze nicht überschreiten kann (S. 370).

Ein anderer Nachteil besteht bei der an-

gebauten Erregermaschine darin, daß sie kaum eine andere Ausnutzung (Nebenbetrieb, Hilfs- und Steueranlagen) als lediglich für die

Erregerstromlieferung gestattet. Da aber dieser Umstand auch infolge der Spannungsregelung der Erregermaschine heute keine wesentliche Rolle spielt, soll nicht auf Einzelheiten eingegangen werden.

Die Eigenerregermaschine muß einer Reihe von Bedingungen elektrischer Art ge-

nügen, wenn die Synchronmaschine allen im Netzbetrieb vorkommenden Fällen, von denen einige bereits aufgezeigt worden sind, sowohl in Einzelschaltung als auch im Parallelbetrieb gerecht werden soll. Diese Bedingungen sind: feinste, schnellste und wirtschaftlichste Regelung der Maschinenspannung bis auf den Nennwert, den Wert Null oder bis auf Gegenerrregung bei starker kapazitiver Belastung; stabiles Arbeiten im ganzen Regelbereich.

Für die Erregermaschine kann eine Nebenschluß- oder eine Doppelschlußmaschine gewählt werden. Bei ersterer erfolgt die Spannungsregelung mit Hilfe eines verhältnismäßig kleinen, sehr feinstufigen Reglers in der Nebenschlußwicklung (Abb. 82). Bei der Doppelschlußmaschine muß im Stromkreis der Hauptmaschinenerregung durch einen Hauptstromwiderstand geregelt werden (Abb. 83). Den ersten Bedingungen wird die Nebenschlußerregungsmaschine in vollem Umfang gerecht, wenn sie wie weiter unten erläutert entsprechend ausgeführt wird. Bei der Doppelschlußmaschine kann zwar auch eine feinstufige

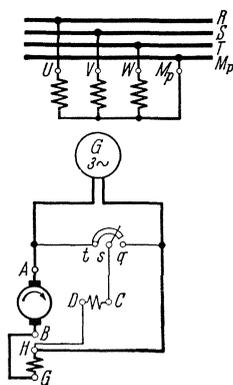


Abb. 82. Synchron-Drehstromerzeuger mit Eigenerrögen durch angebaute Erregermaschine mit Nebenschlußwicklung für Selbsterrögen.

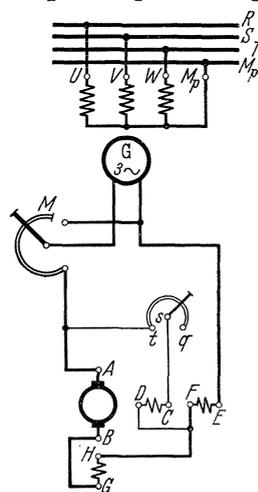


Abb. 83. Synchron-Drehstromerzeuger mit Eigenerrögen durch angebaute Erregermaschine mit Doppelschlußwicklung, Haupt- und Nebenschlußregler.

Regelung herbeigeführt werden, aber der Regler dazu wird sehr groß und teuer wie überhaupt bei dieser Erregermaschinenbauart die Regelung an sich unwirtschaftlich arbeitet, weil Energie in Widerständen vernichtet werden muß. Die Regler bedürfen sehr sorgfältiger Überwachung und häufiger Instandsetzung und außerdem großen Raumes für ihre Unterbringung, sowie schließlich besonderer Prüfung und Beseitigung der entwickelten Wärmemengen.

Die Nebenschlußerregermaschine erfordert zur Erfüllung der letzten Bedingung einer besonderen Bauart. Sie kann entweder als selbst-erregte oder fremderregte Maschine geschaltet sein, muß aber in beiden Formen stabil arbeiten. Arbeitet sie unstabil, arbeitet auch die Synchronmaschine unstabil.

In Abb. 84 zeigt Kennlinie *A* den gewöhnlichen Verlauf der magnetischen Induktion im Magnetfeld eines Gleichstromerzeugers. Bis zum Punkt a_1 steigt die Kennlinie geradlinig an, von da ab krümmt sie sich

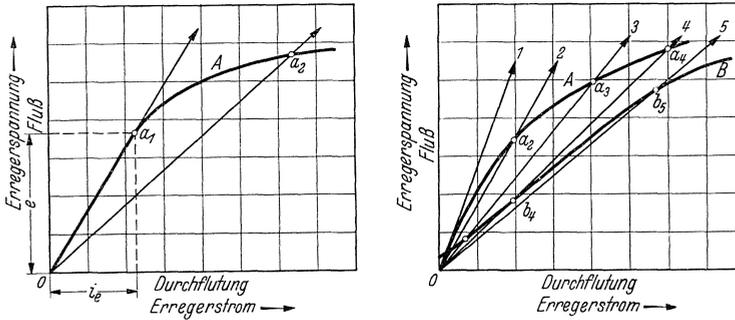


Abb. 84 und 85. Magnetisierungskennlinien für Erregermaschinen.

A Kennlinie ohne besondere Hilfsmittel, *B* Isthmuskennlinie.

bis zum Punkt a_2 und geht dann wiederum ziemlich geradlinig und parallel zur wagerechten Achsenkreuzachse weiter. Da die Magnetisierungslinie gleichzeitig die Spannungskennlinie der Maschine darstellt, gibt sie also die Erregung für eine bestimmte Spannung an, gleichbleibende Drehzahl vorausgesetzt.

Auf der Strecke vom Nullpunkt bis Punkt a_1 ist die Spannung verhältnisgleich dem Erregerstrom, das Verhältnis $\frac{e}{i_e}$ bleibt unverändert, d. h. jeder Spannung auf diesem Kennlinienteil entspricht der gleiche Nebenschlußwiderstand. Es ist in diesem Bereich eine Spannungsregelung nicht möglich. Bei kleinster Veränderung des Regelwiderstandes im Nebenschlußkreis steigt die Spannung sofort entweder bis zum Punkt a_1 an oder fällt bis zum Nullpunkt bzw. bis zur magnetischen Rückstandsspannung ab. Über den Punkt a_2 hinaus ist die Sättigung des Eisens so groß, daß auch hier eine Spannungsregelung kaum noch erreichbar ist, jedenfalls aber für eine ganz geringe Spannungserhöhung ein sehr großer Erregerstrom erforderlich wird.

Der Regelbereich einer Nebenschlußmaschine mit diesem Verlauf

der Spannungskennlinie ist daher nur auf die Strecke $\overline{a_1 a_2}$ begrenzt und infolgedessen für die Zwecke der Spannungsregelung der Synchronmaschine wesentlich zu klein. Weil im unteren Teil die Erregermaschine nicht stabil arbeitet, die Spannung also nur bis zum Wert e einstellbar ist, muß, um weiter abwärts regeln zu können, der Spannungsunterschied durch einen Hauptstromwiderstand abgedrosselt also vernichtet werden. Ist die Erregermaschine im untersten Teil ihrer Spannungskennlinie unstabil, so kann die Synchronstromerzeugung, wenn die Erregung bei sehr geringer Wirkbelastung infolge der Kapazität der Übertragungsanlagen fast bis auf den Nullwert herabgedrückt werden muß, elektrisch in Schwingungen kommen, die den Betrieb unmöglich machen. Wenn ein solcher Fall auch verhältnismäßig selten vorkommt, so ist er dennoch bei der Wahl der Erregermaschine zu beachten, zumal bereits vorhandene Schwingungen in diesem Arbeitszustand der Synchronmaschine von der Erregermaschine angefacht werden¹. Vorbeugungs- und Abhilfemaßnahmen gegen solche Erscheinungen sind die Fremderregung der Erregermaschine oder eine besondere Hauptstromzusatzwicklung als Verbundwicklung.

Da die Stabilität im ganzen Bereich der Erregerspannungsregelung, somit auch bei sehr niedriger Erregerspannung vorhanden sein muß, wenn das Feld der Erregermaschine nur schwach gesättigt ist, muß die Kennlinie der Erregermaschine in ihrem ganzen Verlauf gekrümmt sein (Kennlinie A in Abb. 85), damit die Widerstandsgeraden $01, 02, 03$ für den Verlauf der Abhängigkeit der Spannung an den Klemmen der Erregermaschine vom Strom im Erregerkreis der Erregermaschine nur einen bestimmten Schnittpunkt a_2, a_3, a_4 mit der Kennlinie A aufweisen. Der Aufbau der Erregermaschine ist demnach von Bedeutung und bei großen Synchronmaschinen im einzelnen anzugeben.

Auch bei plötzlicher Stoßbelastung der Synchronmaschine muß die Erregerspannung aufrechterhalten bleiben. Vor allen Dingen darf kein Umpolen der Erregermaschine auftreten. Zur Erklärung diene kurz, daß bei einem plötzlichen starken Belastungsstoß der Hauptfluß der Pole durch die plötzliche Erhöhung der Ständer-Rückwirkung unterdrückt wird, weil die Erregerwindungen auf den Polen eine hohe Induktivität besitzen. Der Erregerstrom steigt an und in der Ankerwicklung der Erregermaschine wird induktiv eine Spannung erzeugt, die der Erregerspannung entgegengesetzt gerichtet ist. Diese Spannung kann größer werden als die Erregerspannung, so daß dadurch die Erregerspannung umgekehrt wird. Beim Umpolen der Erregermaschine fällt die Synchronmaschine aus dem Tritt. Um das Umpolen sicher zu verhüten, wird die Erregermaschine entweder mit einer Ausgleichwicklung

¹ v. Timascheff: Anfachung von Schwingungen bei Synchronmaschinen durch Labilität der Erregermaschine. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 1938 XVII. Bd. Heft 3 S. 1. Arnold, E., und J. L. la Cour: Elektrische Eigenschwingungen in Gleichstrommaschinen. Die Gleichstrommaschine I. 3. Aufl. S. 528. Berlin: Julius Springer 1919. Richter, R.: Schwingungen bei Nebenschlußgeneratoren. Elektrische Maschinen I S. 521. Berlin: Julius Springer 1924.

oder noch mit einer Hauptstromwicklung versehen, dann also als Doppelschlußmaschine ausgeführt.

Für die brauchbare Gestaltung der Magnetisierungskennlinie der Erregermaschine werden verschiedene Ausführungen gewählt z. B. Pole

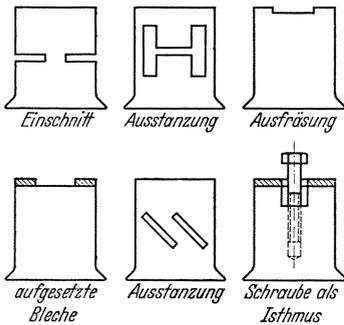


Abb. 86. Polformen mit Isthmus für die Erregermaschine eines Synchronstromerzeugers.

mit zwei Luftstrecken (Regulierpole¹) oder eine besondere Polform mit Isthmus, wobei nach Abb. 86 im magnetischen Pfad eine kurze Strecke mit engem Eisenquerschnitt vorgesehen wird. Diese Formen genügen für Maschinen mittlerer Leistung und nicht allzu weitem Regelbereich.

Soll die Erregerspannung in sehr weiten Grenzen regelbar sein, und verläuft die Belastung stoßweise sehr unregelmäßig mit starken Überlastungen, ist außerdem auf starke kapazitive Belastung Rücksicht zu nehmen, dann muß eine besondere Hilfsrerregemaschine im Erregerstromkreis der Erregermaschine benutzt werden. Abb. 87 zeigt eine Schaltung, bei der die Haupterregemaschine also fremderregt wird. An Stelle einer großen und einer kleinen Erregermaschine können auch zwei gleich große Maschinen gewählt werden, die in Gegenschaltung arbeiten (Abb. 88). Es gibt hierfür verschiedene Ausführungsformen, von denen eine der bekanntesten Schaltungen von Ossana² angegeben worden ist (Abb. 89), bei der zwei gleiche Erregermaschinen in der Bauform zu einer vereinigt sind. Die Maschine erhält Spaltpole, worunter die Aufspaltung der Pole verstanden wird. Die Spannung der Maschine setzt sich aus zwei Teilen zusammen, von denen der eine Teil z. B. 110 V unverändert bleibt, während der zweite Teil von der Spannung der ersten Polhälfte gespeist durch einen Umkehrregler beliebig weitgehend geregelt werden kann z. B. zwischen +110 und -140 V. Die Klemmenspannung der Maschine ändert sich dann zwischen

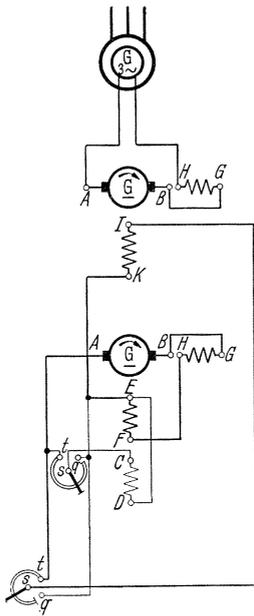


Abb. 87. Erregermaschine mit Hilfsrerregemaschine (Haupterregemaschine mit Fremderregung).

$$110 + 110 = 220 \text{ V und } 110 - 140 = -30 \text{ V.}$$

Da mit der Ossanamaschine Gegenrerreg-

¹ BBC-Mitt. Regulierpole für selbsterregende Gleichstrommaschinen und ihre Anwendung bei Erregermaschinen für Wechselstrom-Stromerzeuger.

² Leyerer, Dr. F.: Stabile Erregermaschinen für weiten Regelbereich. Die Ossanasche Spaltpolmaschine. Siemens-Z. 1926 Heft 4.

spannung erzeugt werden kann, so daß der magnetische Rückstand der Synchronmaschine vollständig vernichtet wird, kann die Synchronmaschine sehr schnell vollständig spannungslos gemacht werden, was bei Isolationsfehlern innerhalb der Maschine die Gefahr für die zerstörenden Brandwirkungen außerordentlich vermindert. Hierauf wird bei der Behandlung der Schaltgeräte nochmals zurückgekommen.

Bei der angebauten Erregermaschine ist betrieblich noch ganz besonders darauf hinzuweisen, daß bei Leerlauf der Synchronmaschine die magnetische Rückstandsspannung auch bei abgeschalteter Nebenschlußerregung der Erregermaschine eine so hohe Maschinenspannung erzeugen kann, daß eine Klemmenberührung größte Gefahr bringt. Es soll daher stets der Nebenschlußregler noch mit einem Schalter zum Abschalten oder Kurzschließen des Haupterregstromkreises versehen sein, der so verriegelt sein muß, daß er nur bei abgeschalteter Nebenschlußerregung betätigt werden kann.

Soll für Störungsfälle an der angebauten Erregermaschine die Umschaltung der Erregung auf eine andere Gleichstromquelle vorgesehen werden, dann muß für die Spannungsregelung ein Hauptstromregler vorhanden sein.

Da die Zeit für die Änderung der Klemmenspannung der Synchronmaschine also auch die Zeit für die Änderung der Erregerspannung nach Ansprechen des Spannungsreglers an die magnetischen Verhältnisse im Erregerkreis der Erregermaschine gebunden, infolgedessen mit einer mehr oder weniger großen Verzögerung behaftet ist (magnetischer Zeitfestwert¹), ist nach dieser Richtung die fremderregte Erregermaschine vorteilhafter als die eigenerregte Erregermaschine. Erstere besitzt als Folge der Fremderregung einen um ein Vielfaches geringeren magnetischen Zeitfestwert als letztere, so daß der Schnellregler im Erregerkreis wesentlich schneller zur Wirksamkeit kommen kann. Somit ist die fremderregte Erregermaschine für alle Stromerzeuger im Verbundbetrieb und für alle besonderen Stützungsmaschinen zu wählen, weil mit der schnellen Spannungserhöhung die synchronisierende Leistung und damit die Stabilität der Stromerzeuger bei starken plötzlichen Laststößen aufrecht erhalten werden kann. Für große Maschinen wird

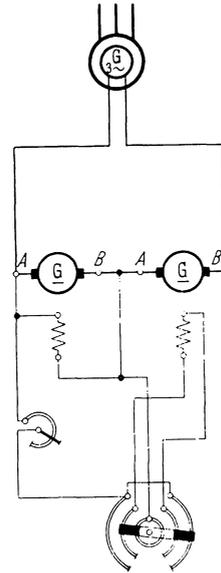


Abb. 88. Zwei Erregermaschinen in Gegen-schaltung.

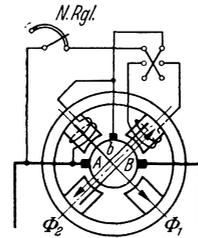


Abb. 89. Ossauna-Spalt-polmaschine.
A, B Hauptbürsten,
a, b Hilfsbürste, Φ_1 gleich-
bleibendes Feld, Φ_2 ver-
änderliches Feld.

¹ Lang, A.: Die Bedeutung und Ermittlung der wirksamen Erregermaschinen-Zeitkonstante bei der selbsttätigen Spannungsregelung von Drehstromgeneratoren. Arch. Elektrotechn. Bd. 33 (1939) S. 306 u. 326.

hierzu oft verlangt, daß bei solchen Stoßbelastungen eine Spannungsabsenkung über 30 bis 40 vH bei den Stromerzeugern nicht eintreten darf. Nimmt man hinzu, daß die Dauer einer solchen Störungsbelastung durch den Überstromschutz oder die Kurzschlußfortschaltung heute kaum mehr als 0,3 bis 0,5 s beträgt, bis die kranke Stelle aus dem Verbundnetz herausgeschaltet ist, so kann nach diesen Bedingungen oder Voraussetzungen die Erregermaschine ausgelegt werden. Dazu kommt aber das weiter unten bei der Wahl der Erregerspannung Gesagte.

Zu diesen Ausführungen über den Einfluß der Erregung auf die Spannungsänderung bei plötzlichen Laststößen zeigt Abb. 90 eine Kennlinienschar aufgebaut auf verschiedenen magnetischen Zeitfestwerten des Erregerkreises. Kennlinie *I* stellt den Spannungsabfall dar,

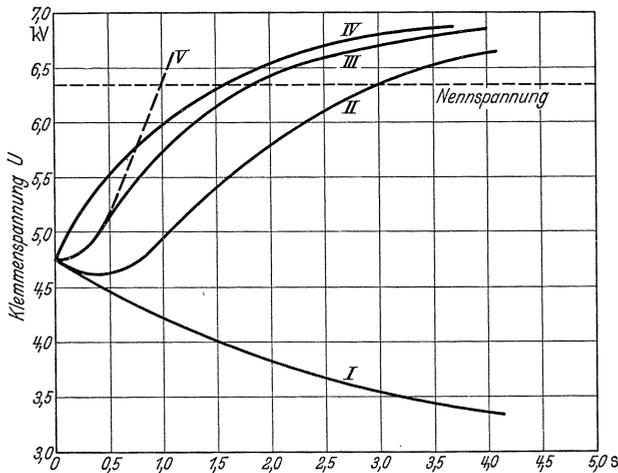


Abb. 90. Spannungsverlauf des Drehstrom-Synchronstromerzeugers nach induktivem Vollaststoß bei verschiedener Erregerspannungsregelung.

I keine Nachregelung, *II* Schnellregler, Zeitfestwert der Erregermaschine 1,5 s, *III* Haupt- und Hilfsrerregermaschine, Schnellregler, Zeitfestwert der Erregermaschine 0,2 s, *IV* Haupt- und Hilfsrerregermaschine, Schnellregler, Zeitfestwert 0 s, *V* Schnellregler, Erregerzusatzspannung, Zeitfestwert 1 s.

wenn die Erregung nicht nachgeregelt wird. Die Klemmenspannung der Maschine sinkt vom Nennwert auf etwa 40 vH in 3 bis 4,5 s. Kennlinie *II* gilt für den Fall, daß ein einfacher Schnellregler vorhanden ist, der die Erregung bei entsprechender Bemessung der Erregermaschine auf etwa 300 Volt = 20 vH Mehrspannung herauftreibt. Bei der magnetischen Trägheit der Erregermaschine, deren Zeitfestwert etwa 1,0 s beträgt, werden etwa 90 vH der Nennspannung in 2 bis 3,5 s erreicht. Für Kennlinie *III* ist vorausgesetzt, daß der Zeitfestwert der Erregermaschine nur 0,25 s beträgt. Die Spannung wird nunmehr bereits in 1 bis 2,5 s erreicht. Zeitfestwerte dieses geringen Ausmaßes können durch die oben genannten Mittel erzielt werden. Kennlinie *IV* zeigt den Spannungsverlauf für den Fall, daß eine genügend hohe Erregerspannung — hier etwa 300 Volt — unmittelbar und augenblicklich zur Verfügung steht, der Zeitfestwert also = 0 s ist. Das kann durch eine Stoß-

erregung herbeigeführt werden (besondere Erregerschaltung, getrennte Erregermaschine, Batterie). Der Gewinn gegenüber Kennlinie *III* ist nicht bedeutend und rechtfertigt daher selten diese Sondermaßnahmen. Schließlich kann noch mit augenblicklicher Übererregung gearbeitet werden, für die Kennlinie *V* gilt. Der Zeitfestwert der Erregermaschine beträgt 1,0 s. Die Maschinenspannung wird sehr energisch gestützt und kann weit über den Nennwert hinaus anwachsen, was mit großen Gefahren verbunden sein kann. Die Erregermaschine mit Hilfserreger muß für diesen Fall sehr groß ausgelegt werden. Ein besonderer Nachteil besteht dann noch darin, daß im Fall eines Kurzschlusses, wie bereits gesagt, die Netzspannung und damit auch die Kurzschlußleistung hochgedrückt werden.

Die Erregermaschine mit Doppelschlußwicklung (Abb. 83), die nach der Eigenart dieser Gleichstromschaltung in der Hauptsache eine gleichbleibende Spannung innerhalb eines bestimmten veränderlichen Belastungsbereiches für die Synchronmaschine liefert, wird heute nur noch für Einzelmaschinen kleiner Leistung zumeist für Industriekraftwerke verwendet, um selbsttätige Spannungsregleinrichtungen zu vermeiden und trotzdem keine ständige Handregelung erforderlich zu machen. Zur Spannungsregelung ist wie bereits mehrfach erwähnt ein Hauptstromregelwiderstand notwendig, der unwirtschaftlich arbeitet. Die Erregermaschine an sich arbeitet auch bei größeren Belastungsstößen auf die Synchronmaschine stabil. Für Maschinen im Verbundbetrieb ist diese Bauform der Erregermaschine nicht brauchbar.

Bei der **Fremderregung** sind zwei grundsätzlich verschiedene Ausführungen zu unterscheiden und zwar: für jede Hauptmaschine ein Erregersatz bestehend aus Gleichstrommaschine und Elektromotor als Antrieb oder ein besonderes Netz mit Gleichstrommaschinensätzen angetrieben durch Wasserturbinen, Dieselmotoren oder dgl. Die erste Form ist eine abgeänderte Eigenerregung, während die zweite Form als Gemeinschafts-Erregeranlage zu bezeichnen ist.

Die Fremderregung durch einen getrennten Erregermaschinensatz für jede Maschine (Erregerumformer) wird stets mit einem Elektromotor als Antriebsmaschine arbeiten. Sie ist vereinzelt neuerdings zur Ausführung gekommen. Der Maschinensatz wird billig durch die freie Wahl der Motordrehzahl, erfordert aber zusätzlichen Platz und besondere Schaltanlagen mit Kabeln und gegebenenfalls Umspannern für Aushilfsanschluß. Dadurch werden die Kosten nicht unerheblich erhöht. Muß mit Störungen der Stromlieferung auf der Antriebsseite gerechnet werden, so muß durch besondere Einrichtungen dafür gesorgt werden, daß die Hauptmaschine nicht in Mitleidenschaft gezogen wird. Die Hauptschaltung muß daher so getroffen werden, daß der Antriebsmotor auch bei Fremdstrombezug nach dem Anlauf durch Umschalten stets vom zugehörigen Stromerzeuger gespeist wird und nur mit diesem zusammen zur Abschaltung kommt. Um bei Spannungsabsenkungen nicht abzufallen, ist der Antriebsmotor entsprechend groß zu bemessen, oder es sind besondere Stabilisierungseinrichtungen z. B. über Stromwandler vorzusehen.

Auch bei der Fremderregung für Stromerzeuger im Verbundbetrieb ist

das hinsichtlich des magnetischen Zeitfestwertes oben Gesagte sinngemäß zu beachten. Bei sehr langsamlaufenden Stromerzeugern (Wasserturbinen-, Gasmaschinenantrieb) kann die angebaute Erregermaschine mit Fremderregung gegenüber der schnelllaufenden Gleichstrommaschine eines Erregerumformers ungünstiger sein, weil letztere einen sehr kleinen Zeitfestwert besitzt, also kürzere Regelzeiten genommen werden können. Es ist demnach bei der Wahl der Erregermaschinenausführung entsprechend vorsichtig vorzugehen, wenn alle erreichbaren Vorteile ausgenutzt werden sollen. Hierzu ist noch das bei den Spannungsreglern Gesagte zu beachten.

Nachteilig bei dieser Form der Erregung ist, daß beim Stillstand der Drehstrommaschine ohne Fremdstromanschluß und bei Störungen in der Fremdstromlieferung ein Anfahren der Hauptmaschine nicht

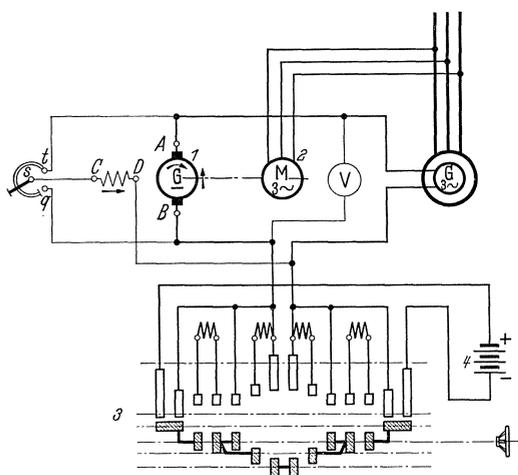


Abb. 91. Erregung durch besonderen Erregerumformer mit Starterbatterie für den Anlauf.
1 Erregermaschine, 2 Antriebsmotor, 3 Schaltwalze, 4 Starterbatterie.

möglich ist, sofern nicht eine besondere Gleichstromquelle in Form einer Batterie oder eines Notstrommaschinensatzes mit Dieselmotorantrieb vorhanden ist, die kurzzeitig die Erregerleistung hergeben können. Eine neuere Schaltung unter Verwendung einer Starterbatterie, ähnlich der Starterbatterie beim Kraftwagen, gibt Bauer¹ an. Der Anlaufvorgang (Abb. 91) spielt sich in der Weise ab, daß bei mit Nennzahl laufender Maschine eine Hilfsstromquelle 4 in den Erregerstromkreis kurzzeitig eingereicht wird. Die sich hierbei einstellende Klemmenspannung der laufenden Maschine läßt auch den Erregerumformer 1, 2, der unmittelbar an die Klemmen der Maschine angeschlossen ist, zum Anlaufen kommen, und die nun ansteigende Erregermaschinenspannung setzt sich zur Spannung der Hilfsstromquelle zu, so daß sich gegenseitig Hauptsatz und Erregersatz rasch auf Spannung bzw. Nennzahl bringen. Ist dieser Zustand erreicht, wird die Batterie mit Schaltwalze 3 über Widerstände herausgeschaltet und die Einschaltstelle überbrückt. Bei Maschinensätzen von etwa 8 bis 10 MVA und Erregerströmen von 400 bis 500 A kann als Hilfsstromquelle eine Starterbatterie verwendet werden, die auch für andere Zwecke des Kraftwerkbetriebes herangezogen werden kann. Bei größeren Maschinensätzen (Abb. 92) wird zweckmäßigerweise statt der Batterie, die zu

¹ Bauer, S.: VDE-Fachberichte Bd. 9 (1937) S. 64. Bauer und M. Tunkel: Erregerumformer an Stelle aufgebauter Erregermaschinen für vertikale Wasserkraftmaschinen. Elektrotech. u. Maschinenb. 1939 Heft 21/22.

große Abmessungen annehmen würde, eine kleine Hilfsmaschine 5 in Sonderschaltung für gleichbleibenden Strom angewendet, die vorübergehend während des Anlaufes mechanisch angetrieben wird. Die Schaltung ist im Grundsatz ähnlich der bei der Verwendung der Starterbatterie.

Bei dieser Art der Fremderregung kann die Erregermaschine so ausgeführt werden, daß sie den genannten Bedingungen für die Spannungsregelung entspricht. Bedenken nach dieser Richtung bestehen also nicht.

Die zweite Form als Gemeinschaftserregung besteht in einer besonderen Gleichstromanlage mit Sammelschienen, an die die Erregungen der Drehstrommaschinen angeschlossen werden. Vorteilhaft ist bei dieser Ausführung, daß

eine unabhängige Gleichstromquelle vorhanden ist, die für alle anderen Zwecke des Kraftwerksbetriebes zur Verfügung steht. Nachteilig ist der zu meist wesentlich höhere Gesamtpreis einschließlich Raumbedarf, Schaltanlage usw. und für die Erregung selbst die Verwendung von Hauptstromreglern, wenn jeder Stromerzeuger für sich regelbar sein soll, was stets gefordert werden sollte. Da diese nur träge arbeiten, ist die Gleichhaltung der Drehstromspannung bei Laststößen, wie überhaupt die Spannungsregelung auf der Drehstromseite nicht in dem gleichen feinstufigen und schnellen Maß möglich

wie bei der Eigenerregung. Bei Störungen in der Gleichstromanlage werden ferner alle Drehstrommaschinen gestört, wogegen auch eine selbsttätig zuschaltbare Batterie kaum genügende Aushilfssicherheit gibt, wenn sie nicht unverhältnismäßig groß gewählt wird. Diese Gemeinschaftserregung wird daher nur selten und dann nur für Industriekraftwerke verwendet.

Abb. 93 und 94 zeigen Schaltbilder für diese Gemeinschaftsanlage und für die Fremderregung von einem Gleichstromnetz. Die Gleichstrommaschinen in Abb. 93 können gleichzeitig zur Ladung der Batterie herangezogen werden. Arbeiten die Nebenbetriebe unruhig, so wird eine Gleichstrommaschine auf die Drehstrommaschinen geschaltet. Sicherungen oder Selbstschalter dürfen in den Erregerstromkreisen nicht vorhanden sein. Die Sicherungen der Nebenbetriebe müssen gegenüber den Sicherungen der Gleichstrommaschinen so abgestuft sein, daß erstere unter allen Umständen früher ansprechen als letztere. Selbst-

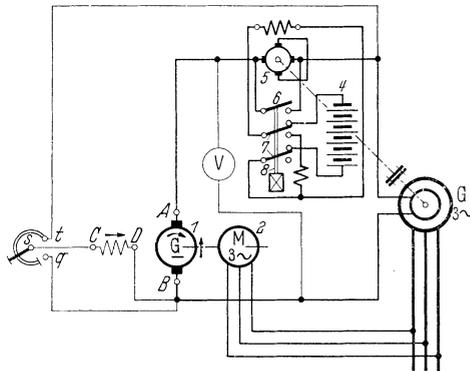


Abb. 92. Erregung durch besonderen Erregerumformer mit Querfeldmaschine für gleichbleibenden Strom.

1 Erregermaschine, 2 Antriebsmotor, 4 Batterie, 5 Hilfsstromerzeuger für gleichbleibenden Strom (Querfeldmaschine), 6 Kurzschließer für Anker des Hilfsstromerzeugers, 7 Umschalter für Erreger des Hilfsstromerzeugers, 8 Abschaltung der Hilfserrregung.

schalter sind in den Gleichstrommaschinenkreisen nicht zu verwenden.

Erregerleistung und Erregerspannung. Für die Bestimmung der

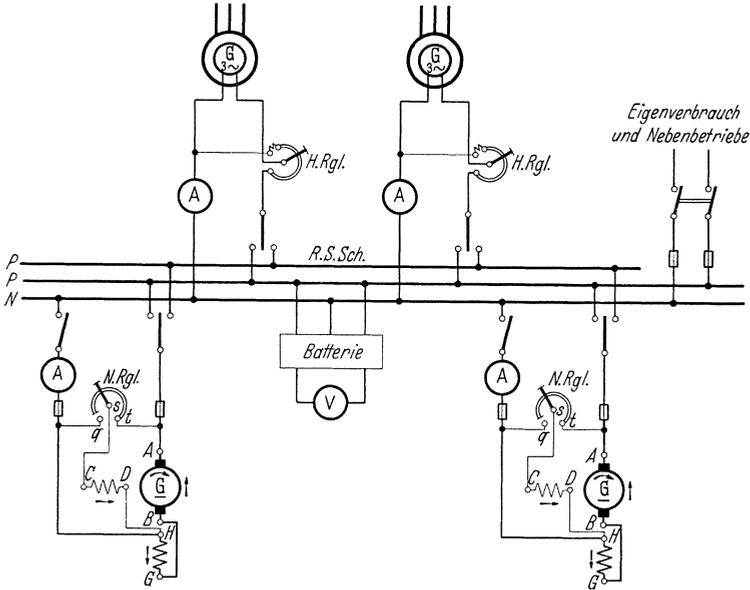


Abb. 93. Kraftwerksschaltung mit selbständigen Gleichstrommaschinensätzen für die Erregung und die Nebenbetriebe (Gemeinschaftserregung).

notwendigen Erregerleistung müssen die Leistungsfaktorschwankungen, die Grenzen für die Spannungsregelung und die gewünschte Überlastung angegeben werden.

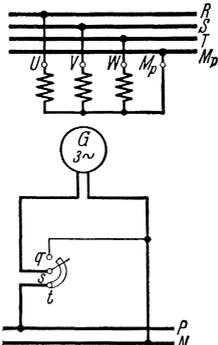


Abb. 94. Synchron-Drehstromerzeuger mit Fremderregung von einem Gleichstromnetz.

Die Erregerspannung ist nicht willkürlich wählbar. Bei kleinen Maschinen bewegt sie sich in Grenzen von 65 bis 110 V, bei großen Stromerzeugern zwischen 110 und 220 V. Ist auf eine vorhandene Gleichstromanlage bestimmter Spannung nicht Rücksicht zu nehmen, was bei Fremderregung der Fall sein muß, dann sollte die Wahl der Erregerspannung dem Maschinenhersteller überlassen bleiben.

Es ist aus den bereits behandelten Stabilitätsgründen zweckmäßig, die Höhe der möglichen Spannung der Erregermaschine so zu wählen, daß ein Überschuß von etwa 40 bis 70 vH gegenüber dem Sollwert bei Nennspannung des Stromerzeugers vorhanden ist. Damit wird gleichzeitig eine Verringerung der Erregerzeit erreicht.

Ein stärkeres Übererregen wie z. B. mit der Stoßerregung erzielt wird, ist wegen der Höhe des Kurzschlußstromes nicht zu empfehlen.

Der Überschuß der Erregermaschinen­spannung über den bei Nennbetrieb erforderlichen Wert wird im ungestörten Betrieb in einem der Feldwicklung vorgeschalteten Widerstand abgedrosselt. Beträgt beispielsweise die höchste Erregerspannung 350 V und die Nennspannung der Erregermaschine 220 V, so sind Feldwicklung und in Reihe geschalteter Widerstand an 350 V anzulegen, wobei die Spannung am Widerstand selbst 130 V beträgt. Ein praktisch verzögerungsfreier Einsatz der Übererregung kann bei sprunghaften Änderungen der Klemmenspannung durch selbsttätig arbeitende, besonders durchgebildete, unmittelbar von der Klemmenspannung der Stromerzeuger beeinflusste Spannungsregler erreicht werden.

h) Die Spannungsregelung im Kraftwerk richtet sich danach, ob nur eine Maschine vorhanden oder im Betrieb ist, ob mehrere Maschinen in einem Kraftwerk parallel arbeiten oder ob mehrere Kraftwerke im Verbundbetrieb liegen. Die Synchronmaschine selbst hat wie bereits gesagt eine Spannungsänderung, die zwischen Vollast und Leerlauf je nach der Höhe der induktiven Belastung bei etwa 20 bis 50 vH liegt. Der Spannungsabfall in den Netzen beträgt je nach ihrer Ausdehnung und Belastung oft mehr als 20 vH. Die Wirk- und Blindleistung wechselt ständig und bei Störungen unter Umständen plötzlich in weiten Grenzen. Um allen diesen Verhältnissen Rechnung zu tragen, wird, wenn die Regelung der Maschinenspannung selbst auf einen gleichbleibenden oder mit der Belastung veränderlichen Wert nicht mehr ausreicht, ein mittlerer zeitlich festgelegter Spannungsfahrplan durch entsprechende Einstellung der Maschinenerregung gefahren und die dann noch erforderliche weitere Spannungsregelung für das Netz durch die Regelung der Umspannerspannung im Kraftwerk oder in den einzelnen Hauptumspannwerken vorgenommen. Unter Umständen ist bei Höchstspannungsnetzen größter Ausdehnung noch die Regelung der Blindstromerzeugung durch Kondensatoren, hochgesättigte bzw. Luftspalt-Drosselspulen oder Synchronmotoren an besonderen Netzstellen mit einzubeziehen.

In dieser Weise kann der Betrieb selbst der größten Kraftübertragungsanlagen so einwandfrei durchgeführt werden, daß die Öffentlichkeit Spannungsschwankungen kaum wahrnimmt.

Für die Regelung der Maschinenspannung werden die Erregerregler wie bei der Gleichstromspannungsregelung entweder von Hand verstellt oder als selbsttätige Regler ausgeführt. Das über die Hand- und Selbstregelung Gesagte gilt sinngemäß auch hier. Abgesehen von kleinen unbedeutenden Einzelwerken werden heute fast durchweg die Synchronmaschinen mit Selbstreglern ausgestattet. Für diese kommen nur die Eil- oder Schnellregler zur Verwendung, die über Meßwandler an die zu regelnde Maschine angeschlossen werden.

Es ist betrieblich unzweckmäßig, bei mehreren Maschinen nur einen umschaltbaren Selbstregler zu verwenden. Jeder Stromerzeuger soll vielmehr für sich allein regelbar sein und somit seinen eigenen Regler erhalten, der für seine Maschinenkennlinie eingestellt wird und daher stets betriebsbereit ist.

Bei der Spannungsregelung der Synchronmaschine liegen die elektrischen Verhältnisse allerdings wesentlich anders als bei der Gleichstrommaschine, denn eine Änderung der Erregung hat hier eine Änderung der Blindstromerzeugung zur Folge. Steigt oder fällt die Netzbelastung, so ändert sich die MVA-Last, also die Wirk- und Blindleistung. Der Wirklaständerung folgt die Synchronmaschine durch den Regler der Antriebsmaschine, der veränderten Blindlast entsprechend muß die Erregung eingestellt werden.

Ist nur ein Stromerzeuger vorhanden oder bei mehreren Maschinen immer nur eine Maschine im Betrieb, so kann ohne Schwierigkeit ein Eil- oder Schnellregler mit astatischer Arbeitsweise zur Aufrechterhaltung gleichbleibender Spannung bei allen Belastungen Verwendung finden. In Abb. 95 und 96 sind die Schaltbilder für diese beiden Selbstregler nach der Ausführung der SSW gezeichnet. In Abb. 95 wirkt der Eilregler auf den Hauptstromregler, in Abb. 96 arbeitet der Schnellregler im Erregerkreis der Erregung.

Soll eine selbsttätige Veränderung der Sammelschienenspannung in Abhängigkeit von der Belastung durch den Regler herbeigeführt werden, so ist ein statischer Regler zu benutzen, oder es wird eine Strombeeinflussung zusätzlich angewendet (Abb. 97, Verbundwirkung der Regelung).

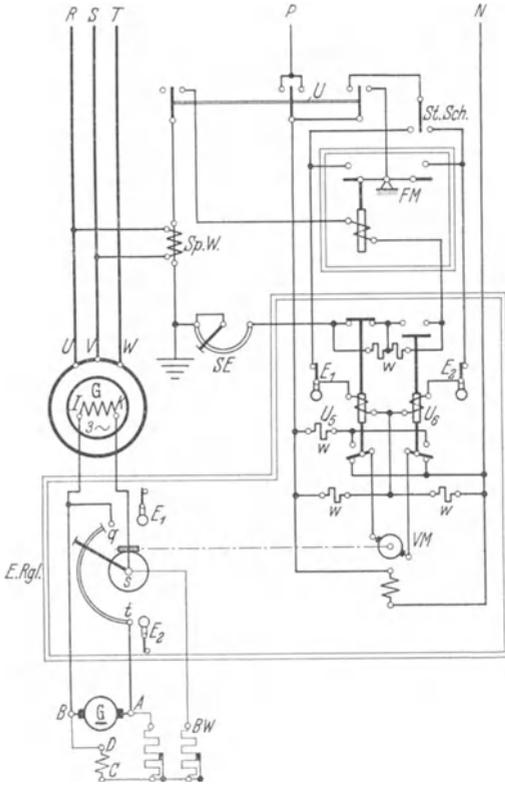


Abb. 95. Spannungsregelung eines einzelnen Drehstrom-Synchronstromerzeugers mit selbsterregter Erregermaschine durch Eilregler im Erregerstromkreis der Synchronmaschine (SSW).

FM Feinststeuermeßwerk, *E. Rgl.* Eilregler, *E₁*, *E₂* Endauswähler, *U_s*, *U_e* Steuerschütze für den *VM*, *St. Sch.* Steuerschalter, *BW* Brückenwiderstand, *VM* Verstellmotor, *SE* Sollwerteinsteiler, *U* Umschalter, *Sp. W.* Spannungswandler, *W* Vor- bzw. Parallelwiderstände.

zu benutzen, oder es wird eine Strombeeinflussung zusätzlich angewendet (Abb. 97, Verbundwirkung der Regelung).

Beim Parallelbetrieb mehrerer Maschinen in einem Kraftwerk ist die selbsttätige Spannungsregelung stets besonders zu untersuchen, da sich Schwierigkeiten ergeben können. Arbeiten die Maschinen unmittelbar auf die Sammelschienen, so haben sie zwangsläufig durch die Verbindung mit diesen gleiche Spannung. Die Änderung der Erregung nur einer der parallel arbeitenden Maschinen

bei fest eingestellten Erregungen der anderen Maschinen hat eine Verschiebung der Blindstromabgabe der zusammenarbeitenden Maschinen gegenüber einem vor der Regelung bestandenen Zustand zur Folge. Ist die Erregung der geregelten Maschine verstärkt worden, so gibt diese Maschine den größeren Anteil des Netzblindstromes ab, entlastet entsprechend die anderen Maschinen, arbeitet also mit schlechterem Leistungsfaktor und kann unter Umständen überlastet werden. Bei Änderung der Erregung im anderen Sinn tritt das Umgekehrte ein. Der Regler kann astatistisch arbeiten. Da stets alle Maschinen ferner mit eigener Handregelung zu versehen sind, ist ein solcher Betrieb bei kleinen Kraftwerken an sich möglich. Die nicht selbsttätig geregelten Maschinen werden dann auf mittlere Strom- und Leistungsfaktorverhältnisse fest eingestellt und die geregelte Maschine übernimmt die Spannungshaltung. Es bedarf dabei zeitweiser Überprüfung der einzelnen Maschinenbelastungen und einer Nachstellung

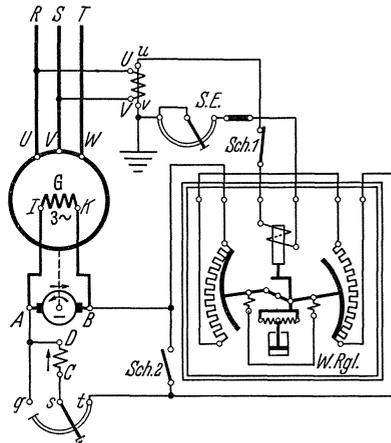


Abb. 96. Spannungsregelung eines einzelnen Drehstrom-Synchronstromerzeugers mit selbst-erregter Erregermaschine (Eigenerregung) durch Schnellregler im Erregerstromkreis der Erregermaschine (SSW).

W.Rgl. Wälzregler, S.E. Sollwertesteller, Sch. 1, 2 einpolige Schalter.

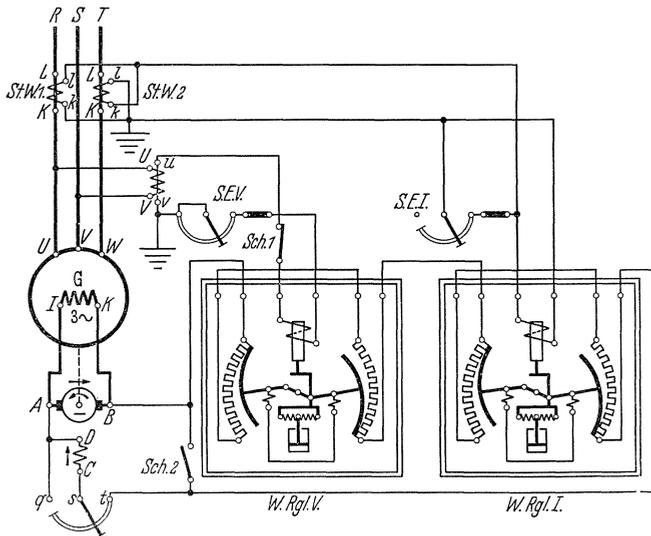


Abb. 97. Strom- und Spannungsregelung eines einzelnen Drehstrom-Synchronstromerzeugers durch Schnellregler (SSW-Wälzregler).

W.Rgl. V. Wälzregler für Spannungsregelung, W. Rgl. I. Wälzregler für Stromregelung, St.W. Stromwandler, S.E. V. Sollwertesteller für Spannungsregelung, S.E. I. Sollwertesteller für Stromregelung, Sch. 1, 2 einpolige Schalter, St.W. Stromwandler.

der einzelnen Regler, um die Belastung auf alle Maschinen möglichst gleichmäßig zu verteilen. Diese Form der Regelung ist anwendbar, wenn keine größeren Blindlastschwankungen zu erwarten sind, als die geregelte Maschine decken kann.

In größeren Kraftwerken dagegen wird die Regelung nur einer Maschine zumeist nicht angewendet, sondern es erhalten sämtliche Maschinen ihre eigenen Regler, die dann aber nicht mehr astatisch, sondern nur statisch arbeiten dürfen. Sie werden mit einer zusätzlichen Strombeeinflussung versehen und so geschaltet, daß die bei der Regelung auftretenden Ausgleichströme die Regler entsprechend

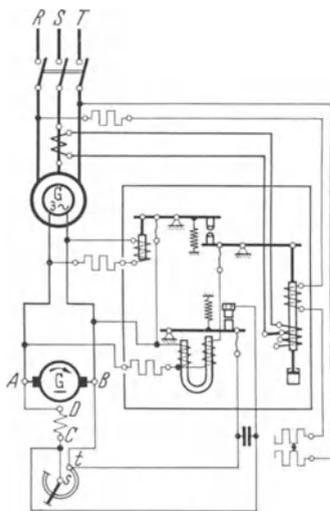


Abb. 98. Spannungsregelung für Drehstrom-Synchronstromerzeuger im Parallelbetrieb durch Schnellregler im Nebenschluß zur Erregermaschine (AEG-Tirillregler).

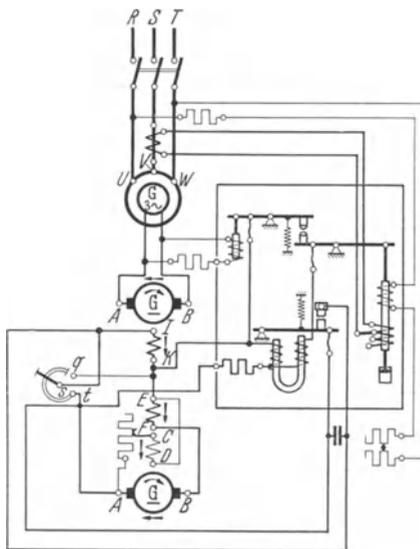


Abb. 99. Spannungsregelung für Drehstrom-Synchronstromerzeuger im Parallelbetrieb durch Schnellregler bei Erregung durch Haupt- und Hilfserregermaschine (AEG-Tirillregler).

beeinflussen, damit stets die geregelten Maschinen sämtlich an der Blindlastlieferung oder Blindlastverschiebung verhältnismäßig beteiligt sind.

Abb. 98 zeigt das Schaltbild des AEG-Tirill-Reglers¹ für parallel arbeitende Drehstrommaschinen bei Regelung im Nebenschluß der Erregermaschine und Abb. 99 die Regelung bei der Erregung durch Haupt- und Hilfserregermaschine. Bei dieser Schaltung ist allerdings zu beachten, daß zwei magnetische Kreise in der Regelung liegen. Dementsprechend müssen die Regler besonders schnell arbeiten, um die höchste Regelgeschwindigkeit zur Aufrechterhaltung gleichbleibender Spannung auch bei großen Laststößen auf die Maschinen zu erreichen.

Bei der Kurzschlusskupplung „Maschine — Umspanner“ sind besondere Untersuchungen über die zweckmäßigste Schaltung für die Regelung

¹ AEG-Mitt. 1937 Heft 11 S. 417.

zu treffen, da hier die Spannungsänderung des Umspanners hinzukommt.

Die Einstellung der Statik der einzelnen Regler kann nach besonderen Wünschen des Betriebes etwa derart erfolgen, daß alle Maschinen praktisch mit gleichem $\cos \varphi$ arbeiten, oder daß einzelne Maschinen mehr oder weniger zur Blindlastlieferung herangezogen werden, sofern das mit Rücksicht auf die Leistungsfähigkeit der einzelnen Maschinen erwünscht ist. Gegebenenfalls kann auch eine Maschine mit einem astatischen und die übrigen Maschinen mit statischen Reglern versehen werden. Das wird der Fall sein, wenn die astatisch geregelte Maschine als Phasenschieber laufen soll, während die übrigen Maschinen mit unverändertem Leistungsfaktor arbeiten.

Die Bedingungen, die an die Arbeitsweise der Selbstregler zu stellen sind, sind die gleichen wie sie auf S. 18 bereits angegeben wurden. Da die Erregermaschinen stabil arbeiten müssen, ist das gleiche auch für die Regler hinsichtlich der stabilen Blindleistungsverteilung zu verlangen und zwar ganz unabhängig von der Belastung der Maschine. Soll dabei der Spannungsabfall, der mit zunehmendem induktiven Blindstrom auftritt (etwa 3 bis 5 vH), ebenfalls ausgeregelt werden, dann ist eine Verbundwirkung anzuwenden. Da in größeren Kraftwerken die Einhaltung eines bestimmten Tages = Spannungsfahrplanes notwendig ist, müssen die Selbstregler eine Zusatzvorrichtung besitzen, die die vom Regler gehaltene Spannung verändern läßt, ohne daß der Regler selbst in seiner Einstellung zu ändern ist.

Der Vollständigkeit wegen ist zu erwähnen, daß die Selbstregler auch zur Regelung eines gleichbleibenden Leistungsfaktors unabhängig von der Spannung z. B. für Synchronmotoren als Leistungsfaktorregler und ferner als Stromregler d. h. als MVA-Regler bei annähernd gleichbleibender Spannung geschaltet werden können.

Die elektrischen Eil- und Schnellregler sind in ihrer Verwendung durch die Verstellkraft begrenzt, die sie für den Erregerregler aufzubringen haben. Wird diese infolge der Größe des Erregerreglers zu groß, was bei den Eigenerregermaschinen für langsam laufende Wasserkraftstromerzeuger schon bald der Fall ist, dann muß der mechanische Schnellregler zur Anwendung kommen. Nach dieser Richtung ist auch die Eigen- oder die Fremderregung der Synchronmaschinen mit Erregerumformer zu untersuchen, wobei wie bereits gesagt die Gleichstrommaschine des Erregerumformers den Vorteil des kleinen magnetischen Zeitfestwertes besitzt.

Besonders eingeführt hat sich für solche mechanischen Schnellregler der selbsttätige elektrische N. u. K.-Schnellregler (Neuhaus und Kuhnke GmbH., Kiel) nach folgendem grundsätzlichen Aufbau (Abb. 100). Die Steuerung dieses Reglers erfolgt über einen Elektromagneten, der in Abb. 100 an der zu regelnden Spannung liegt oder bei anderen zu regelnden Betriebsgrößen entsprechend zu schalten ist. Der Anker dieses Magneten ist mit dem Steuerschieber eines Steuerventils verbunden, das die Reglerwelle eines Flüssigkeits-Servomotors verstellt. Als Steuerkraft für den Servomotor dient Drucköl von einer besonderen Ölpumpe. Der

Servomotor arbeitet über eine Kettenübertragung auf den Erregerregler. Sinkt bei der Schaltung nach Abb. 100 die Spannung der Synchronmaschine, so bewegt sich der Anker des Magneten nach unten, verstellt dadurch den Steuerschieber für den Durchfluß des Drucköls zum Servomotor in dem Sinn, daß der Magnetregler auf Mehrspannung bewegt wird und umgekehrt.

Dieser Flüssigkeits-Servomotor gibt die Möglichkeit, die Steuerkraft der Steuereinrichtung beliebig zu vergrößern, ohne daß die Regelvorrichtung unzulässig träge Massen erhält. Regelgenauigkeit mit besonderer Begrenzung des Überregeln und Regelgeschwindigkeit sind verhältnismäßig hoch. Die sonstigen an den Regler zu stellenden Bedingungen werden ebenfalls erfüllt. Sie bedürfen aber besonderer Überprüfung für die Erregung von Stromerzeugern, die im Verbundbetrieb liegen.

Der Eigenverbrauch der Steuereinrichtung ist klein. Die Zahnradölpumpe läuft im allgemeinen unbelastet, solange der Stromerzeuger im Betrieb ist, und wird nur bei Regelbewegungen mit vollem Öldruck belastet. Der Antrieb der Ölpumpe erfolgt in ähnlicher Weise wie der einer getrennten Erregermaschine entweder über Riemen, Reibkuppung und dergleichen oder durch einen Elektromotor, der an der Eigenbedarfsanlage liegt.

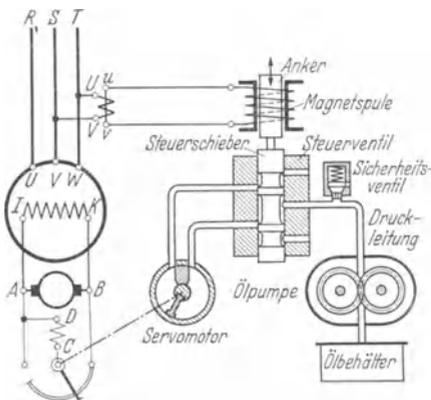


Abb. 100. Spannungsregelung eines Drehstrom-Synchronstromerzeugers mit Eigenerregermaschine durch mechanischen Schnellregler (N. u. K.-Thomaregler).

Der Betrieb mit diesem Regler hat sich bewährt. Auf weitere Einzelheiten einzugehen erscheint nicht erforderlich.

i) Die Betriebskennlinien. Abb. 101 zeigt die hauptsächlichsten Betriebskennlinien eines Drehstromerzeugers. Zu der Leerlaufkennlinie ist noch die Kurzschlußkennlinie gezeichnet, aus der festgestellt werden kann, welcher Strom in den einzelnen Phasen fließt, wenn dieselben durch Strommesser von gleichem inneren Widerstand kurzgeschlossen sind, und die Erregung bei unveränderter Drehzahl der Maschine geändert wird. Aus dem Verlauf dieser Kennlinie können indessen keine Schlüsse daraufhin gezogen werden, welcher Kurzschlußstrom auftritt, wenn die Maschine plötzlich bei voller Erregung kurzgeschlossen wird. Hierfür ist das im 13. Kap. Gesagte zu beachten.

Die Kennlinien für die Spannungsänderung sind in Abb. 101 entgegen der Darstellung bei den Gleichstrommaschinen ausgehend von der Klemmenspannung bei Vollast gezeichnet und zwar bei den Leistungsfaktoren $\cos \varphi = 1$ und $0,8$ nachteilend. Das letztere gilt auch für die Wirkungsgradkennlinien.

5. Der mechanische Aufbau der Stromerzeuger.

a) **Einleitung.** Es kann nicht Aufgabe dieses Kapitels sein, bautechnische Berechnungen und bauliche Durchbildungen zu behandeln. Nur einen kurzen Überblick wird das Folgende über den Aufbau der Stromerzeuger geben, soweit das für die Ausfertigung einer Anfrage, die Beurteilung des Angebotes und die Kenntnis betriebswichtiger Teile erforderlich ist. Neben den Bau- und Betriebsbedingungen in mechanischer Beziehung steht an erster Stelle die Lebensdauer¹ der Maschine also der innere Aufbau. Der Betriebsingenieur soll daher ferner nach dieser Richtung unterstützend in den Stand gesetzt werden,

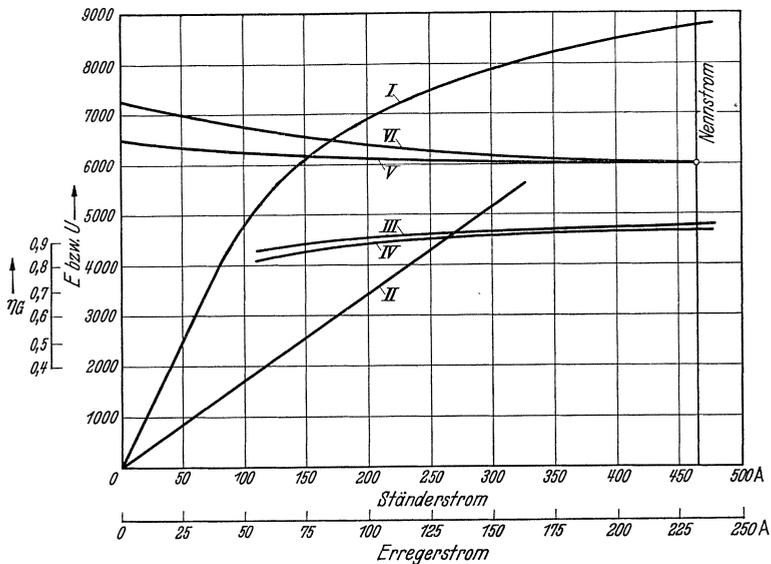


Abb. 101. Betriebskennlinien für einen Drehstrom-Synchronstromerzeuger.

I Leerlaufkennlinie, II Kurzschlußkennlinie, III Wirkungsgrad bei $\cos \varphi = 1$, IV Wirkungsgrad bei $\cos \varphi = 0,8$, V Spannungsänderung bei $\cos \varphi = 1$, VI Spannungsänderung bei $\cos \varphi = 0,8$.

gemachte Beobachtungen weiter zu verwerten und besondere Bau-einzelheiten leichter überprüfen zu können.

Sehr wesentlich ist die Vorbearbeitung der Ausschreibungsunterlagen für eine größere Maschine auch in mechanischer Beziehung.

Bekannt müssen zu den elektrischen Daten für Rechnung und Entwurf der Maschine sein:

¹ Braun: Schadenquellen in Turbogeneratoren, Maßnahmen zur Verhinderung von Schäden im Betrieb und bei Ausführung von Reparaturen. Vortrag auf der 2. Betriebsleitertagung 1937, veranstaltet von der Allianz und Stuttgarter Verein. Vers.-AG. Abt. f. Maschinenversicherung. Schwenkhagen, Dr.-Ing.: Spannungsprüfung an gebrauchten und reparierten elektrischen Maschinen und Transformatoren. Der Maschinenmarkt 1934, Sonderheft Oktober.

die Antriebsmaschine und die Drehzahl,
 Vorschriften über Gewichts- und Abmessungsbeschränkungen für das Heranbringen zur Baustelle und für den Einbau,
 besondere Wünsche hinsichtlich Geräuschbelästigung,
 Einzelheiten über die Lage und grundsätzliche Ausführung des Kraftwerkes,

die Beschaffenheit und die Temperaturverhältnisse der umgebenden Luft zu verschiedenen Jahreszeiten.

Daß für deutsche Verhältnisse die REM vorgeschrieben werden, ist selbstverständlich.

Über die Art und Ausführung der Antriebsmaschinen ist im Band III/1 alles Wissenswerte gesagt. Dem Entwurfsingenieur des Stromerzeugers muß eine Bauzeichnung und Einzelheiten der Antriebsmaschine mit der Anfrage zugestellt werden, damit er darüber unterrichtet ist, wie die Maschine anzubauen ist, welche Lager und in welcher Ausführung zur Übereinstimmung mit den Antriebsmaschinenlagern er mitanbieten soll, ob besondere Vorschriften nach dieser Richtung (gemeinschaftliche Ölbelieferung, Wasserkühlung, zusätzliche Belastungen) und hinsichtlich der Fundierung gemacht werden. Das ist weiter auch für die Ermittlung der Einbaukosten erforderlich. Bei Kolbenmaschinen- und Wasserturbinenantrieb kommt dazu die Angabe des in der Maschine unterzubringenden Schwungmomentes. Da der Zusammenbau mit Wasserturbinen eine Reihe besonderer Ausführungsformen zuläßt, wird hierauf besonders eingegangen werden.

b) Die Drehzahl ist für die Synchronmaschinen in den REM nach den in Zahlentafel 8 zusammengestellten Werten genormt. Aus der durch die Antriebsmaschine bestimmten Drehzahl und der verlangten

Frequenz ergibt sich die Polpaarzahl der Maschine zu:

Zahlentafel 8. Genormte Drehzahlen und Synchron-Drehzahlen in U/min für Wechselstrommaschinen von 50 Per/s.

$$p = \frac{60 \cdot f}{n}. \quad (44)$$

Polzahl	Drehzahl	Polzahl	Drehzahl
2	3000	28	214
4	1500	32	188
6	1000	36	167
8	750	40	150
10	600	48	125
12	500	56	107
16	375	64	94
20	300	72	83
24	250	80	75

Bei Dampfturbinen, Diesel- und Gasmotoren steigt die Drehzahl bei plötzlicher Entlastung um wenige Prozent und zwar höchstens um etwa 15 vH, während bei Wasserturbinen diese Drehzahlerhöhung bis auf den zweifachen Wert der Nenn-drehzahl und darüber möglich ist. Die Sicherheitsvorrichtungen (Schnellschlußventil) bei Dampfturbinen arbeiten heute derart zuverlässig, daß ein Durchgehen bei dieser Maschi-nengattung kaum noch vor-kommt. Es ist aber trotzdem not-

Für Gleichstrommaschinen gelten so- weit als möglich die gleichen Drehzahlen. Die eingeklammerten Werte sollen mög- lichst vermieden werden.

wendig, daß der Läufer für eine Drehzahlerhöhung von 25 vH mechanisch gebaut sein muß. Bei Wasserturbinenantrieb wird der Läufer für eine plötzliche vorübergehende Drehzahlsteigerung bis zum 1,8- oder 2fachen Wert der Nenndrehzahl bemessen. Es ist zu fordern, daß der Läufer im Herstellerwerk entsprechend geprüft (geschleudert) wird. Die REM schreiben die Schleuderprobe, vor: Die Zahlentafel 9 enthält die Schleuderdrehzahlen für die Schleuderprobe; diese Drehzahlen sollen während 2 min aufrechterhalten werden. Die Schleuderprobe gilt als bestanden, wenn sich keine schädlichen Formänderungen zeigen und die Spannungsprobe nachträglich ausgehalten wird.

Zahlentafel 9. Schleuderdrehzahlen.

Reihe	Maschinengattung	Schleuderdrehzahl
1	Stromerzeuger außer Reihe 2 und 3	1,2 × Nenndrehzahl
2	Stromerzeuger für Wasserturbinenantrieb	1,8 × Nenndrehzahl
3	Stromerzeuger für Dampfturbinenantrieb	1,25 × Nenndrehzahl

Das Dampfschnellschlußventil bei Dampfturbinen muß bei +10 vH Überschreitung der Nenndrehzahl ansprechen.

Sind keine besondere Vorrichtungen zur Beeinflussung der Erregung bei Drehzahlerhöhung vorhanden, ist ferner zu verlangen, daß die bei der Drehzahlsteigerung und Eigenerregung hervorgerufene Spannungserhöhung von der Wicklungsisolierung des Ständers anstandslos ausgehalten wird.

Bei Fallhöhenchwankungen in sehr weiten Grenzen, wie sie bei Talsperrenausnutzung vorkommen, ist es mit Rücksicht auf die Beaufschlagung der Turbinen, sofern stets die gleiche Stromerzeugerleistung verlangt wird, unter Umständen notwendig, mit zwei Drehzahlen zu fahren, um betrieblich und wirtschaftlich befriedigende Verhältnisse zu erhalten. Da die Drehzahl der Synchronmaschine an die Polzahl und Frequenz gebunden ist, lassen sich die verlangten zwei Drehzahlen entweder nur in der Form erreichen, daß zwei Synchronmaschinen gleicher Leistung, aber verschiedener Drehzahlen äußerlich zu einer Maschine zusammengebaut verwendet werden, oder der Läufer und Ständer der Synchronmaschine bei entsprechender Wicklungsgestaltung polumschaltbar gemacht werden. Zu diesem Zweck muß der Läufer die Gestalt des Trommelläufers des Turbostromerzeugers — allerdings geschichtet — erhalten, also keine ausgeprägten Pole, sondern verteilte Wicklung in Nuten. Eine solche Maschine wird als synchronisierte Asynchronmaschine bezeichnet, da sie in ihrem Aufbau der Asynchronmaschine entspricht. Die Erregung erfolgt wie bei der einfachen Synchronmaschine. Zwei solche Maschinen für eine Leistung von je rd. 20 MVA sind erstmalig von SSW im Bau für das Pumpspeicherkraftwerk der zweiten Saalealsperre bei Hohenwarte in Thüringen.

Es ist insbesondere wirtschaftlich zu untersuchen, welche der beiden Ausführungsmöglichkeiten die vorteilhaftere ist, da die synchronisierte Asynchronmaschine einen um etwa 1,4 bis 1,8 vH schlechteren Wir-

kungsgrad hat als die Synchronmaschine. Zu berücksichtigen sind für solche Untersuchungen die jährliche Betriebszeit, die bei Talsperrenausnutzung wesentlich geringer ist als bei allen anderen Kraftwerken, ferner die Verluste, die auf die Wasserausnutzung zu beziehen sind und dann der Kapitaldienst für die unterschiedlichen Anlagekosten.

Gleiche Ausführungen der Synchronmaschinen in ihrer Betriebsweise als Motoren zum Antrieb der Speicherpumpen für solche Talsperrenausnutzung, die auf stark unterschiedliche Druckhöhen fördern müssen, werden erforderlich, da auch die Pumpen mit mindestens zwei Drehzahlen betrieben werden müssen. Für die erste Saaletalsperre am Bleiloch ist die Ausführung mit zwei getrennten Synchronmaschinen gewählt worden. Mit Rücksicht auf die Pumpenleistung hat die eine Maschine eine Leistung von 25 MVA bei $n = 176,5$ U/min und die zweite 12500 MVA bei $n = 150$ U/min. Die Umschaltung erfolgt im Stillstand des Maschinensatzes¹.

c) Gewichte und Abmessungen erfordern für die Bearbeitung des Angebotes dann besondere Angaben des Bestellers, wenn sie aus den Anfuhr-, Einbringungs- und Bauverhältnissen des Kraftwerkes bedingt sind. Hierher gehört von vornherein die Beurteilung der Anfuhrstrecken auf der Eisenbahn, dem Land- oder Wasserweg so z. B. Raumbegrenzungsvorschriften der Strecken, Brücken, Durchlässe, Straßenkrümmungen, dann Streckenbelastungen, Beschaffenheit der Straßen, Steigungsverhältnisse, Fortbewegungsmöglichkeiten auf Landwegen, Anschlußgleis mit den Entlademöglichkeiten. Für das Abladen und den Einbau neuer Maschinen in ein vorhandenes Kraftwerk sind die Unterbringungsplätze für die Einzelstücke und die Belastungsfähigkeit der Maschinenhauskräne zu beachten. Aus den Bauverhältnissen des Kraftwerkes ist die Bodenbeschaffenheit für die Fundamente bestimmend. Hat letztere auf das Gesamtgewicht der Maschine und damit auf die Einzelleistung Einfluß, so sind die anderen Punkte wesentlich für die Stückgewichte und Abmessungen der Einzelteile. Die Ausschreibungsunterlagen müssen über alles dieses genaueste Angaben enthalten, da sie den Preis und das Gesamtgewicht der Maschine, die Gebäude- und Fundierungskosten, sowie die Fracht- und Einbaukosten wesentlich beeinflussen.

Die Hauptabmessungen der Maschine sind für den Platzbedarf und damit für die Kraftwerksbaukosten mit bestimmend. Es ist stets die Raumbeanspruchung des vollständigen Maschinensatzes zu ermitteln und zeichnerisch festzustellen. Daraus ergeben sich die Fundamentgrundfläche, die Fundamentabmessungen, die Breite und Länge des Maschinenhauses, die Kranabmessungen und die Höhe des Maschinenraumes. Über die Längs- oder Queraufstellung von Dampfturbostromerzeuger, die Aufstellung von Diesel- und Gasmaschinensätzen, den Einbau und Platzbedarf von Wasserkraftmaschinensätzen ist im Band III/1 bereits ausführlich gesprochen worden. Zu letzteren mit

¹ Der Verfasser: Die Saaletalsperre. ETZ 1930 S. 1477. — Der maschinentechnische Ausbau des Kraftwerkes der Bleiloch-Saaletalsperre. BBC-Nachr. 1931 Heft 2; ferner ETZ 1933 Heft 28 und 29.

liegender oder stehender Welle wird im folgenden noch besonders Stellung genommen werden.

Wesentlich bei größeren Maschinen ist dabei die aus der Bauart geforderte Kühlung oder Lüftung der Maschinen. Sie kann besonders bei Wasserkraftanlagen zu oft recht erheblichen Schwierigkeiten für die Durchbildung des Maschinenhausfundamentes und zu bedeutenden Mehrkosten führen und ist daher schon mit dem ersten Entwurf in allen Stücken zu klären.

Für vorbereitende Maschinenraumuntersuchungen sind in Zahlen-
tafel 10 und 11 die Hauptabmessungen von Drehstrom-Synchronstrom-
erzeugern für Leistungen bis 6,4 MVA bei verschiedenen Drehzahlen
mit liegender und stehender Welle zusammengestellt¹.

d) Einzelheiten über die Lage und grundsätzliche Ausführung des Kraftwerkes dienen zur Klärung der Einbauverhältnisse, der Aufstellung des Bauzeitplanes, der Unterbringung des Richtmeisters und der Hilfsarbeiter, der Verwendung besonderer Hilfswerkzeuge für den Einbau, ferner der Beurteilung der Betriebsforderungen an sich. Die REM gelten unter der Voraussetzung, daß der Aufstellungsort der Maschine nicht höher als 1000 m über N. N. liegt. Anderenfalls sind besondere Vereinbarungen zu treffen.

Hierher gehören auch Angaben über die Beschaffenheit der umgebenden Luft nach Reinheitsgrad, Temperaturen, Feuchtigkeitsgrad, über die besonders gesprochen werden wird. Der Luftfeuchtigkeitsgrad z. B. bei einem Wasserkraftwerk in enger Schlucht ist nicht zu vergessen.

Muß im Sommer mit besonders hohen Lufttemperaturen gerechnet werden, so kann das die Belastungsfähigkeit der Maschine beeinträchtigen, wenn darauf nicht schon bei der Maschinenberechnung entsprechend Rücksicht genommen und gegebenenfalls eine besondere Luftkühlung vorgesehen wird.

Bei höherem Aufstellungsort als 1000 m über N. N. verringern sich Isolationsfestigkeit und Wärmeabgabe. Nach den REM beziehen sich die Prüfbestimmungen und die Grenzerwärmungen der Wicklungen, des Eisens usw. auf eine mittlere Raum- oder Kühlmitteltemperatur von 35^o.

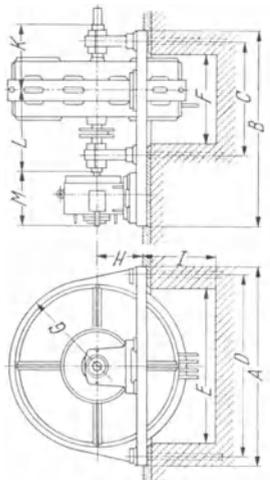
e) Die Geräuschbildung². Ganz allgemein ist darauf hinzuweisen, daß die Stromerzeuger nicht immer völlig geräuschlos laufen. Muß das Kraftwerk in bewohnter Gegend errichtet werden, was bei Gleichstrom fast stets der Fall ist, so ist es unter Umständen erforderlich, hinsichtlich des geräuschlosen Ganges besondere Vorschriften zu machen. Auch betrieblich beeinträchtigt starkes Maschinengeräusch die Verständigung unter der Schalt- und Maschinenbedienung, kann sogar Schallmelde-einrichtungen (Hupen, Glocken) unwirksam und jedes Ferngespräch selbst in benachbarten Räumen oder Fernsprechzellen unmöglich machen.

¹ Die Zahlentafeln sind dem Verfasser von den Siemens-Schuckert-Werken zur Verfügung gestellt worden.

² Lübbcke, E.: Geräuschbekämpfung bei elektrischen Maschinen und Geräten. ETZ 1938 Heft 29 S. 765.

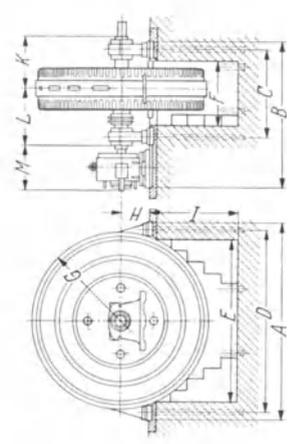
Zahlentafel 10. Drehstrom-Synchron-Stromerzeuger zum Antrieb durch Wasserturbinen mit liegender Welle¹.

Drehzahl U/min	Lei- stung kVA	Span- nung kV	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M
1000	225	0,23...6	1590	2100	1450	1400	1160	1150	1250	360	800	760	930	590
1000	360	0,4...6	1690	2250	1510	1500	1260	1190	1350	360	900	790	960	590
1000	560	0,5...6	1840	2350	1600	1650	1410	1280	1500	360	900	865	1035	620
1000	900	1...6	2190	2500	1660	2000	1760	1340	1850	360	1000	895	1045	665
1000	1400	1...6	2400	2950	2100	2180	1900	1660	2000	360	1050	1160	1260	695
750	225	0,23...6	1640	2100	1410	1450	1210	1090	1300	360	800	740	910	620
750	360	0,4...6	1840	2200	1440	1650	1410	1120	1500	360	900	785	935	620
750	560	0,5...6	1990	2300	1510	1800	1560	1185	1650	360	900	820	970	665
750	900	1...6	2190	2500	1570	2000	1760	1230	1850	360	1000	870	1010	775
750	1800	3...6	2600	2850	1800	2380	2100	1430	2200	360	1250	970	1170	885
500	225	0,23...6	1840	2225	1370	1650	1410	1050	1500	360	900	730	900	775
500	360	0,4...6	2040	2350	1400	1850	1610	1080	1700	360	950	765	915	815
500	560	0,5...6	2350	2450	1510	2130	1850	1190	1950	360	1075	805	1005	815
500	900	1...6	2600	2575	1590	2380	2100	1250	2200	400	1150	855	1055	825
500	1800	3...6	3040	2820	1730	2770	2460	1370	2550	450	1300	970	1120	940
500	2800	3...6	3340	3050	1870	3120	2810	1495	2900	450	1400	1065	1215	1000
500	4500	3...6	3790	3200	1960	3490	3170	1565	3250	450	1500	1120	1270	1000
375	225	0,23...6	2140	2250	1370	1920	1650	1050	1800	400	1000	725	945	780
375	360	0,4...6	2290	2380	1380	2070	1790	1050	1950	400	1000	740	960	860
375	560	0,5...6	2600	2400	1490	2380	2110	1150	2200	450	1100	800	1000	825
375	900	1...6	2940	2500	1590	2680	2360	1230	2500	450	1300	890	1040	940
375	1800	3...6	3340	2800	1710	3080	2720	1350	2900	560	1400	960	1110	980
375	3600	3...6	3940	3000	1950	3640	3320	1550	3400	560	1550	1160	1210	880
375	5600	3...6	4440	3200	2050	4100	3820	1610	3800	560	1750	1270	1320	945
250	200	0,23...6	2490	2300	1300	2270	1980	975	2150	450	1050	715	885	905
250	400	0,4...6	2940	2530	1460	2680	2350	1120	2500	450	1250	810	980	950
250	800	1...6	3340	2650	1550	3080	2660	1190	2900	560	1440	880	1030	965
250	1600	3...6	3940	2750	1720	3640	3260	1335	3400	560	1600	1010	1110	895
250	3200	3...6	4840	3150	1940	4500	4080	1480	4100	600	1950	1170	1220	965
250	5000	3...6	5540	3400	2090	5200	4780	1550	4600	600	2200	1270	1320	1035
250	6400	3...6	5740	3600	2130	5400	4980	1575	4800	600	2300	1300	1350	1085



Geschützte Ausführung.

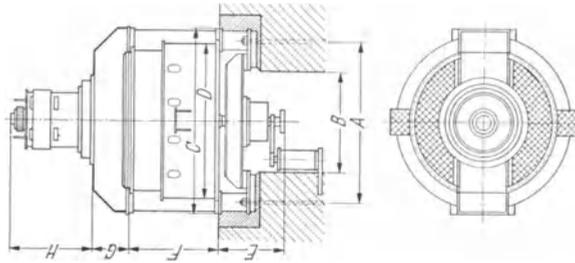
¹ Alle Maße in mm.



Offene Ausführung.

Zahlentafel II. Drehstrom-Synchron-Stromerzeuger zum Antrieb durch Wasserturbinen mit stehender Welle.

Drehzahl U/min	Leistung KVA	Spannung KV	Bild	A	B	C	D	E	F	G	H
1000	225	0,23...6	links	1150	700	1400	1300	550	730	330	700
1000	360	0,4...6	"	1250	770	1500	1400	550	790	330	700
1000	560	0,5...6	"	1400	850	1650	1550	550	850	330	700
1000	1000	1...6	"	1550	900	1850	1750	550	910	330	700
1000	1400	1...6	"	1750	1000	2050	1950	550	980	330	700
750	225	0,23...6	"	1300	770	1550	1400	550	740	330	700
750	450	0,4...6	"	1550	850	1800	1650	550	800	330	700
750	900	1...6	"	1650	1000	1950	1850	550	865	360	700
750	1400	1...6	"	1750	1120	2200	2100	550	930	410	750
750	1800	3...6	"	1850	1150	2300	2200	550	980	430	750
500	225	0,23...6	"	1300	900	1750	1600	550	700	330	1200
500	450	0,4...6	"	1550	1050	2000	1850	575	780	330	1200
500	900	1...6	"	1900	1200	2400	2300	670	870	380	1300
500	1400	1...6	"	2100	1400	2600	2500	735	930	410	1300
500	1800	3...6	"	2200	1500	2700	2600	770	960	460	1400
500	2800	3...6	rechts	2450	1700	3000	2900	840	1080	530	1450
500	4500	3...6	"	2750	1900	3300	3200	925	1150	620	1600
375	140	0,23...3	links	1400	950	1850	1700	550	640	330	1200
375	280	0,23...6	"	1600	1100	2050	1900	575	700	330	1200
375	560	0,5...6	"	1900	1300	2400	2300	670	780	410	1300
375	900	1...6	"	2200	1500	2700	2600	735	840	430	1400
375	1800	3...6	"	2500	1800	3100	3000	840	960	500	1500
375	2800	3...6	rechts	2800	2000	3400	3300	925	1040	580	1600
375	4500	3...6	"	3150	2200	3700	3600	1000	1120	630	1600
375	5600	3...6	"	3300	2300	3900	3800	1050	1150	680	1700
250	125	0,23...3	links	1650	1150	2200	2000	570	620	330	1200
250	250	0,23...6	"	1950	1400	2550	2350	600	670	330	1300
250	500	0,5...6	"	2300	1700	2900	2700	670	730	390	1450
250	1000	1...6	rechts	2700	2000	3350	3200	770	800	480	1500
250	2000	3...6	"	3150	2300	3850	3700	880	880	630	1550
250	3200	3...6	"	3600	2700	4300	4200	970	980	680	1600
250	5000	3...6	"	4050	3200	4750	4650	1070	1050	630	1650
250	6400	3...6	"	4250	3400	5000	4900	1120	1100	680	1650



¹ Alle Maße in mm.

Die Forderung möglicher Unterdrückung des Maschinengeräusches kann verhältnismäßig leicht erfüllt werden, wenn schon beim Entwurf der Maschine darauf Rücksicht genommen wird. Sehr schwer, oft unerfüllbar ist es dagegen, eine bereits fertige Maschine entsprechend abzuändern. Die Geräuschbildung rührt bei Gleichstrommaschinen zum größten Teil von der Bürstenreibung her, bei Wechselstrommaschinen von der Magnetisierung und ferner bei großen Maschinen mit hoher Umfangsgeschwindigkeit des Läufers von dem Brausen der bewegten Luft. Es gibt heute Mittel der verschiedensten Art, um allen Forderungen nach dieser Richtung praktisch befriedigend zu entsprechen und zwar entweder durch die Bauart der Maschine z. B. mit besonderen Bürsten, mit geringer Stromwender-Umfangsgeschwindigkeit, mit teilweiser oder vollständiger Kapselung oder durch besondere Fundamentsausbildung (freistehende Fundamentblöcke), sowie Isolierung gegen das Fortleiten des Geräusches.

Bei großen Schenkelpolmaschinen werden der Gußkörper des Ständers, die Armkreuze, die Grund- und Sohlplatte neuerdings auch als geschweißte Stahlblechausführung gewählt, um an Gewicht zu sparen; dann ist allerdings mit verstärktem Maschinengeräusch zu rechnen. Durch aufgeschweißte Rippen beim Gehäuse kann diesem Nachteil begegnet werden.

f) Die Angebotsbeurteilung. Da die elektrischen Verhältnisse, sowie Drehzahl, Schwungmoment und der Zusammenbau mit der Antriebsmaschine gegeben sind, werden die Angebote nach diesen Richtungen kaum Abweichungen zeigen. Wohl aber können oft recht wesentliche Unterschiede in Gewicht und Abmessungen und daraus im Gesamtpreis der Maschine bestehen. Es muß daher das Angebot besonders über folgende Einzelheiten Aufschluß geben:

- Gesamtgewicht der Maschine fertig eingebaut,
- Einzelgewichte für den Einbau,
- größtes Krangewicht für den Einbau,
- größtes Krangewicht für Instandsetzungsarbeiten,
- Hauptabmessungen,
- Fracht- und Zubringerkosten,
- Verpackungskosten,
- Kosten des vollständigen Einbaues.

Aus der Baubeschreibung müssen zu ersehen sein:

- der Aufbau im einzelnen,
- die hauptsächlichsten Baustoffe für Wicklungen, Eisen, Läufer und Ständer,
- die Zugänglichkeit zu Teilen, die besonders zu beaufsichtigen und zu warten sind,
- die Ausführung von Instandsetzungsarbeiten an Läufer, Ständer und Lagern mit Angabe der ungefähren Zeiterfordernis und der notwendigen Hilfsmittel.

Als Maßstäbe für die Beurteilung der Gewichts- und Abmessungsunterschiede dienen nach Reichel¹ die Ausnutzungsziffer

¹ Reichel, W.: Vorläufige Grenzen im Elektromaschinenbau. Z. VDI 1921 S. 195, 517, 911. Nürnberg, W.: ETZ 1939 Heft 8 S. 233. Putz, W.: Die Grenzleistung von Generatoren zum Antrieb durch Wasserturbinen ETZ 1939 Heft 44 S. 1259.

und das Einheitsgewicht. Bezeichnet:

d_i den Innendurchmesser des Ständers in m,

l_i seine Eisenlänge mit Luftschlitzen in m,

so ist die Ausnutzungsziffer

$$C = \frac{N_n}{d_i^2 \cdot l_i \cdot n} \quad (45)$$

Diese Ausnutzungsziffer gibt überschläglichen Aufschluß darüber, wieviel vom aktiven Baustoff zur Herstellung einer Maschine benötigt wird. In Abb. 102 sind die Kennlinien für die Ausnutzungsziffer von Drehstromerzeugern für verschiedene Drehzahlen und Antriebsmaschinen-gattungen zusammengestellt, die den heutigen Verhältnissen entsprechen. Die Ausnutzungsziffer fällt für die verschiedenen Maschi-nengrößen naturgemäß sehr verschieden aus, da sie einerseits ab-dängig ist von den verwendeten Baustoffen, andererseits beeinflusst wird hurch die Art, wie die in der Maschine erzeugte Verlustwärme durch die

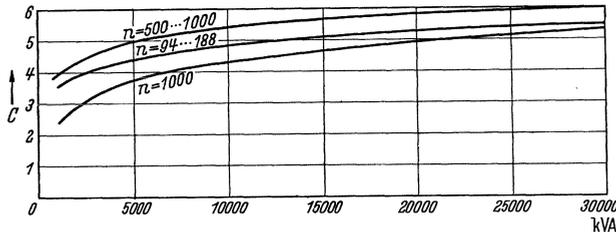


Abb. 102. Baustoff-Ausnutzungsziffern für Drehstrom-Synchronstromerzeuger.

Abkühlungsoberfläche abgeführt wird. Bei offenen Maschinen ist sie daher wesentlich größer als bei der geschlossenen Bauart.

Die Werte für d_i und l_i werden von den Herstellern zumeist nicht angegeben. Bei größeren Maschinen sollte der Besteller sie aber ver-langen, um die Ausnutzungsziffer feststellen zu können.

Das Gewicht in kg, das für ein MVA Leistung aufzuwenden ist, ist das sogenannte Einheitsgewicht G_i und zwar ist:

$$G_i = \frac{G}{N_n} = \frac{G}{C \cdot d_i^2 \cdot l_i \cdot n} \text{ kg/MVA} \quad (46)$$

G Gesamtgewicht der Maschine ohne Grundplatte und Lager in kg.

Es hängt das Einheitsgewicht wesentlich von der Drehzahl und ferner von dem im Läufer je nach der Art der Antriebsmaschine unter-zubringenden Schwungmoment ab. Dazu kommt heute der Ge-wichtsunterschied bei der Aus-führung des Ständerkörpers in Gußeisen oder in geschweiß-ter Stahlbauform, der Ge-wichtersparnisse bis zu etwa 30 vH aufweisen kann. Zahlen-tafel 12 gibt einige Unterlagen für Turbostromerzeuger.

Zahlentafel 12. Einheitsgewichte neuzeitlicher Turbostromerzeuger ohne Grundplatte und Lager.

Nennleistung MVA	Einheitsgewicht kg/MVA
1,0	5000
5,0	3500
20,0	2500
50,0	2100

Abgeschlossen werden solche Angebotsbeurteilungen durch die Feststellung des:

$$\text{Einheitspreises je MVA} = \frac{\text{Preis der fertig aufgestellten Maschine}}{N_n} \quad (47)$$

und

$$\text{der Raumbeanspruchung je MVA} = \frac{\text{Raumbeanspruchung mit Lagern}}{N_n} \quad (48)$$

In betriebswirtschaftlicher Beziehung ist noch der Wirkungsgrad bei Voll- und Teillasten zu berücksichtigen und der Unterschied als kapitalisierter Betrag (in der Regel für 10 Jahre) dem Angebotspreis entsprechend zuzusetzen oder von diesem abzuziehen.

g) Kühlung und Lüftung. Nach den REM wird unterschieden:

1. Selbstkühlung: Die Kühlluft wird durch die umlaufenden Teile der Maschine ohne Zuhilfenahme eines besonderen Lüfters bewegt.

2. Eigenlüftung: Die Kühlluft wird durch einen am Läufer angebrachten oder von ihm angetriebenen Lüfter bewegt.

3. Fremdlüftung: Die Kühlluft wird durch einen Lüfter mit eigenem Antriebsmotor bewegt.

4. Wasserkühlung: Die Maschine wird durch fließendes Wasser gekühlt.

Eine Maschine, bei der nur die Lager wassergekühlt sind, fällt nicht in diese Gruppe.

Die im Läufer und Ständer entstehende Verlustwärme muß abgeführt werden. Das geschieht entweder durch Strahlung also Abgabe der Wärmemenge an die umgebende Luft und durch Zuführung von Frischluft in das Maschinenhausinnere, oder durch besondere Lüftung des Maschineninneren.

Die Selbstkühlung wird für alle Maschinen kleiner und mittlerer Drehzahl und kleinerer Leistung angewendet. Die Kühlluft wird dem Maschinenraum entnommen und die warme Abluft dem Maschinenraum wieder zugeführt. Die Zahl und Größe der in einem Maschinenraum unterzubringenden Maschinen und die Art der Antriebsmaschinen nach den von ihnen abgestrahlten oder aufgenommenen Wärmemengen, sowie die Beschaffenheit und die Temperaturverhältnisse der Außenluft, schließlich die freie Heranführung genügender und reiner Kühlluftmenge in das Maschinenhaus sind dafür bestimmend, ob die Selbstkühlung angewendet werden kann. Sie ist die billigste Ausführungsform. Der Läufer besorgt die Luftbewegung in der Maschine vom Eintritt bis zum Austritt ohne besondere Hilfsmittel. Es ist naturgemäß, daß dieser Art der Wärmeabführung eine Grenze gesetzt ist, die in der Größe der Maschine, also in der fortzuschaffenden Wärmemenge und der Drehzahl, somit in den Abmessungen und der Umfangsgeschwindigkeit des umlaufenden Teiles begründet liegt.

Bei der Selbstkühlung ist die Maschine offen d. h. von allen Seiten frei zugänglich (Abb. 103). Lediglich zum Schutz der Ständerwickelköpfe wird das Gehäuse zu beiden Seiten schutzschildartig heruntergezogen (geschützte Bauform Zahlentafel 10).

Die Belüftung der offenen Maschine hat naturgemäß eine starke Geräuschbildung infolge der Luftbewegung zur Folge, die bei meh-

renen Maschinen in einem Raum oder bei beschränkten Abmessungen des Maschinenhauses recht unangenehm werden kann. Nach diesen Richtungen ist bei größeren Maschinenanlagen die Aufstellung offener Maschinen mit Selbstkühlung ebenfalls zu beurteilen. Dabei darf dann auch eine etwa zu starke Luftbewegung im Maschinen-saal nicht unbeachtet bleiben, die durch ihre Zugwirkung die Gesundheit der Maschinenbedienung gefährden kann. Bei der baulichen Durchbildung des Maschinenhauses ist hierauf, sowie auf die zu erwartende Raumtemperatur Rücksicht zu nehmen.

Die Eigenlüftung. Bei großen schnellaufenden Maschinen und bei den Turbostromerzeugern reicht die Luftansaugefähigkeit des Läufers und die von ihm geförderte Luftmenge ohne zusätzliche Lüfterflügel nicht mehr aus, die in der Maschine entwickelte Wärmemenge abzuführen, insbesondere die Temperaturen in allen Innenteilen der Maschine zu beherrschen. Um Abmessungen und Preis in wirtschaftlichen Grenzen zu halten, muß zu einer erzwungenen Belüftung des Maschineninneren übergegangen werden. Besonders sinnfälliger ist das bei den Turbostromerzeugern, die auf die Leistung bezogen infolge der hohen Drehzahlen die kleinsten Abmessungen aufweisen. Die Übertemperaturen in den Wicklungen und im Eisen sind für die Lebensdauer bestimmend, worauf früher bereits hingewiesen worden ist.

Die angebauten Lüfterflügel (Abb. 104) unterstützen die Wirkung des Läufers. Sie haben nicht nur die Aufgabe, die erforderliche Luftmenge anzusaugen, sondern sie gegen die Bewegungswiderstände innerhalb der Maschine zu fördern, also die notwendige Druckhöhe zu erzeugen. Dem Frischluftstrom müssen dabei durch seitliche Abdeckungen am Ständer und auch innerhalb der Maschine durch Schaffen besonderer Wege die Bahnen vorgeschrieben werden, die dieser zu nehmen hat, um auch tatsächlich an allen den Stellen, die gekühlt werden sollen, vorbeizustreichen. Es wird sich dabei in erster Linie darum handeln, daß der Frischluftstrom durch das Blechpaket der induzierten Wicklung hindurchgeführt wird, weil in diesem die höchsten und demnach die gefährlichsten Temperaturen auftreten. Dazu ist das Blechpaket mit einer reichlichen Anzahl von Luftschlitzen zu versehen, und gleichzeitig ist der Luftstrom an den Wicklungsköpfen

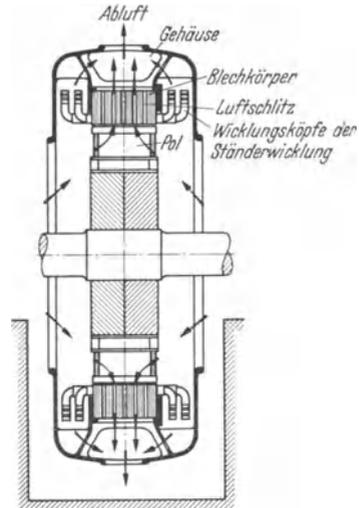


Abb. 103. Schenkelpol-Synchronstromerzeuger in offener geschützter Bauart.

Die angebauten Lüfterflügel (Abb. 104) unterstützen die Wirkung des Läufers. Sie haben nicht nur die Aufgabe, die erforderliche Luftmenge anzusaugen, sondern sie gegen die Bewegungswiderstände innerhalb der Maschine zu fördern, also die notwendige Druckhöhe zu erzeugen. Dem Frischluftstrom müssen dabei durch seitliche Abdeckungen am Ständer und auch innerhalb der Maschine durch Schaffen besonderer Wege die Bahnen vorgeschrieben werden, die dieser zu nehmen hat, um auch tatsächlich an allen den Stellen, die gekühlt werden sollen, vorbeizustreichen. Es wird sich dabei in erster Linie darum handeln, daß der Frischluftstrom durch das Blechpaket der induzierten Wicklung hindurchgeführt wird, weil in diesem die höchsten und demnach die gefährlichsten Temperaturen auftreten. Dazu ist das Blechpaket mit einer reichlichen Anzahl von Luftschlitzen zu versehen, und gleichzeitig ist der Luftstrom an den Wicklungsköpfen

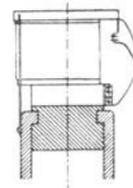
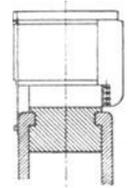


Abb. 104. Lüfterflügelanbau an das Polrad bei langsam laufenden Schenkelpolmaschinen.

so vorbeizuführen, daß er sich am zweckmäßigsten am äußeren Ständerumfang sammelt und von hier aus abströmt.

Diese besondere Lüftung der Maschine läßt drei Ausführungsformen zu:

a) das Ansaugen der Frischluft aus dem Maschinenraum und das Abströmen der erwärmten Luft in einen besonderen Kanal ins Freie;

b) das Ansaugen der Frischluft durch einen besonderen Kanal aus dem Freien und das Abströmen der erwärmten Luft in den Maschinenraum;

c) besondere Kanäle für Frischluft und Abluft.

Die Bauart der Maschine zu der Lüftungsform a) bezeichnet man als *halb geschlossen*.

Die Entnahme der Frischluft aus dem Maschinenraum setzt zunächst voraus, daß die Luftbeschaffenheit gut ist. Bei starkem Luftbedarf

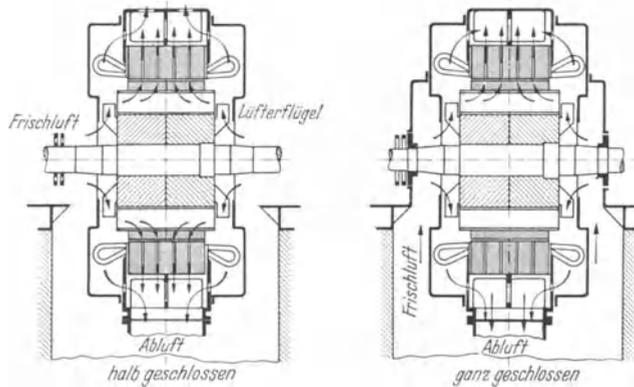


Abb. 105 und 106. Bauformen von Schenkelpol-Synchronmaschinen mit Lüfterflügeln.

kann ein erheblicher Unterdruck im Maschinensaal entstehen. Im Winter kann die Temperatur im Maschinenraum unerträglich tief werden, so daß eine besondere Heizung z. B. aus dem Warmluftkanal notwendig wird (Abb. 117). Dazu kommt schließlich noch die Geräuschbildung durch das Brausen der angesaugten Luft. Diese Lüftungsform wird daher selten oder gar nicht benutzt. Abb. 105 zeigt die Bauart der Maschine. Wird die durch die Maschineneinzelleistung bedingte Luftmenge zu groß, als daß sie bei einer größeren Anzahl in einem Raum aufgestellter Stromerzeuger, ohne die zulässige Luftgeschwindigkeit innerhalb des letzteren zu überschreiten, aus diesem entnommen werden kann, so muß man dazu übergehen, für die Frischluft besondere Kanäle anzulegen, die mit der Außenluft unmittelbar in Verbindung stehen und an jede Maschine angeschlossen werden. Die Luftbewegung durch die Kanäle und die Maschine besorgen die Lüfterflügel. Damit nun aber hier der Frischluftstrom voll zur Wirksamkeit kommen kann, müssen die Seitenabdeckungen des Ständers vollkommen geschlossen werden; man nennt diese Bauform *ganz geschlossen* (Abb. 106). Sie gibt die unter b) und c) genannten Ausführungsmöglichkeiten.

Bei der Ausführungsform b) kann der Frischluftstrom entweder in der Mitte oder am unteren Gehäuseteil zugeführt werden; letztere Ausführung ist die empfehlenswertere, weil die Maschinengrube frei wird und Luftwirbelbildungen innerhalb der Maschine vermieden werden. Die erwärmte Luft sammelt sich am Ständerumfang und tritt frei in den Maschinenraum aus.

Diese Form der Belüftung wird bei Maschinen mittlerer Leistung angewendet. Ein Vorteil liegt darin, daß der Maschine die Frischluft in genügender Menge und, sofern die Kanäle richtig angelegt sind, mit der erhaltbar tiefsten Temperatur zur Verfügung steht. Ferner kann durch entsprechende Vorrichtungen in den Kanälen die Frischluft bequem geregelt werden, worauf bei der Besprechung der Kanalanlage näher eingegangen wird. Die Geräuschbildung ist infolge der großen Luftgeschwindigkeit der ausströmenden Warmluft recht beträchtlich, weil der Querschnitt der Austrittsöffnungen nicht beliebig groß genommen werden kann. Die abströmende Luft erzeugt Überdruck im Maschinenraum, der unter Umständen so stark werden kann, daß das Öffnen von Fenstern und besonders von Türen nur mit besonderer Vorsicht möglich ist, um keine Gefährdung herbeizuführen. Die Maschinenhaustemperaturen lassen sich leichter beherrschen. Im Sommer wird eine zusätzliche Luftbewegung im Maschinenraum erforderlich werden. Im Winter ist zumeist eine besondere Heizung entbehrlich.

Die Form c) mit besonderen Kanälen für Frischluft und Abluft ist für große und größte Maschinen, ob Langsam- oder Schnellläufer, die vorteilhafteste, weil eine Regelung der Luftmengen und äußeren Luftwege möglich ist und die Geräuschbildung auf das erreichbar kleinste Maß herabgedrückt wird. Nachteile besitzt aber auch diese Belüftungsform noch. Dieselben liegen teilweise darin, daß sie infolge der Maschinenverhältnisse selbst nicht immer ausführbar ist. Wenn auch die von der Maschine zur Kühlung geforderte Luftmenge durch die Lüfterflügel wird gefördert werden können, so kann unter Umständen die Pressung in den Kanälen und Filtern einen Hinderungsgrund für die Anwendung dieser Belüftungsform bilden, weil sie von den Lüfterflügeln nicht mehr überwunden werden kann. Diese Schwierigkeit tritt ganz besonders bei Turbostromerzeugern auf, weil die Pressung innerhalb der Maschine Werte bis zu 1000 mm WS erreicht, zu der dann noch diejenige in den Kanälen hinzukommt. Sie besteht aber auch bei der zweiten Maschinengattung d. h. bei Maschinen, die durch Wasserturbinen u. dgl. angetrieben werden, obgleich hier die Pressung innerhalb der Maschine im allgemeinen nicht mehr wie etwa 15 bis 30 mm WS beträgt.

Ein weiterer Nachteil ist ferner der, daß der Wirkungsgrad der Maschine und auch derjenige der gesamten Belüftung nicht der günstigste ist, der sich erreichen läßt und der natürlich anzustreben ist. Man kann etwa damit rechnen, daß der Wirkungsgrad um 0,6 bis 1 vH sinkt, weil erstens die Maschine die gesamte Lüftungsarbeit selbst zu übernehmen hat, und weil zweitens die Lüfterflügel nicht nach den günstigsten Gesichtspunkten ausgebildet werden können. Sie müssen sich den Maschinenabmessungen anpassen, die oftmals recht beschränkt

sind¹. Abb. 107 zeigt den Schnitt durch einen Turbostromerzeuger mit Längs- und Querbelüftung des Ständers und mit eingebauten Lüfterflügeln und Abb. 108 den Temperaturverlauf innerhalb der Maschine bei radialer und axialer Strömungsrichtung.

Ob die Lüfterflügel die Gesamtpressung in m Luftsäule bei einem gegebenen Durchmesser des umlaufenden Teiles der Maschine überwinden können, ist überschläglich leicht zu prüfen, denn die Pressung ist abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit, mit der der Lüfter läuft. Die Umfangsgeschwindigkeit ist angenähert:

$$u = \frac{\pi \cdot d_{Lü} \cdot n}{60} = 4,43 \cdot \alpha \cdot \sqrt{H} \text{ m/s.} \quad (49)$$

Daraus folgt die zu überwindende Pressung:

$$H = \frac{(\pi \cdot d_{Lü} \cdot n)^2}{3600 \cdot 19,62 \alpha^2} = \frac{u^2}{19,62 \cdot \alpha^2} \text{ m Luftsäule.} \quad (50)$$

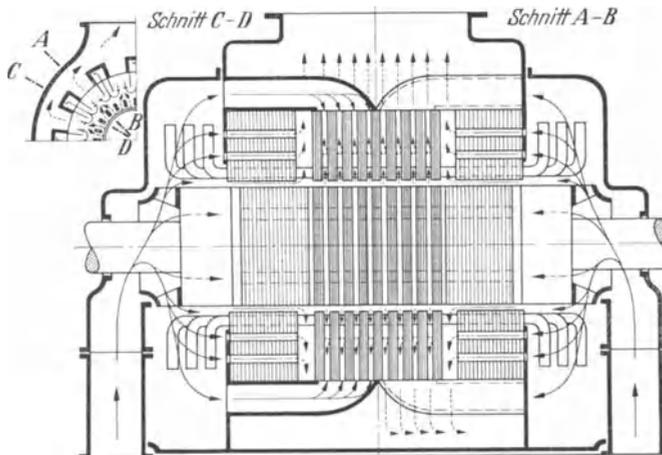


Abb. 107. Turbo-Synchronstromerzeuger mit Längs- und Querbelüftung des Ständers; am Läufer angebaute Lüfter; Längsbelüftung des Läufers.

α = Erfahrungsziffer (s. Hütte: Die Ventilatoren) etwa gleich 1,5 bis 1,7 für die hier in Frage kommende Ausführung; $d_{Lü}$ = mittlerer Durchmesser des umlaufenden Teiles in m .

Die Pressung H nach Gl. (50) ist die gesamte überwindbare, also diejenige, die innerhalb der Maschine auftritt und diejenige, die über letztere hinaus noch in der Kanalanlage auftreten darf. Der Maschinenrechner hat hier zu entscheiden, welcher Betrag von H noch für die Kanalanlage verfügbar ist. Ist letzterer zu klein, so muß ein Zusatzlüfter aufgestellt oder die Fremdbelüftung gewählt werden, wenn andererseits die Frisch- und Abluftkanäle nicht umgestaltet werden können.

¹ Punga, F.: Die Läuferkühlung von Turbogeneratoren und ihr Einfluß auf die Grenzleistung. ETZ 1937 Heft 22 S. 608.

Die Fremdlüftung wird in der Form zur Ausführung gebracht, daß ein besonderer Lüfter entweder die vollständige, oder einen Teil der Maschinenbelüftung übernimmt, wenn noch Lüfterflügel vorhanden sind. Bei sehr großen Turbostromerzeugern reicht der Raum innerhalb der Seitenabdeckungen der Maschine nicht mehr aus, um genügend große Lüfterflügel einzubauen. Dann wird ein besonderes Turbogebälse zusätzlich benutzt¹. Dabei ist zu beachten, daß durch die Luftverdichtung im Turbogebälse eine Temperaturerhöhung der Luft erfolgt. Infolgedessen ist es günstiger, das Gebälse luftsaugend arbeiten zu lassen, so daß die Frischlufttemperatur mit erreichbar niedrigster Temperatur der Maschine zugeführt wird. Erfordert die Kühlluftbeschaffenheit die Luftrückkühlung im Umlaufverfahren (Abb. 124 bis 127), so wird die Druckwärme gleichzeitig beseitigt. Es ist bei der Größenbestimmung der Kühlanlage darauf entsprechend Rücksicht zu nehmen.

Der getrennte Lüfter kann nach den besten lufttechnischen Gesichtspunkten gebaut werden und arbeitet dann wirtschaftlicher als die eingebauten Lüfterflügel. Durch Herausnahme der Lüfterverluste aus der Maschine werden die Gesamtverluste kleiner und damit auch die Luftmenge geringer.

Bei langsam laufenden Maschinen selbst der größten Leistungen wird ein getrennter Lüfter kaum notwendig.

h) Die Luftreinigungsanlage richtet sich in ihrer Durchbildung nach der Luftbeschaffenheit und der Entnahmestelle der Frischluft. Noch bevor der Fundamentplan des Kraftwerkes in Angriff genommen wird, sind alle Einzelheiten der Belüftung zu klären. Häufig werden hierin anfänglich Fehler gemacht, die in der weiteren Entwurfsbearbeitung zu grundsätzlichen und umständlichen

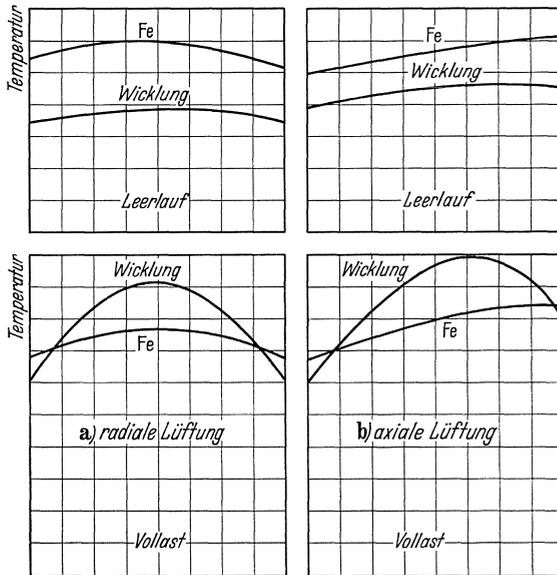


Abb. 108. Temperaturverlauf in einem Turbo-Synchronstromerzeuger bei verschiedener Belüftungsart:
a Querbelüftung, b Längsbelüftung.

¹ Kropff, L.: Eine Spitzenleistung im Elektro-Großmaschinenbau 80000 kVA Turbogenerator mit 3000 U/min. Siemens-Z. 1933 S. 86 und Band III/1 Abb. 36.

Änderungen führen. Besonders bei Wasserkraftanlagen ist hierauf zu achten.

Die Beschaffenheit der Luft unterliegt folgenden Bedingungen: Die Luft muß frei von festen Bestandteilen (Ruß, Straßenstaub bei ungeteilter Straßendecke, Flugasche, Zementstaub, Kalistaub, Salz u. dgl.) und chemischer Verunreinigung sein. Sie soll ferner einen nicht zu hohen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. Die verhältnismäßig engen Luftschlitze und Luftkanäle im Ständer und Läufer der Maschine können durch Fremdkörper und verkrusteten Staub verstopft werden, so daß die erforderliche Luftmenge nicht mehr durchgetrieben werden kann. Dann wird auch die Wärmeabführung schlechter, die vorgeschriebenen Temperaturgrenzen überschritten und Eisen, sowie Isolierstoffe überanstrengt. Dadurch wird die Betriebssicherheit und die Lebensdauer der Maschine beeinträchtigt. Das Eisen altert schneller, die Isolierungen werden ausgetrocknet, schwinden stärker, verlagern sich infolgedessen, die Wicklungen sitzen nicht mehr fest, die Wicklungsköpfe können sogar Knickungen erhalten, und bei einer plötzlichen starken Kurzschlußbelastung schlägt die Maschine durch. Selbst häufiges Reinigen des Maschineninneren und Durchblasen der Luftkanäle hilft hiergegen nicht. Wird dazu die Maschine noch oft stillgesetzt, und kann durch nicht fest abgeschlossene Stellen kalte Luft mit hohem Feuchtigkeitsgehalt eintreten, dann ist eine so starke Verkrustung der Fremdkörper zu befürchten, daß nur eine vollständige Überholung des ganzen Stromerzeugers die Gefahren beseitigt. Das kostet viel Geld und zwingt zur längeren Außerbetriebsetzung der Maschine, was oft kaum möglich ist. Die Reinigung schwer zugänglicher Stellen macht besondere Schwierigkeiten. Mit scharfen Werkzeugen zu arbeiten ist unzulässig, da Isolationsbeschädigungen herbeigeführt werden können.

Welche Staubmenge während eines Betriebsjahres eine Maschine durchläuft, ist aus folgender kurzer Überschlagsrechnung zu ersehen. Der mittlere Staubgehalt gereinigter Luft beträgt etwa $0,2 \text{ mg/m}^3$. Bei einer Kühlluftmenge von $30 \text{ m}^3/\text{s}$ für den Stromerzeuger gelangen innerhalb einer jährlichen Betriebsdauer von 6000 h:

$$30 \cdot 3600 \cdot 6000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} = 129,6 \text{ kg}$$

Staub in die Maschine, die sich zum größten Teil in den Luftkanälen, toten Ecken usw. ablagern. Das zeigt die große Bedeutung, die der Reinigung der Maschinenkühlluft zukommt.

Chemische Verunreinigungen bringen die gleichen Gefahren. Unter Umständen lassen sich diese mit wirtschaftlich vertretbaren Mitteln gar nicht beseitigen. Dann muß beim Aufbau der Maschine darauf entsprechend Rücksicht genommen und die Umlaufrückführung gewählt werden.

Es ist also die Beschaffenheit der Kühlluft noch vor der Maschinenbestellung genauestens — wenn notwendig sogar durch chemische Untersuchung — zu prüfen. Das gilt auch für offene Maschinen mit Gas- oder Dieselmotorantrieb dann, wenn eine genügende Belüftung des Maschinenraumes mit guter Luft nicht oder nur schwer möglich ist.

Die Entnahme der Kühlluft soll tunlichst aus der freien Umgebung des Kraftwerkes erfolgen, wenn die Luftbeschaffenheit gut ist. Bei Dampfkraftwerken die Luft aus dem Kondensationskeller zu benutzen, ist nicht ratsam, wenn dieser nicht besonders gut durchgebildet und ständig Frischluftzufluß besitzt, weil die Luft mit Wasser- und Öldampf durchsetzt ist und zumeist auch eine zu hohe Temperatur aufweist. Filteranlagen helfen hier nicht immer mit der erforderlichen Zuverlässigkeit. Eine derart verunreinigte Luft kann bei Hinzutritt von Staub sehr schnell zu sehr weitgehenden Verkrustungen innerhalb der Maschine führen. Auf die außerordentliche Gefährdung durch Einsaugen von Dampfschwaden aus einer undichten Rohrleitung ist besonders hinzuweisen.

Bei Wasserkraftwerken mit stehender Welle wird die Frischluft bei entsprechenden baulichen Verhältnissen auch aus dem Turbinenkeller entnommen (Abb. 121). Das ist nur bei kleinen Maschinen und dann wählbar, wenn im Turbinenkeller die Luftgeschwindigkeit nicht zu hoch wird. In Abb. 121 sind einige Ausführungsformen für die Belüftung dieser Maschinenbauform zusammengestellt, aus denen zu ersehen ist, daß zahlreiche Lösungen auch hier den jeweiligen Raumverhältnissen entsprechend möglich sind.

Bei Entnahme aus dem Freien darf die Eintrittsstelle nicht auf der Sonnenseite liegen oder gar auf dem Dach des Maschinenhauses, das im Sommer dem Regen und den Sonnenstrahlen, im Winter dem Verschneien und der Vereisung ungeschützt ausgesetzt ist; am vorteilhaftesten wird sie auf der Nordseite vorgesehen. Ferner muß auf die Nähe von Kühltürmen bei Dampfanlagen (zu feuchte Luft) Rücksicht genommen werden. Die Mündung der Kanäle soll nicht unmittelbar am Erdboden liegen, damit sich nicht Blätter, Regen, Schnee u. dgl. in ihnen sammeln können. Sie muß mindestens einen Meter über den Erdboden hinausgeführt werden, und ist mit einem Schutzhaus abzudecken (Abb. 109). Als Schutz gegen das seitliche Eindringen von Regen oder Schnee und zur Regelung der Einströmöffnungen je nach den herrschenden Windrichtungen dienen am einfachsten verstellbare Klappenverschlüsse.

Die Frischluft bei strenger Kälte unmittelbar aus dem Freien ansaugen zu lassen, kann allerdings zu Unannehmlichkeiten führen. Die Eintrittsstutzen an den Maschinen und Blechkanälen kühlen sich an kalten Tagen u. U. so stark ab, daß die in der Luft vorhandene Wassermenge an den kalten Kanalwandungen kondensiert und zur Eisbildung führt. Sind andererseits nur Frischluftkanäle vorhanden, während die warme Luft unmittelbar in den Maschinenraum abströmt, kann bei stillgesetzter Maschine und nicht vollständig ab-

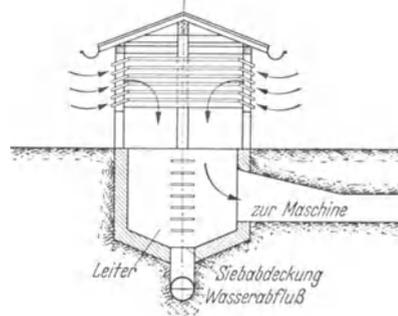


Abb. 109. Frischluftentnahme mit freistehendem Schutzhaus über dem Erdboden.

geschlossenen Frischluftkanal die kalte Luft Feuchtigkeit innerhalb der Maschine niederschlagen, und dadurch Wasser in die Wicklungen dringen. Eine ähnliche Erscheinung ist auch bei vollständig geschlossener Maschine im Stillstand, oder wenn dieselbe nach Beendigung einer Besichtigung u. dgl., bei der Maschinenraumluft eingeschlossen wurde, mehrere Stunden nicht in Betrieb genommen wird, möglich. Man muß daher gegebenenfalls die Frischluft im Winter durch Aufstellen von Heizkörpern vorwärmen, die z. B. bei Dampfkraftanlagen mit der Kondensation in Verbindung stehen (wirtschaftliche Abdampfverwertung). Eine andere Form der Vorwärmung ist die, die Frischluftkanäle mit den Abluftkanälen in Verbindung zu bringen (Abb. 110) und durch entsprechende Wege-

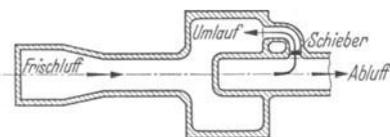


Abb. 110. Maschinen-Fremdbelüftung mit Warmluftumlauf (Umwälzverfahren).

regelung mit den Abschlußklappen die Luftmischung herbeizuführen (Umwälzverfahren).

Zur Reinigung der Kühlluft von festen Bestandteilen dienen Staubkammern und Filter.

Die Staubkammer, ein entsprechend bemessener Raum, soll die Luftbewegung so weit herabsetzen, daß feste Bestandteile Zeit haben, sich durch ihre Schwere abzusetzen. Sie wird unmittelbar vor den Frischluftkanal gelegt und ist so zu gestalten, daß die abgelagerten Fremdkörper nicht in die Maschine gesogen werden können. Auf eine leichte Reinigung ist besonders zu achten. Sie ist nach Abb. 120 mit einem Schutzhaus zu überdecken.

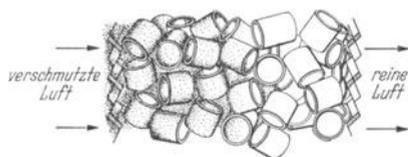


Abb. 111. Vorgang der Staubbinding im Delbag-Ringgut-Luftfilter.

Besonders bei Wasserkraftanlagen genügt die Staubkammer zumeist, da die Frischluft hier fast stets rein genug ist.

Die Luftfilter bestehen in der Regel aus einem Rahmenwerk, in das die Filterstoffe eingelagert sind.

Tuchfilter werden wegen der

leichten Entzündbarkeit der Tücher und Holzrahmen und der damit verbundenen Brandgefahr heute nicht mehr benutzt. An ihre Stelle treten die tuchlosen Luftfilter.

Sehr verbreitet ist zur Zeit als Trockenluftfilter das feststehende oder umlaufende Viscin-Zellenluftfilter der Deutschen Luftfilter-Bau-Gesellschaft. Die zu reinigende Luft durchstreicht zwangsläufig und in stetem Richtungswechsel eine Filterschicht, die aus besonders geformten Widerstandskörpern (Metallringen) besteht, deren verhältnismäßig große Oberfläche mit einer besonders stark staubbindenden, nicht verdunstenden, wetterfesten, viskosen Flüssigkeit (Viscinol) benetzt ist. Durch die besondere Form der Widerstandskörper (Abb. 111) wird jedes Luftteilchen mehrfach an der staubbindenden Flüssigkeitshaut dieser Widerstandskörper vorbeigeführt. Dadurch werden die in der Luft enthaltenen Fremdkörper, sowie mitgeführte

Wasser- und Ölteilchen praktisch vollkommen ausgeschieden. Zum Zweck leichterer Reinigung und schnellen Ein- und Ausbaues wird das Filter in einzelne Filterzellen (Abb. 112) mit einer Größe von $0,25 \text{ m}^2$ ($500 \times 500 \text{ mm}$) und einem Gewicht von etwa 15 kg einschließlich Filterfüllung unterteilt.

Der Einbau der Zellenfilter in die Maschinenanlage kann je nach den örtlichen Verhältnissen leicht vorgenommen werden (Abb. 113 und 114). Die Reinigung der Filterzellen ist in bestimmten Zeitabständen vorzunehmen. Das geschieht in der Weise, daß die zu reinigende Zelle gegen eine Ersatzzelle ausgewechselt wird. Diese Arbeit kann während des Betriebes in wenigen Minuten von einem Arbeiter ausgeführt werden. Bei einem Filter von beispielsweise 30000 m^3 Stundenleistung (25 Zellen) sind bei gewöhnlichem Staubgehalt der Luft und mittlerer täglicher Betriebsdauer wöchentlich zumeist zwei Zellen zu

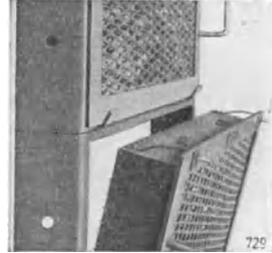


Abb. 112. Delbag-Ringgut-Luftfilter-Tasche.

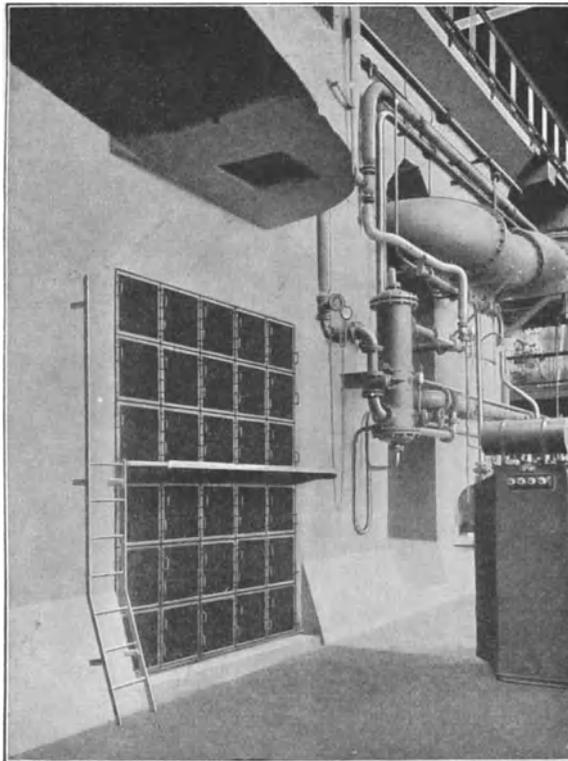


Abb. 113. Delbag-Ringgut-Luftfilter für Turbostromerzeuger im Kondensator Keller eingebaut.
Kyser, Kraftübertragung. III/2. 3. Aufl.

reinigen; das kann für die Berechnung der Betriebskosten im allgemeinen zugrunde gelegt werden.

Jede Filterzelle von $0,25 \text{ m}^2$ Fläche wird in der Regel mit 1000 bis 1200 m^3 in der Stunde gleichförmigem Luftdurchgang belastet. Der Widerstand beträgt dabei etwa 2 mm WS. Er steigt bei normalem Staubbelaag während des Betriebes auf etwa 5 bis 7 mm WS und bleibt alsdann annähernd unverändert, sofern die von der Herstellerin gegebenen Betriebsvorschriften beachtet werden.

Von der Beschreibung anderer Filterbauformen soll abgesehen werden. Für die Abnahme- und Betriebsüberwachungsversuche genügen die gemachten Angaben. Aus dem bisher Gesagten ergeben sich die Grundforderungen für solche Filter:

beste Reinigungswirkung bei feuchtem und trockenem Zustand der Luft, höchster Reinheitsgrad (Entstaubungsgrad), langzeitige Auf-

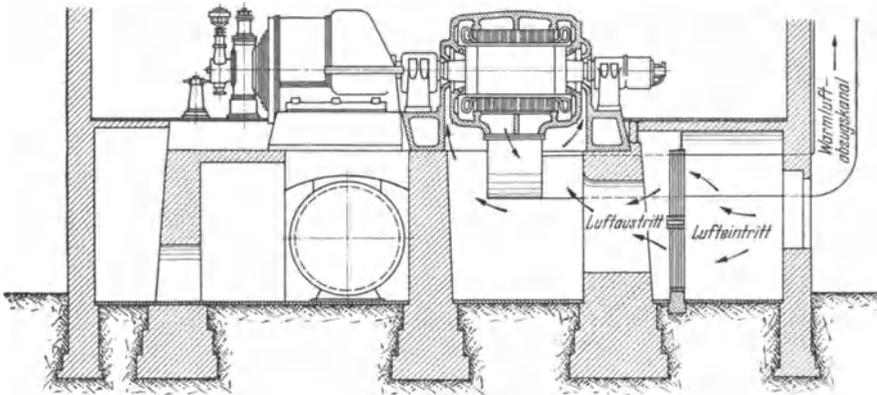


Abb. 114. Luftfiltereinbau mit Luftzu- und -abführung für Turbostromerzeuger.

nahmefähigkeit des Filterstoffes, einfache und vollständige Reinigungsmöglichkeit des Filterstoffes,

keine Brandgefahr,

keine Abhängigkeit des Filterstoffes und seiner Verwendung von Temperaturverhältnissen,

keine Verunreinigung der gefilterten Luft durch den Filterstoff selbst,

kleinster Filterwiderstand bzw. Filterverlust,

leichte Überwachung und Bedienung des Filters,

lange Lebensdauer, kleinste Betriebskosten,

kleinste Abmessungen, einfachster Einbau.

In Zahlentafel 13 sind die Versuchsergebnisse mit Delbag-Filtern zusammengestellt. Der Hauptwert liegt im Entstaubungsgrad. Dieser ist gleichbedeutend mit dem Wirkungsgrad und zwar:

$$\eta_{Ft} = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \cdot 100 \text{ vH}, \quad (51)$$

worin:

S_1 Rohstaubmenge in mg/m^3 ,

S_2 Reststaubmenge in mg/m^3 .

Zahlentafel 13. Ergebnisse einiger Versuche zur Bestimmung des Wirkungsgrades eines Metallfilters¹.

Versuch Nr.	I	II	III
Dauer	18 ¹⁰ bis 11 ¹⁰	17 ⁴⁵ bis 11 ¹⁵	17 ³⁰ bis 17 ³⁰
Luftgeschwindigkeit m/s durch das Filter strömende Luftmenge bezogen auf die Luftgeschwindigkeit der untersuchten Zelle . . . m ³ /h	1,37	0,83	0,83
Filterwiderstand mm WS	32000	19400	19400
Lufttemperatur im Durchschnitt °C	16,7	6,2	6,2
Staubdichte vor dem Filter .mg/m ³	rd. 5	rd. 10	rd. 15
Staubdichte hinter dem Filter .mg/m ³	6,96	6,25	6,70
Entstaubungsgrad des Filters . . vH	0,009	0,011	0,010
	99,87	99,82	99,85

Zur Überwachung des Filterwiderstandes sind Druckmesser im Frischluftkanal und Temperaturanzeiger im Abluftkanal gegebenenfalls mit Fernübertragung einzubauen.

Die Naßluftfilter. Eine andere Luftreinigung wird in Amerika viel angewendet, die darin besteht, daß die Luft durch Anwendung von Wasser gewaschen und dann mittels besonderer Vorrichtungen vor ihrem Eintritt in die Maschine von dem Wassergehalt befreit wird. Ist die Maschine im Betrieb, ist die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit durch den Waschvorgang unschädlich, da die heißen Maschinenteile die geringen in der gereinigten Luft vorhandenen Wassermengen sofort verdampfen. Bedenklich wird diese Form aber dann, wenn die Maschine abgestellt wird. Selbst bei dichtschießenden Abschlußklappen ist nicht zu vermeiden, daß eine geringe Frischluftmenge durch die stillstehende Maschine zieht. Die Feuchtigkeit kann sich dann auf den Wicklungen absetzen und unter Umständen eine allmähliche Durchfeuchtung des Maschineninneren herbeiführen.

Die Firma Balcke baut einen ähnlichen Luftreiniger, bei dem allerdings das Absetzen des Staubes an nassen Prallflächen stattfindet, wodurch kein Wasser in tropfbarem Zustand in den Luftstrom gelangt. Der ausgeschiedene Staub wird durch Wasser augenblicklich fortgespült. Reinigungsarbeiten am Filter sind daher nur in beschränktem Maß notwendig.

Diese Filter können, wenn die Frischluft in heißen Gegenden eine hohe Temperatur hat, dazu benutzt werden, die Lufttemperatur herabzumindern. Wasserdurchflossene Kühlschlangen vor dem Filter lassen dasselbe erreichen. Namentlich im Hochsommer ist dieser Vorteil für den Betrieb bzw. die Belastbarkeit des Stromerzeugers von nicht zu unterschätzender Bedeutung, weil die bessere Kühlung unter Umständen eine Steigerung der Belastungsfähigkeit der Maschine ermöglicht. Für die gegenseitige Beurteilung der verschiedenen Filterformen ist bei dem Naßluftfilter zu beachten, daß für die Bewässerung eine besondere Pumpe notwendig ist, deren Kapitaldienst, Unterhaltung und Stromverbrauch für die Gesamtanlage als Verlust zu berücksichtigen ist. Im Winter ist ein derartiges Naßluftfilter nur dann brauchbar, wenn dafür

¹ Z. VDI Bd. 73 Nr. 40 (1929) S. 1447.

gesorgt wird, daß durch Einbau bzw. geeignete Vorkehrungen ein Einfrieren des Rieselwassers sicher verhindert wird.

Die Abluft. Bei der halbgeschlossenen Maschinenbauart tritt bei Frischluftkühlung die erwärmte Luft in den Maschinenraum. Da durch die Wärmemengen die Lufttemperatur im Maschinenraum erhöht wird, ist, wie bereits gesagt, diese Art der Warmluftabführung durch die Größe des Maschinenraumes, oder die stündliche Lufterneuerung in diesem und die Art der Antriebsmaschinen begrenzt.

Bei Dampfturbinen ist der Maschinenraum meist wesentlich kleiner als bei Kolbenmaschinen und Wasserturbinen. Da die Verluste jedoch — gleiche Leistung vorausgesetzt — bei beiden Antriebsarten die gleichen sind, wird der Maschinenraum bei Dampfturbinen eine viel kräftigere Lüftung erhalten müssen als z. B. bei Wasserturbinenantrieb. Hinzu kommt noch die Wärmeabgabe der Dampfturbinen selbst bzw. die Wärmeaufnahme-fähigkeit der kalten Wasserturbinen. Andererseits kann im strengen Winter die Maschinenwarmluft zur Heizung des Maschinenraumes benutzt werden.

Bei der geschlossenen Bauart erfordert auch die Abluft einen besonderen Kanal. Die Austrittsstelle ist so zu wählen, daß die Abluft die Um-

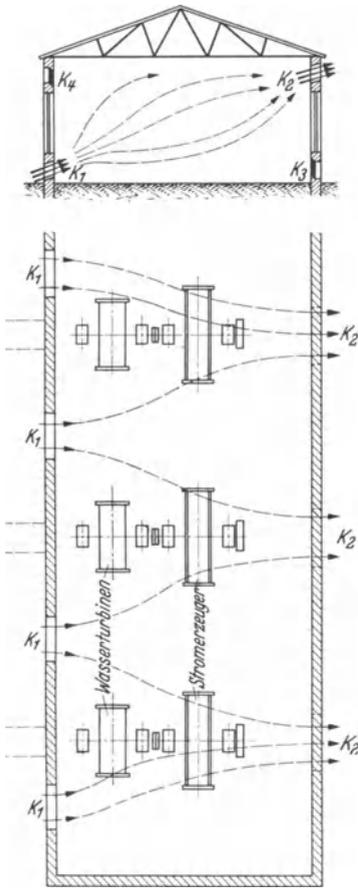


Abb. 115. Natürliche, regelbare Maschinenraumbelüftung mit Luftführung.

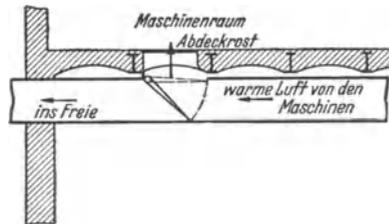


Abb. 116. Warmluftkanal mit regelbarem Luftweg.

gebung nicht beeinträchtigt. Wenn irgend möglich soll sie bis über das Dach des Maschinenhauses (Schornsteinwirkung) und auf der der Entnahme entgegengesetzten Seite angelegt werden. Dabei ist architektonisch besonders auf die Eingliederung der Abluftkanäle in die Gestaltung der Gebäudefront zu achten, was nicht immer leicht ist. Eine besondere Lösung ist in Abb. 359 Band III/1 gezeigt. Hier sind die Abluftkanäle im Maschinenhausinneren an einzelnen Fenstern hochgeführt. Um die Lichtverhältnisse der überdeckten Fenster nicht zu beeinträchtigen,

sind die Kanäle vollständig in Glas gebaut und dadurch für das Auge des Beschauers weder vom Maschinenrauminneren noch von außen sichtbar. Außerdem können solche Kanäle leicht überwacht und gereinigt werden.

Die Belüftung des Maschinenraumes bedarf ebenfalls besonderer Beachtung. Zumeist wird das Öffnen von Fenstern genügen, um eine ausreichende Luftbewegung zu erzielen. Dabei ist darauf zu achten, daß ein richtiger Luftstrom erzwungen wird, wofür die Angaben im Band 1 heranzuziehen sind. Abb. 115 zeigt hierfür ein Beispiel.

Soll die warme Maschinenluft bei der geschlossenen Maschinenbauart zum Heizen des Maschinenraumes und auch der benachbarten Schalträume benutzt werden, so werden in die Warmluftkanäle Klappen

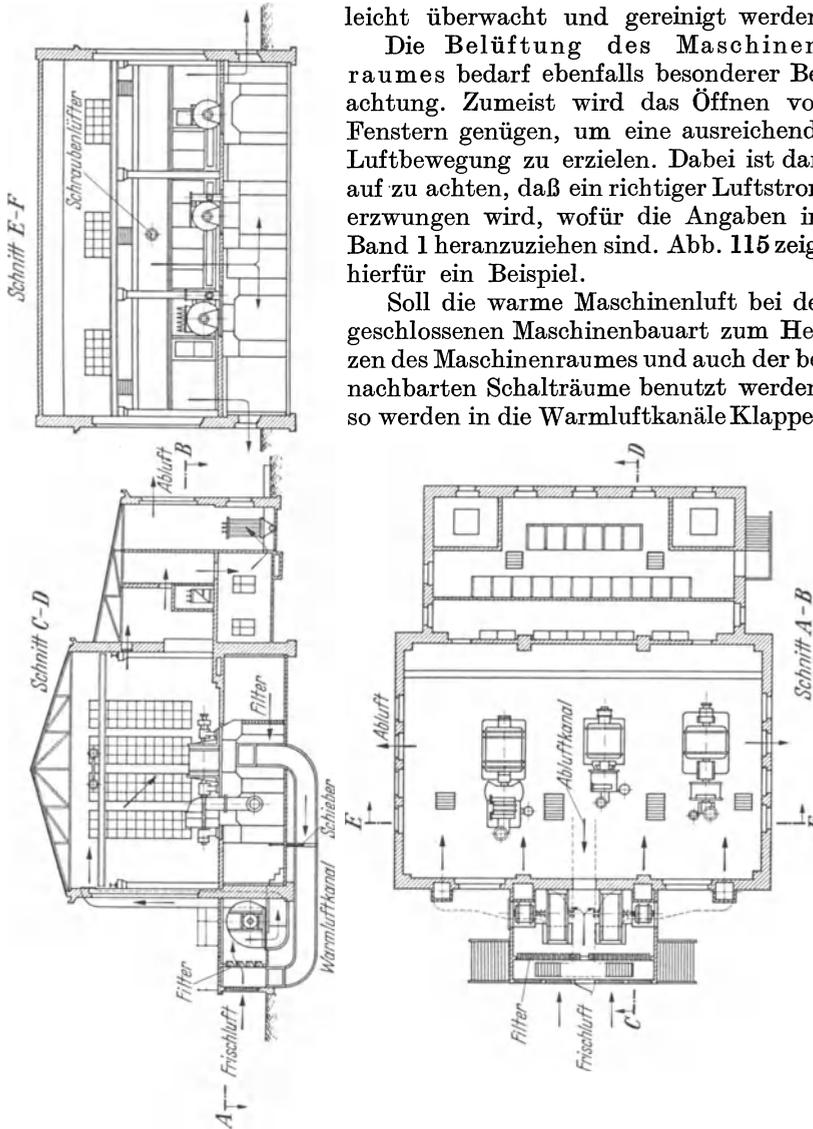


Abb. 117. Künstliche Überdruckbelüftung mit umschaltbarer Warmluftführung für die Beheizung der Maschinen- und Schalträume.

eingebaut (Abb. 116), indessen darf der abströmenden Luft kein nennenswerter Widerstand geboten werden. Die Ausströmstellen müssen daher entsprechend reichlichen Querschnitt erhalten, wobei auf die Querschnittsverminderung durch die Verschlussgitter zu achten ist. Eine andere Ausführung zeigt Abb. 117 für eine Überdruckheizung auf dieser

Grundlage. Die Warmluft wird durch besondere Lüfter von den Maschinen abgesogen und dem Maschinenraum sowie den Schalträumen durch die Abluftkanäle zugeführt.

Die Anlage der Luftkanäle. Ist besondere Frischluftzuführung oder Warmluftabführung oder beides erforderlich, so sind die Kanäle sowohl in der Wahl der Wege als auch in ihrer baulichen Gestaltung mit Sorg-

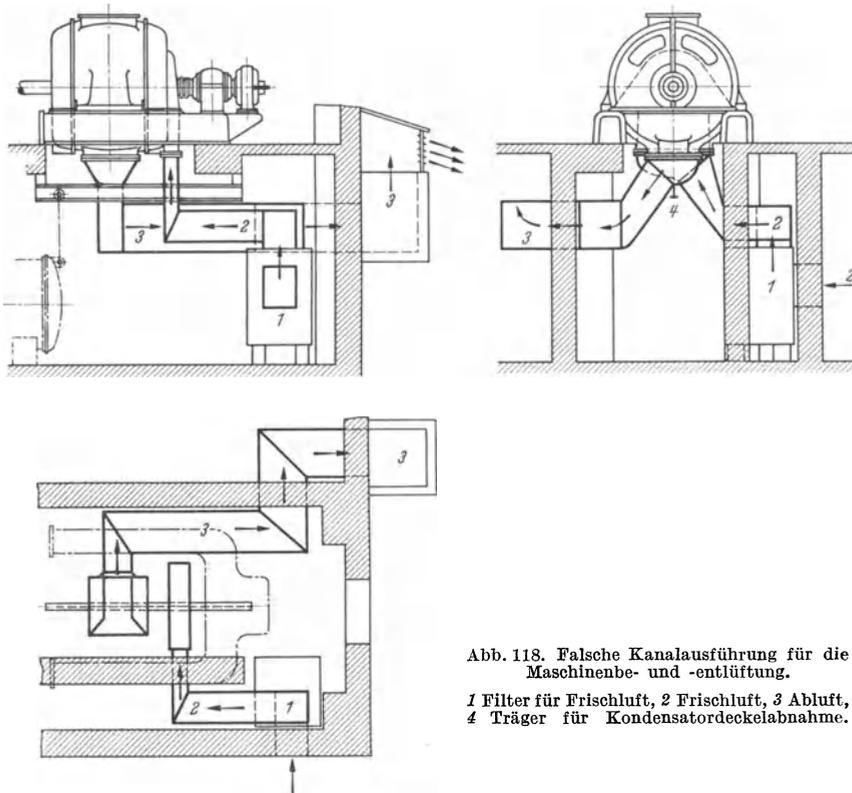


Abb. 118. Falsche Kanalausführung für die Maschinenbe- und -entlüftung.

1 Filter für Frischluft, 2 Frischluft, 3 Abluft, 4 Träger für Kondensatordeckelabnahme.

falt auszuführen. Als wichtigste Gesichtspunkte sind die folgenden zu beachten:

Da jede Richtungsänderung des Luftstromes den Reibungswiderstand vergrößert, sollen die Kanäle möglichst geradlinig angelegt werden. Ein nicht zu vermeidender Ablenkwinkel darf höchstens 45° betragen und soll in sanfter Krümmung mit möglichst großem Radius verlaufen. Scharfe Ecken sind unter allen Umständen zu vermeiden. Dasselbe gilt von Querschnittsänderungen, die sanfte, trichterförmige Übergänge aufweisen müssen. Die Kanalmündungen, besonders diejenigen der Abluftkanäle ins Freie, sofern sie aus Platzrücksichten an oder innerhalb der Gebäudemauer hochgeführt werden müssen, sollen ebenfalls trichterförmige Erweiterungen erhalten, damit der Austrittswiderstand verringert wird.

Abb. 118 zeigt eine falsche und Abb. 119 eine richtige Anlage der Frisch- und Abluftkanäle bei einem Turbostromerzeuger. Auf die betrieblichen Schwierigkeiten, die bei einem gemeinsamen Abluftkanal auftreten können, ist besonders hinzuweisen. Sie bestehen darin, daß sich die Maschinen gegenseitig erheblich in der Belüftung beeinflussen können, wenn die im Abluftkanal erzeugten Drücke unterschiedlich sind. Die Maschine mit kleinerem Druck kann unter Umständen vollständig gestört werden. Ähnliches gilt auch für einen gemeinsamen

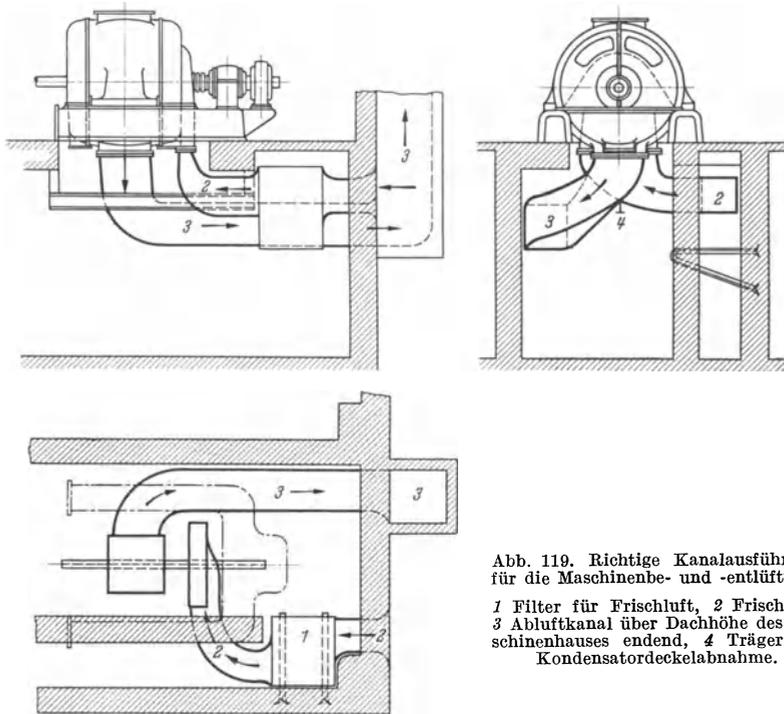


Abb. 119. Richtige Kanalausführung für die Maschinenbe- und -entlüftung.

1 Filter für Frischluft, 2 Frischluft, 3 Abluftkanal über Dachhöhe des Maschinenhauses endend, 4 Träger für Kondensatordeckelabnahme.

Zuluftkanal (Luftwirbelbildungen), ferner für das Zu- und Abschalten von Maschinen also für die Luftregelung. Jede Maschine soll daher besser ihre eigenen Kanäle erhalten und wenn notwendig auch ihre eigene Filteranlage.

Bei Turbostromerzeugern und allen solchen Maschinen, die eine Unterkellerung des Maschinenhausflures notwendig machen, werden die Kanäle in der Regel aus Blechröhren oder in anderer Form aus Eisenblech, Holz mit Gipsverkleidung, Rabitzmauerung, Tonröhren usw. hergestellt und dann im Maschinenhauskeller frei angeordnet. Sind für die dort untergebrachten Kondensationsanlagen (Dampfrohre) und für die Belüftungskanäle nicht getrennte Räume vorhanden, so ist, wie bereits kurz erwähnt, darauf Bedacht zu nehmen, daß hier die Raumtemperatur namentlich im Sommer beträchtlich höher ist als

die Temperatur der Außenluft. Es wird infolgedessen die den Kanal durchstreichende Frischluft gleichfalls auf eine höhere Temperatur gebracht werden, die natürlich nicht so hoch steigen darf, daß von „Kühlluft“ nicht mehr gesprochen werden kann. Ein Mittel zur Abhilfe ist die Umkleidung des Frischluftkanals mit wärmeisolierendem Stoff und die besondere Belüftung des

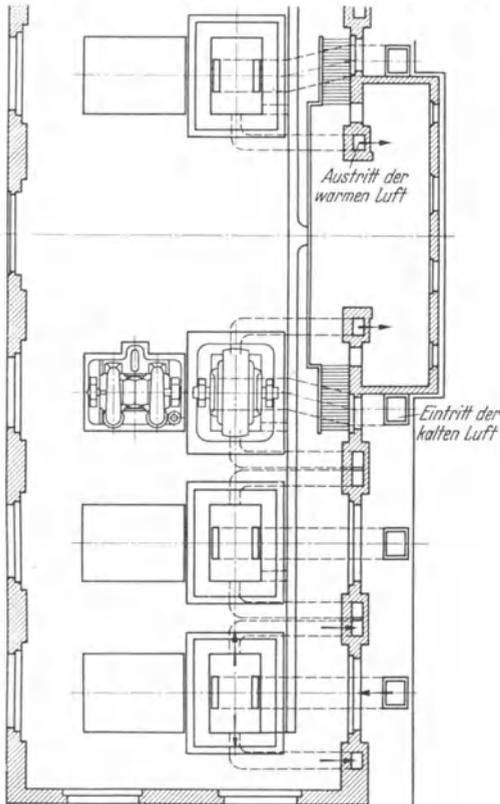
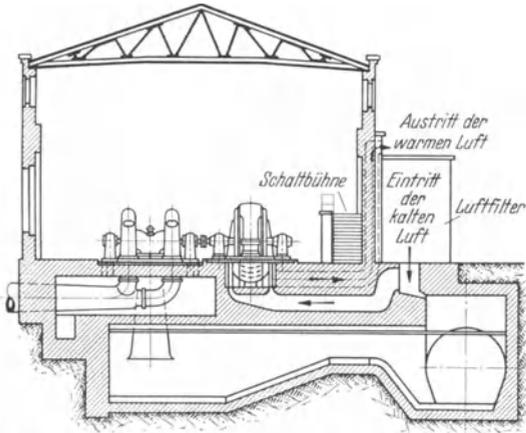


Abb. 120. Wasserkraftwerk mit geschlossenen Maschinen für Selbstbelüftung je 8 MVA, 6 kV, $n = 375$ U/min.

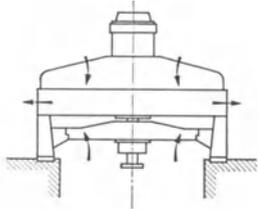
Kellerraumes durch Schraubenlüfter. Auch ein dauerndes Dichthalten muß gewährleistet sein und jede Wasseransammlung sicher verhindert werden (Eindringen von Regen, Schnee, Grundwasser). Gegebenenfalls sind Wasserabscheider oder sonstige Einrichtungen für die Entwässerung vorzusehen.

Bei Wasserkraftmaschinen mit liegender Welle für größere Wassermengen in mittleren Fallhöhen (Francis- und Kaplan-turbinen) sind die Fundamente zumeist für die Stromerzeuger und Turbinen voll ausgenützt. Nach der Unterwasserseite hin wird fast stets kein Raum frei sein, um Luftkanäle einzubauen. Zu- und Abluftkanal werden daher in der Mehrzahl der Fälle auf der Oberwasserseite liegen

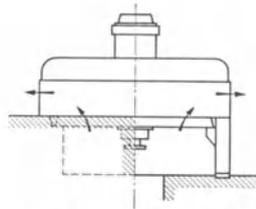
und hier Unterbringungsschwierigkeiten bringen, besonders wenn es sich um große Querschnitte handelt. Das über die Entwurfsbearbeitung nach dieser Richtung Ge-

bei Wasserkraftmaschinen mit liegender Welle für größere Wassermengen in mittleren Fallhöhen (Francis- und Kaplan-turbinen) sind die Fundamente zumeist für die Stromerzeuger und Turbinen voll ausgenützt. Nach der Unterwasserseite hin wird fast stets kein Raum frei sein, um Luftkanäle einzubauen. Zu- und Abluftkanal werden daher in der Mehrzahl der Fälle auf der Oberwasserseite liegen und hier Unterbringungsschwierigkeiten bringen, besonders wenn es sich um große Querschnitte handelt. Das über die Entwurfsbearbeitung nach dieser Richtung Ge-

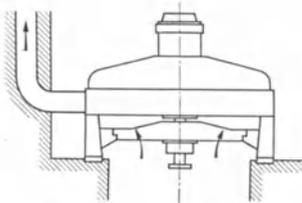
sagte ist ganz besonders zu beachten. Auf eine Ausführung ist bereits hingewiesen worden. Abb. 120 zeigt ein anderes Beispiel, zu dem Einzelheiten nicht weiter zu behandeln sind.



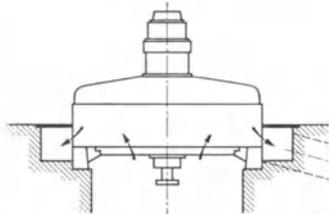
a) Offene Bauart, Frischluft aus dem Turbinenkeller und dem Maschinenraum, Warmluft in den Maschinenraum aus Gehäuserücken.



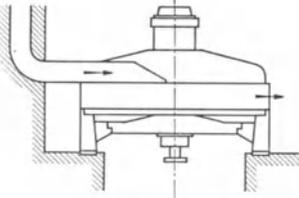
b) Halbgeschlossene Bauart, Frischluft aus dem Turbinenkeller und dem Maschinenraum, Warmluft in den Maschinenraum aus Gehäuserücken.



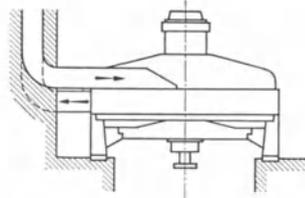
c) Halbgeschlossene Bauart, Frischluft aus dem Turbinenkeller, Warmluft durch Kanals ins Freie. Stromerzeuger auf Füßen.



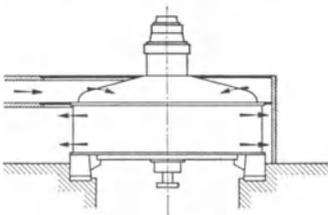
d) Wie c. Stromerzeuger unmittelbar auf Maschinenhausfußboden.



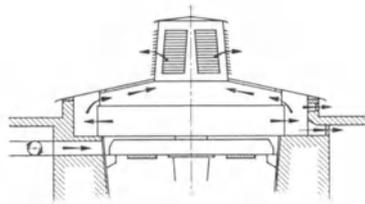
e) Halbgeschlossene Bauart, Umkehr von c. Frischluftzuführung durch Kanal, Warmluft in den Maschinenraum aus Gehäuserücken. Stromerzeuger auf Füßen.



f) Geschlossene Bauart, Frisch- und Abluft durch besondere Kanäle, Stromerzeuger auf Füßen.



g) Geschlossene Bauart, Belüftung wie f. Stromerzeuger unmittelbar auf Maschinenhausfußboden.



h) Geschlossene Bauart, Freiluftausführung. Frisch- und Abluft durch besondere Kanäle.

Abb. 121a bis h. Zusammenstellung der verschiedenen Maschinenbauarten und ihrer Belüftung bei stehender Maschinenwelle.

Bei Wasserkraftanlagen mit Hochdruck-Peltonrädern und Wasserabführung unter dem Maschinenhaus sowie bei der stehenden Welle sind die Ausführungsformen für die Luftzu- und -abführung mannigfaltiger. Sie hängen so stark von dem Aufbau des Maschinensatzes ab, daß auf die Angaben auf S. 165 verwiesen werden muß. In Abb. 121 sind eine Reihe von Belüftungsarten für offene und geschlossene Maschinen dieser Bauart zusammengestellt, für die besondere Erläuterungen hier nicht zu geben sind.

Zur Verhinderung der erwähnten Tauererscheinungen und zur Regelung der Belüftungsanlage sind die Zu- und Abluftkanäle mit verstellbaren Klappen ähnlich der Abb. 116 zu versehen, wobei natürlich auf die richtige Lage der Klappen im Kanal insofern zu achten ist, daß die Luftförderung bei Wiederinbetriebsetzung einer Maschine stets gewährleistet ist. Die Anordnung ist daher so zu treffen, daß beim Abschließen des Kanals gegen die Außenluft gleichzeitig eine Verbindung mit dem Maschinenraum hergestellt wird.

Derartige Abschlußvorrichtungen bestehen in der Regel aus einfachen Blechtafeln, die drehbar gelagert sind oder in Gleitbahnen senkrecht liegen und von Hand mittels Seil- oder Zahnradantrieb, bei zusammengefaßter Steuerung von einer Schaltstelle aus durch Elektromotoren bedient werden. Ihre jeweilige Stellung soll den Maschinenwärtern möglichst unmittelbar bei den betreffenden Maschinen durch einen Stellungszeiger deutlich sichtbar sein.

Die Bedienung der Abschlußklappen muß derart angelegt sein, daß sie ein sofortiges und möglichst schnelles Schließen gewährleistet, um bei einem Brand innerhalb einer Maschine den Frischluftkanal allerschnellstens absperrn zu können. Dadurch kann die Ausbreitung des Feuers in der Maschine selbst eingeschränkt werden.

Das Klappenschließen selbsttätig z. B. von dem Hauptmaschinenschalter und einem in den Nullpunkt des Stromerzeugers bei Drehstrom eingebauten Meßschutz bewirken zu lassen, hat bisher keine befriedigende Lösung gefunden, kann unter Umständen sogar gefährlich werden, wenn durch unvorhergesehene Vorkommnisse eine Betätigung ausgelöst wird. Auch gesunde fremdbelüftete Maschinen können durch die nur kurzzeitig aussetzende Belüftung so hohe innere Temperaturen erreichen, daß Zerstörungen der Wicklungen usw. die Folge sind. Überwachungsgeräte (gut zugängliche und mit Marken für die höchste zulässige Temperatur versehene Temperaturzeiger) in den Kanälen gewähren einen besseren Schutz bei gut beaufsichtigten Maschinenanlagen als der selbsttätige Verschuß.

Die Berechnung der Kanalquerschnitte. Das im Band I Gesagte soll hier ergänzt werden.

Die für den Stromerzeuger erforderliche Luftmenge Q in m^3/s muß vom Maschinenhersteller gleichzeitig mit der Pressung H_M in mm WS, die innerhalb der Maschine auftritt, und dem Betrag, der bei Selbstbelüftung noch innerhalb der Frisch- und Abluftkanäle auftreten darf, H_K , angegeben werden. Nach einem ersten Entwurf der Kanäle ist festzustellen, ob H_K nicht überschritten wird. Ist das der Fall, so müssen

die Kanalabmessungen und die Länge oder die Anordnung der Kanäle geändert werden. Kann trotzdem H_K mit völliger Sicherheit dennoch nicht gewährleistet werden, so ist ein besonderer Lüfter zu verwenden, über den bereits gesprochen worden ist.

Der Querschnitt für einen Frischluftkanal ist:

$$q_F = \frac{Q}{v_F} \text{ m}^2, \quad (52)$$

für einen Abluftkanal:

$$q_A = \frac{Q(1 + \alpha \cdot t_A)}{v_A(1 + \alpha \cdot t_F)} \text{ m}^2, \quad (53)$$

worin v_F bzw. v_A die jeweilige Luftgeschwindigkeit in dem betreffenden Kanal bezeichnet. Im allgemeinen soll bei einer Kanallänge von etwa 10 m (übliche Länge bei einer Dampfturbinenanlage) $v_F \leq 8$ m/s und $v_A \leq 6$ m/s betragen. Der Wert für die Temperatur t_F im Frischluftkanal soll im Sommer naturgemäß möglichst tief gehalten werden, im Winter darf er mit Rücksicht auf Tauerscheinungen innerhalb der Maschine nicht zu tief liegen. Mit $+15^\circ\text{C}$ wird bei der Bemessung der Maschinen gerechnet. Die Temperatur t_A im Abluftkanal richtet sich nach t_F . Mit Werten zwischen $t_A = 50 \div 70^\circ\text{C}$, bei $t_F = +15^\circ\text{C}$ wird man genügend sicher gehen. Bei niedrigerer Außentemperatur ist eine andere Ablufttemperatur zulässig. Hierüber hat der Maschinenhersteller Angaben zu machen. Ob die für q_F und q_A aus Gl. (52) und (53) erhaltenen Werte für die Ausführung verbleiben können, ergibt erst die Ermittlung von H_F und H_A mit Rücksicht auf den Wert H_K .

Für die gesamte Kanalpressung gilt bei Annahme je eines Zu- und Abluftkanales, eines Filters am Anfang und Mündung des Abluftkanales ins Freie:

$$H_K \leq H_{Fi} + 1,293 \frac{v_F^2}{2g(1 + \alpha \cdot t_F)} \cdot (R_F + \sum \zeta_F) \\ + 1,293 \frac{v_A^2}{2g(1 + \alpha \cdot t_A)} \cdot (1 + R_A + \sum \zeta_A) \leq H_F + H_A \text{ mmWS.} \quad (54)$$

Hierin bezeichnet:

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2,$$

$\alpha = 0,003665$ die Ausdehnungsziffer der Luft,

H_{Fi} = den mittleren Gesamtfilterwiderstand in mm WS,

R_F, R_A den Reibungswiderstand im Kanal in m Luftsäule,

$\sum \zeta_F, \sum \zeta_A$ die Summe aller sich nur einmal der Luftbewegung entgegensetzenden Widerstände durch Richtungsänderungen, Querschnittsänderungen, Schieber, Klappen, Drosselungsvorrichtungen und ähnl. in m Luftsäule.

Die kleinsten Werte für R_F bzw. R_A ergeben runde oder quadratische Querschnitte.

Wird H_K überschritten, so ist, wie oben bereits gesagt, q_F und q_A zu ändern, indem für v_F und v_A neue Werte angenommen und R_F bzw. R_A durch Änderung der Länge usw. verändert wird.

Soll ein besonderer Lüfter verwendet werden, so ist seine Größe ebenfalls durch Gl. (54) gegeben, sofern die Maschine ihre eigene Belüftungsarbeit selbst besorgt. Soll auch diese noch vom Lüfter übernommen werden, so hat er eine Gesamtpressung von:

$$H = H_K + H_M^1 \text{ mm WS}$$

zu überwinden, und seine Antriebsleistung ergibt sich aus Gl. (55):

$$N_V = \frac{Q \cdot H}{75 \cdot \eta_V \cdot 1,36} \text{ kW.} \quad (55)$$

η_V Wirkungsgrad des Lüfters in vH .

i) Die Umlaufkühlung¹. Bietet die Anlage der Luftzu- und -abführungskanäle beim Fundamentaufbau Schwierigkeiten, kann also der erforderliche Raum schwer oder nur mit besonders hohen Kosten geschaffen werden, oder ist die Beschaffenheit der Kühlluft so schlecht, daß sie trotz Filterung nicht brauchbar ist, so wird die Umlaufkühlung (Kreislaufkühlung Abb. 124 bis 127) angewendet.

Während beim Luftfilter ständig neue Frischluft der Maschine zugeführt wird, beruht die Umlaufkühlung auf dem Grundgedanken, ein und dieselbe Luftmenge im geschlossenen Kreislauf zu verwenden. Die Luft befindet sich in einer Luftkammer, wird von der Maschine angesaugt, durchströmt sie, wird an einem Kühlkörper vorbeigeführt, gibt an diesen die aufgenommene Wärmemenge ab und steht mit niedriger Temperatur erneut bereit. Als Kühlmittel dient Wasser. Eine Verstaubung oder die Gefährdung der Maschine durch den Gas- und Säuregehalt der Luft ist bei diesem Verfahren nicht möglich. Die Brandgefahr ist gering, da die im umlaufenden Luftstrom enthaltene geringe Sauerstoffmenge ein längeres Feuer nicht aufrechterhalten kann und andere feuergefährliche Stoffe nicht vorhanden sind. Niederschläge in der Maschine bei feuchtem Wetter können nicht auftreten. Die Temperatur der Kühlluft ist unabhängig von Temperatur und Feuchtigkeit der Außenluft und nur abhängig von der Temperatur des Kühlmittels. Für die Kühlwirkung ist das Temperaturgefälle, also der Temperaturunterschied zwischen Kaltwasser — Kaltluft und Warmluft — Warmwasser bestimmend.

Abb. 122 zeigt das Schaubild für den Kühlvorgang, der nach dem Gegenstromgrundsatz durchgeführt wird. Die Größe und Wirkung des Luftkühlers hängt von der Wassertemperatur und der Kühlfläche ab. Erstere wird für die verschiedenen Jahreszeiten gegeben sein, letztere ist bestimmt durch die verfügbare Wassermenge, die Raumverhältnisse und die gewünschten Temperaturunterschiede. Um nicht zu große Abmessungen zu erhalten, wird der Temperaturunterschied

¹ Kühne, H.: Vorschläge zur genauen Festlegung und Prüfung der Leistungsgarantien von Kreislaufkühlern für Turbogeneratoren. ETZ 1929 Heft 43. Großbruchhaus: Luftverluste und Widerstände bei Umlaufkühlanlagen für Turbogeneratoren. Elektr.-Wirtsch. März 1932 Nr. 6. Abba, B.: Luftkühler für elektrische Generatoren. BBC-Nachr. 1930 S. 33. Ringkühler: Bericht des maschinentechnischen Ausschusses der Vereinigung der Elektrizitätswerke. Elektr.-Wirtsch. 1929 Nr. 491/492.

zwischen Wasser und Luft, oder das Temperaturgefälle zwischen Kaltluft und Kaltwasser zu 5° bis 15° C gewählt, wobei noch befriedigende Gesamtverhältnisse erzielbar sind. Wird die nach den VDE-Bestimmungen angenommene Kühlmitteltemperatur für Maschinen von 35° C zugrunde gelegt, und beträgt die Kühlwassertemperatur 25° C, so kann der Luftkühler so bemessen werden, daß ein Temperaturunterschied zwischen Kaltluft und Kaltwasser von $35 - 25 = 10^{\circ}$ C erreicht wird. Liegt also die Kühlmitteltemperatur mit 35° C fest, so richtet sich die Kühlanlage in ihren Abmessungen und in ihren Anlage- und Betriebskosten nach dem gewünschten Temperaturunterschied, der z. B. bei 15° Kühlwassertemperatur und 35° C Kaltluftaustrittstemperatur dann für 10° C Temperaturunterschied ebenfalls festgelegt wird. Einen gewissen

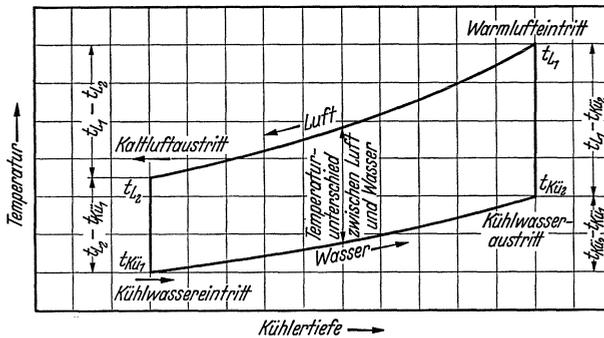


Abb. 122. Kühlerverlauf im wasserdurchflossenen Gegenstrom-Luftkühler.

Spielraum bis 35° C etwa 5° C soll man stets vorsehen, um einer Verschmutzung der Kühlanlage und einer höheren Wassertemperatur Rechnung zu tragen.

Auf Einzelheiten der Berechnung soll nicht näher eingegangen werden. Sie ist Sache des Kühlerherstellers und muß mit dem Maschinenhersteller zusammen festgestellt werden. Der Betrieb hat nur die Angaben über die Wasserverhältnisse zu machen und dabei auf den Belastungsverlauf hinzuweisen. Für das Kühlwasser selbst gelten die Angaben über das Kondensator Kühlwasser bei Dampfturbinenanlagen in Band III/1. Selbstverständlich ist, daß die Kühlwassermenge ständig zur Verfügung steht, ferner Meldevorrichtungen vorhanden sind, die das ordnungsmäßige Arbeiten des Wasserumlaufes überwachen und Störungen sofort anzeigen.

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Kreislaufkühlers in Gegenstrombauweise gilt folgendes.

Bezeichnet:

Q_n die abzuführende Wärmemenge bei der Nennleistung N_n in MW der Maschine in kcal/h,

Q_L die umlaufende Luftmenge bezogen auf 30° und 760 mm QS in m^3/h ,

Q_W die Kühlwassermenge in m^3/h ,

c_p Einheitswärme der Luft bei 60 vH relativer Feuchtigkeit in kcal/kg \cdot $^{\circ}$ C,

γ Raumeinheitsgewicht in kg/m^3 (γ_L bei Luft = $1,0 \text{ kg/m}^3$, γ_W bei Wasser = 1000 kg/m^3),

t_{L1} die Eintrittstemperatur der Warmluft in $^\circ\text{C}$,
 t_{L2} die Austrittstemperatur der gekühlten Luft (Kaltluft) in $^\circ\text{C}$,
 $t_{K\ddot{u},1}$ die Eintrittstemperatur des Kühlwassers in $^\circ\text{C}$,
 $t_{K\ddot{u},2}$ die Austrittstemperatur des Kühlwassers in $^\circ\text{C}$,

so ist die abzuführende Wärmemenge ohne Berücksichtigung der Strahlungs- und Ableitungsverluste:

$$Q_n = 860 \cdot N_n \cdot \left(\frac{100 - \eta_g}{100}\right) \cdot 10^3 \text{ kcal/h}, \quad (56a)$$

die Luftabkühlung:

$$t_{L1} - t_{L2} = \frac{Q_n}{c_n \cdot Q_L \cdot \gamma_L} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (56b)$$

die Wassererwärmung:

$$t_{K\ddot{u},2} - t_{K\ddot{u},1} = \frac{Q_n}{c_p \cdot Q_W \cdot \gamma_W} = \frac{Q_n}{1000 \cdot Q_W} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (56c)$$

und die erforderliche Kühlwassermenge:

$$Q_W = \frac{Q_n}{1000 (t_{K\ddot{u},2} - t_{K\ddot{u},1})} = 860 \cdot N_n \cdot 10^3 \left(\frac{100 - \eta_g}{100}\right) \cdot \frac{1}{1000 (t_{K\ddot{u},2} - t_{K\ddot{u},1})} \text{ m}^3/\text{h}. \quad (56d)$$

Das mittlere Temperaturgefälle ϑ_m nach Abb. 123 zwischen Luft und Wasser ist nicht aus dem arithmetischen Mittel zwischen den Unterschieden der Endtemperaturen zu ermitteln, sondern aus Gl. (56e):

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_a - \vartheta_e}{\ln \frac{\vartheta_a}{\vartheta_e}}, \quad (56e)$$

worin

$$\vartheta_a = t_{L1} - t_{K\ddot{u},2},$$

$$\vartheta_e = t_{L2} - t_{K\ddot{u},1}.$$

In Abb. 123 sind Kennlinien für ϑ_m zusammengestellt.

Bei höheren oder niedrigeren Kühlwassertemperaturen steigen bzw. fallen die Lufttemperaturen praktisch um den gleichen Betrag. Ist bei gleicher Luft- und Wassermenge die Wärmemenge niedriger, die Belastung des Stromerzeugers also geringer als Vollast, so ändern sich sowohl die Werte für Luft- und Wassererwärmung, als auch der mittlere logarith-

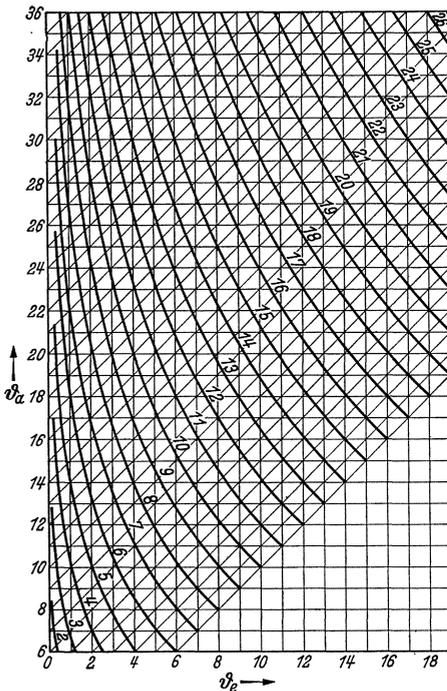


Abb. 123. Kennlinien für mittlere Temperaturgefälle ϑ_m .

mische Temperaturunterschied im gleichen Verhältnis. Der Hersteller des Kühlers hat hierzu für den Betrieb Kennlinien für ϑ_m zur Verfügung zu stellen.

5. Beispiel: Ein 20 MVA Stromerzeuger soll bei $\cos \varphi = 1$ mit Kreislaufkühler arbeiten. Es sind zugrunde zu legen $t_{L1} = 50^\circ$, $t_{Kü,1} = 10^\circ$, $t_{Kü,2} = 15^\circ$, $Q_L = 93\,600 \text{ m}^3/\text{h}$, $\eta_G = 96 \text{ vH}$. Die abzuführende Wärmemenge beträgt:

$$Q_n = 860 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{100 \cdot 96}{100} \right) = 688\,000 \text{ kcal/h.}$$

Bei einer umlaufenden Luftmenge von $Q_L = 93\,600 \text{ m}^3/\text{h}$ und bei $c_p = 0,277$ bezogen auf 1 m^3 bei 60 vH relativer Luftfeuchtigkeit beträgt die Luftabkühlung:

$$t_{L1} - t_{L2} = \frac{688\,000}{0,277 \cdot 93\,600} = 26,5^\circ,$$

somit die Temperatur der Kaltluft bei einer Temperatur $t_{L1} = 50^\circ$:

$$t_{L2} = 50 - 26,5 = 23,5^\circ,$$

die Kühlwassermenge:

$$Q_W = \frac{688\,000}{1000 (15 - 10)} = 137,6 \text{ m}^3/\text{h},$$

mit 10 vH Zuschlag als Sicherheit rd. $150 \text{ m}^3/\text{h}$,

und die Wassererwärmung wie vorausgesetzt:

$$t_{Kü,2} - t_{Kü,1} = 5^\circ \text{ C},$$

sowie schließlich der mittlere \ln -Temperaturunterschied (siehe auch Abb. 123):

$$\vartheta_m = \frac{(50 - 15) - (23,5 - 10)}{\ln \frac{35}{13,5}} = 22,7^\circ \text{ C}.$$

Für den Entwurf einer Luftkühlanlage müssen bekannt sein:

- die Leistung des Stromerzeugers in MW,
- die Verlustleistung, die vom Luftstrom abgeführt werden soll, in kcal/h (Maschinenwirkungsgrad),
- das Luftgewicht (Lufttemperatur, Luftmenge und Druck) in kg,
- die Kühlluftmenge der Maschine in m^3/h ,
- der Luftwiderstand innerhalb der Maschine in mm WS,
- die Kühlwassertemperaturen im Sommer und Winter in $^\circ \text{ C}$,
- die Wasserbeschaffenheit nach Analyse,
- der verfügbare Raum für den Einbau (Raumzeichnung, Aufstellung der Maschine, Platz für die Kühlanlage).

Bei Dampfturbinen wird der Luftkühler zumeist in einer Nische zwischen den Fundamentpfeilern längs der Maschinenachse oder quer zu ihr aufgestellt (Abb. 124). Dabei ist zu beachten, daß die Reinigung des Kondensators nicht beeinträchtigt werden darf. Die Warmluft wird durch einen Kanal aus Blech oder Rabitzwand dem Kühler zugeführt. Das über die Kanaldurchbildung bereits Gesagte gilt auch hier in jeder Beziehung.

Die Luftkammer wird durch Begrenzungswände zwischen den Fundamentpfeilern gebildet. Die Größe der Luftkammer ergibt sich

aus der Luftgeschwindigkeit, die 0,3 bis höchstens 1 m/s nicht übersteigen soll, damit etwa in der Luftkammer befindliches Wasser (Schwitzwasser der Kühlelemente im Winter) nicht mitgerissen werden kann. Ragt der Kondensator in die Luftkammer hinein, so kann seine Kühlfläche mit ausgenutzt werden. Er dient dann auch als Lufttrockner für den in der Kaltluft enthaltenen Wasserdampf. Das Kondenswasser muß besonders aufgefangen und abgeleitet werden. Ist das Kühlwasser für den Kondensator im Winter sehr kalt, so daß auch diese Schwitz-

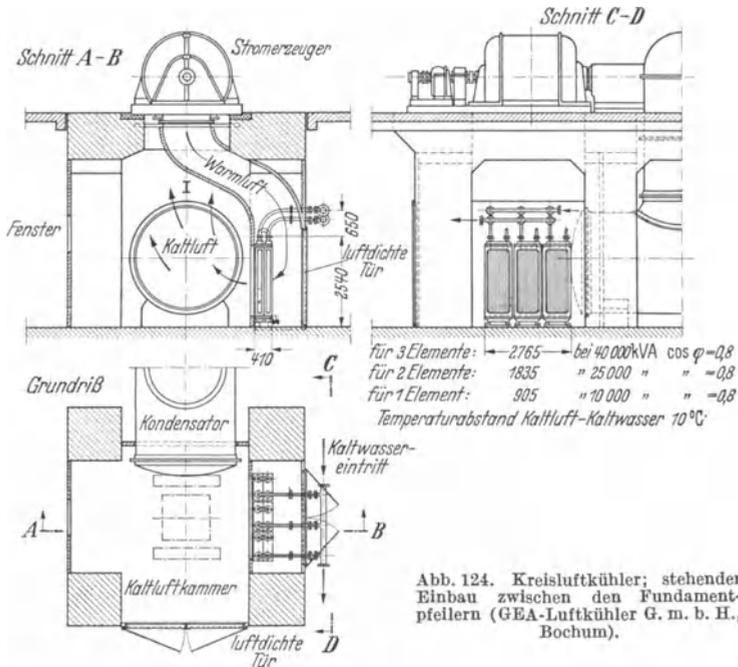


Abb. 124. Kreisluftkühler; stehender Einbau zwischen den Fundamentpfeilern (GEA-Luftkühler G. m. b. H., Bochum).

wasserbildung gefährlich werden kann, so ist der Kondensator zu isolieren.

Die Luftkammer soll glatte Wände erhalten, durch besondere Türen zugänglich sein, ferner durch Fenster beobachtet werden können. Luftdichter Abschluß nach allen Seiten auch für den Anschluß der Luftstutzen der Maschine ist unbedingt erforderlich. Die Ventile der einzelnen Kühlelemente für den Wasserein- und -austritt sollen außerhalb der Luftkammer liegen.

Steht für das Kondensator Kühlwasser Frischwasser zur Verfügung, so wird dieses auch für den Luftkühler verwendet. Die Anlagekosten werden bei entsprechender Wassertemperatur am niedrigsten. Arbeitet die Kondensatoranlage mit Rückkühlung, so bedingt die wesentlich höhere Kühlwassertemperatur größere Luftkühler. Für die Kühlwasserumwälzung wird zweckmäßig die Kondensator-Kühlwasserpumpe benutzt, die entsprechend größer zu bemessen ist. Bei rückgekühltem

Wasser muß geprüft werden, ob im Sommer der Temperaturunterschied im Luftkühler noch ausreicht, um die Luft Eintrittstemperatur für die Maschine zu gewährleisten, oder ob Zusatzkühlwasser erforderlich ist, so daß dann eine Stufenkühlung durchgeführt werden muß.

Das kalte Kesselspeisewasser kann ebenfalls zur Kühlung benutzt werden. Dann werden die durch den Luftkühler aufgenommenen Wärmemengen nutzbringend verwertet. Dadurch steigt der thermische Wirkungsgrad der Dampfanlage. Bei der Durchbildung einer solchen Anlage ist betrieblich größte Einfachheit und leichte, übersichtliche Steuerung zu verlangen, z. B. wenn die Maschine und damit auch ihre Kühlanlage stillgesetzt oder angefahren wird. Zu warnen ist allerdings vor allzu großer Verquickung dieser und ähnlicher Einrichtungen, da sie

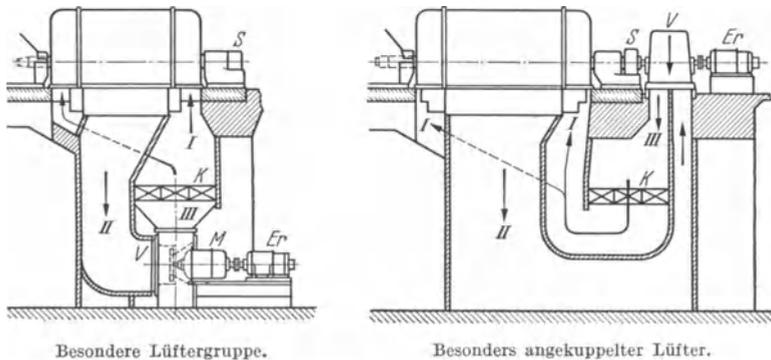


Abb. 125. Turbostromerzeuger für Fremdbelüftung.

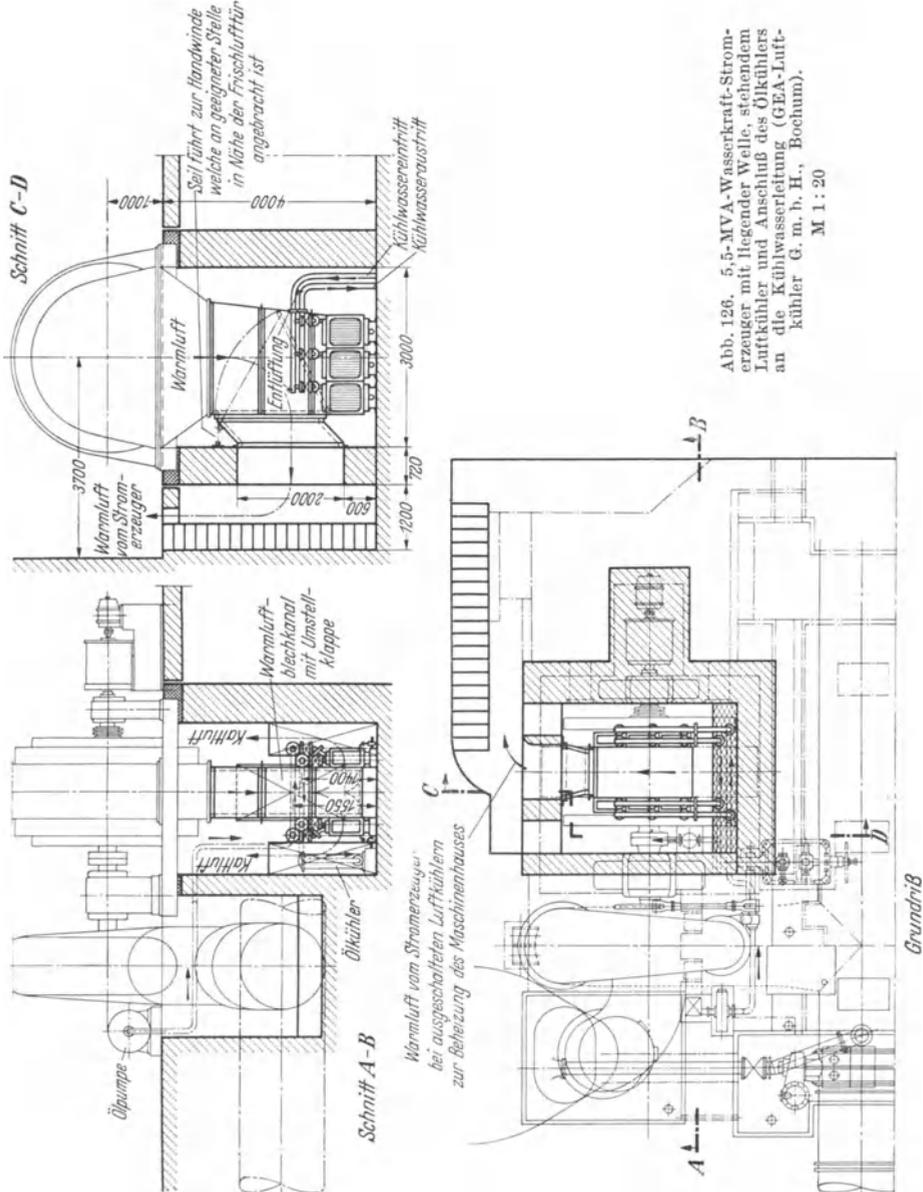
I Kaltluft, *II* Warmluft, *III* zum Kühler, *Er* Erregermaschine, *K* Kühler, *M* Antriebsmotor, *S* Schleifringe, *V* Lüfter.

auch Fehlerquellen darstellen, die vom Betrieb oft sehr störend empfunden werden. Darum sollte beim Entwurf derart zusammengesetzter Anlagen der Betriebsingenieur mit an erster Stelle gehört werden.

Ist im Turbinenkeller der Raum zu beschränkt, dann geht man neuerdings dazu über, Kühler und Maschine zusammenzubauen. Die Teilkühler liegen zu beiden Seiten der Maschine und sind mit dem Maschinengehäuse fest verbunden. Die Warmluft verläßt die Maschine oben, die gekühlte Luft strömt von der Bodenfläche des Kühlers zum Eintrittsstutzen.

Zwei besondere Ausführungsformen von BBC zeigen Abb. 125a und b für fremdbelüftete Maschinen. In Abb. 125a ist der Antriebsmotor für den Lüfter gleichzeitig auch Antriebsmotor für die Erregermaschine, die dann billiger und einfacher wird. Für den Anlauf muß allerdings eine gesicherte Stromquelle vorhanden sein. Es gelten hierfür die gleichen Gesichtspunkte, die beim Erregerumformer erwähnt worden sind. Zu Abb. 125b ist nichts Besonderes zu bemerken. Der Drehstrom-Maschinensatz wird hier besonders lang. In beiden Fällen liegt der Luftkühler im Kaltluftstrom und nimmt damit die Verdichtungswärme des Lüfters auf.

Auch bei Wasserturbinenanlagen werden die Luftkühler immer mehr angewendet, weil die Raumverhältnisse für die Kanäle im Fun-



dament zumeist beschränkt sind. Abb. 126 zeigt den Einbau eines Luftkühlers bei einer 5,5-MVA-Maschine mit liegender Welle und Abb. 127 für eine Maschine mit stehender Welle.

Die jährlichen Betriebskosten einer Luftkühleranlage sind zu meist höher als für die Luftfilteranlage, so daß die Luftkühler nach dieser Richtung nicht ohne weiteres verglichen werden können. Dort, wo auch mit chemisch verunreinigter Luft gerechnet werden muß, werden die Mehrkosten durch die längere Lebensdauer und größere Betriebssicherheit der Maschine aufgewogen.

Für die Beurteilung eines Luftkühlerentwurfes sind bestimmend:

größte Kühlwirkung mit geringstem Raumbedarf für den Kühler und kleinstem Kühlmittelbedarf,

geringster Luftwiderstand des ganzen Kühlers (etwa 15 bis 20 mm WS), Vermeidung von Luftwirbelbildung auf beiden Kühlerseiten,

Aufteilung des Kühlers auf einzelne Elemente, die zur bequemen Reinigung und Instandsetzung leicht abschaltbar sein müssen und ohne Schwierigkeit ausgefahren werden können, ohne den Betrieb des Kühlers vollständig zu unterbrechen,

leichte Zugänglichkeit zu allen Flanschen und Ventilen,

geeignete Baustoffe für die Kühlelemente bei schlechter Wasserbeschaffenheit und gegen die Rostgefahr innen und außen,

Prüfdruck der fertigen Kühlelemente, um mit voller Sicherheit gegen Rohr- und Flanschenbruch geschützt zu sein, der für die Maschine die schlimmsten Folgen haben könnte.

Für die Überwachung der Kühlanlage sind Meßgeräte erforderlich. Die Eintritts- und Austrittstemperatur der Maschinenluft ist durch schreibende Ferntemperaturzeiger, die Kalt- und Warmwassertemperatur durch Temperaturanzeiger mit Meldevorrichtung zu messen. Das ordnungsmäßige Arbeiten des Wasserumlaufes wird zweckmäßig durch Prüfröhrleitungen festgestellt, die von den Hauptrohrleitungen abzweigt werden, kleine Wasserproben sichtbar ausfließen lassen und im Maschinenraum an gut beobachtbarer Stelle anzulegen sind. Venturirohre für die Umlaufwassermenge sind ebenfalls sehr zweckmäßig, um Rohrverstopfungen sofort feststellen zu können. Die Meßgeräte für eine Maschine sollen in der Nähe der Maschine zusammengefaßt sein, damit die Maschinenbedienung sich ständig von dem einwandfreien Arbeiten der Kühlanlage überzeugen kann.

k) **Besondere Kühlmittel.** Luft ist kein guter Wärmeleiter. Außerdem kann der Sauerstoff der Luft allmählich zerstörend auf die Isola-

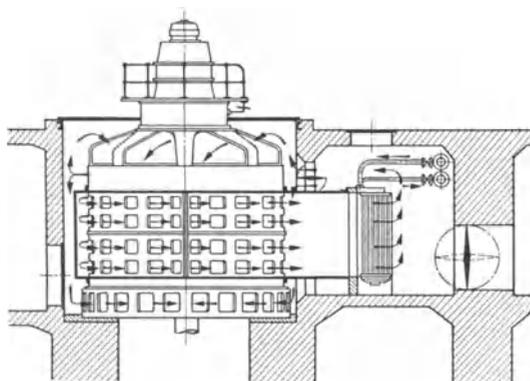


Abb. 127. Wasserkraftstromerzeuger mit stehender Welle; Umlaufkühlung.

tion wirken, wenngleich hiergegen alle möglichen Vorbeugungsmaßnahmen bei der Herstellung der Isolierstoffe getroffen werden. Aus diesen Gründen hat man sich schon seit Jahren bemüht, die Luft durch ein besonderes Gas zu ersetzen und Versuche mit Wasserstoffgas durchgeführt. In Deutschland hat sich die Wasserstoffkühlung bisher nicht einführen können. In Amerika ist sie vereinzelt bei großen Maschinen zur Anwendung gekommen¹.

Die Vorteile der Wasserstoffkühlung liegen darin, daß das Einheitsgewicht (spez. Gewicht) des Wasserstoffes etwa $\frac{1}{14}$ des der Luft beträgt, und die Wärmeleitfähigkeit etwa siebenmal größer, sowie die Kühlwertigkeit d. h. die Fähigkeit, von Oberflächen Wärme abzuleiten, etwa 1,5 mal größer ist als bei Luft. Dazu kommt das Fehlen von Sauerstoff, daraus die größere Haltbarkeit der Isolation und die Beseitigung jeder Brandgefahr. Die inneren Luftreibungsverluste werden infolgedessen bis auf etwa $\frac{1}{10}$ geringer und die Ausnützung der Baustoffe bei kleineren Temperaturen durch die größere Kühlwertigkeit höher.

Bei den amerikanischen Versuchen wurde eine zehnpromzentige Ersparnis an Luftreibungsverlusten gegenüber der Luftkühlung festgestellt. Das ergab bei einer 25-MVA-Maschine eine Dampfersparnis von etwa 18,4 vH, also eine sehr beachtliche wirtschaftliche Verbesserung. Ferner konnten auch die Temperaturen im Ständer und Läufer herabgesetzt werden.

Als besondere Nachteile dieser Kühlungsart sind zu nennen zunächst die Schwierigkeit der Abdichtung an den Wellendurchtritten und an allen Flanschverbindungen. Bei Vermischung mit Luft unter etwa 90 vH Volumeneinheiten Wasserstoff bildet sich ferner Knallgas; es besteht also die Gefahr von Zerknallen. Infolgedessen muß das Maschinengehäuse druckfest ausgeführt werden und zweckmäßig stets mit einem Gasgemisch von mindestens 98 vH Wasserstoff gefüllt sein. Letzteres bedingt, daß das Maschinengehäuse innen ständig unter Überdruck steht, Wasserstoffverluste sofort ersetzt werden müssen, und eine ständige Überprüfung von Gasdichte und Gasdruck notwendig ist. Weiter muß das Lager- und Dichtungskühlöl fortgesetzt von dem eingedrungenen Wasserstoff gereinigt werden, was betrieblich recht umständlich ist. Bei Maschinenstillstand muß das Wasserstoffgas abgelassen werden, und vor Inbetriebnahme ist die Maschine mit Stickstoff auszublasen, bevor sie neu mit Wasserstoffgas gefüllt werden kann. Zu diesen betrieblichen Nachteilen kommt noch die eigentliche Wasserstoffherstellung und die Stickstoffbeschaffung.

Nach deutschen Untersuchungen ist die Verteuerung der Maschine durch das druckfeste Gehäuse zusammen mit den betrieblichen Nachteilen wirtschaftlich so wesentlich, daß der mit der Wasserstoffkühlung erzielten Wirkungsgradverbesserung zusammen mit der Leistungssteigerung auf gleiche Temperaturverhältnisse bezogen keine so überragende Bedeutung beizumessen ist, um die Einführung auch in Deutschland zu betreiben. Zudem ist die Wasserstoffkühlung hinsichtlich der Maschinen-

¹ Der erste wasserstoffgekühlte Turbogenerator im Betrieb. ETZ 1938 Heft 36 S. 969. Leukert, W. Dr.-Ing.: Wasserstoffgekühlte Turbo-Stromerzeuger. Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 333 und Elektrotechn. u. Maschinenb. 1939 S. 528.

bauart und der aus dieser folgenden Raumverhältnisse nur für Turbomaschinen praktisch geeignet.

Da in Deutschland die Grenzleistung der Turbostromerzeuger mit $n = 3000$ U/min bei 120 000 kW liegt, kann durch die Wasserstoffkühlung nur eine Steigerung bis auf 150 000 kW erzielt werden. Maschinen dieser Einzelleistung kommen aber für Deutschland kaum in Frage. In Amerika liegen die Grenzleistungen mit $n = 3600$ U/min bei etwa 150 000 kW. Hier ist eine Leistungssteigerung bis fast zum doppelten Wert möglich.

6. Der Aufbau der Gleichstrommaschine.

Da Gleichstrommaschinen namentlich größerer Leistungen heute immer mehr in den Hintergrund treten, können die Einzelheiten über den mechanischen und elektrischen Aufbau dieser Maschinengattung, soweit sie für Bestellung und Betrieb von Bedeutung sind, kurz behandelt werden.

Die Stromwendung bedingt, daß die induzierte Wicklung im umlaufenden Teil der Maschine (Anker, Läufer) unterzubringen ist. Damit ist die Höhe der Maschinenspannung und die Einzelleistung der Maschine nach dem Ankerstrom an bestimmte Grenzen gebunden. Voraussetzung für ein einwandfreies Arbeiten ist weiter, daß die Stromwendung bei allen Belastungen funkenfrei erfolgt.

Die Drehzahl ist bei der Gleichstrommaschine in weiten Grenzen frei wählbar. Sie ist mit der Drehzahl der Antriebsmaschine entsprechend abzustimmen, um für beide die wirtschaftlichste Ausführung zu erhalten. Der Entwurfsingenieur hat hier nur Untersuchungen über Abmessungen, Gewichte, Raumbedarf, Preis und Wirkungsgrad anzustellen.

Bei Drehzahlen über 1000 U/min wird der Läufer nach den baulichen Gesichtspunkten für Synchron-Turbomaschinen durchgebildet. Es gilt dafür sinngemäß das bei dieser Maschinengattung Gesagte.

Die Magnetpole, die zusammen mit dem Gehäuse den Ständer (Magnetgehäuse, Magnetgestell) bilden, werden geschichtet hergestellt. Die Schichtung hat den Vorteil, daß einerseits die zusätzlichen Verluste im Poleisen vermindert werden, andererseits gewährt sie größere Sicherheit hinsichtlich der gleichmäßigen Baustoffbeschaffenheit und der Gleichwertigkeit jedes Poles und ermöglicht dadurch die Vermeidung von Ausgleichströmen.

Beim Anker ist zu beachten, daß sich in demselben keine großen Gewichte unterbringen lassen. Verlangt die Antriebsmaschine (Wasserturbine, Gasmotor) ein bestimmtes Schwungmoment, das nicht an sich mechanisch bereits im Anker vorhanden ist, so muß ein Zusatzschwungrad benutzt werden.

Bei Turbostromerzeugern ist ferner die entsprechende Ausbildung des Stromwenders mit den Bürsten, die Auswuchtung des Ankers, die Belüftung von Anker und Magnetwicklung von besonderer Bedeutung. Infolge der hohen Drehzahlen und der dadurch bedingten gedrängten Abmessungen aller Teile sind die natürlichen Abkühlungsverhältnisse

sehr schlecht. Es muß daher auch bei Gleichstrom-Turbostromerzeugern unter Umständen die Kapselung der Maschine und die besondere Eigenlüftung angewendet werden.

Hinsichtlich Lager und Grundplatte wird auf das bei der Synchronmaschine Gesagte verwiesen.

[7. Der Aufbau der Synchronmaschine.

Dieser weicht von dem der Gleichstrommaschine vollständig ab. Der Ständer trägt hier die induzierte Wicklung, der Läufer die Erregerwicklung bzw. die Magnete. Bei Drehzahlen bis 1000 U/min wird die Schenkelpolbauart mit ausgeprägten Polen, bei $n = 1500$ und 3000 U/min die Turbobauart gewählt. Der Aufbau des Ständers ist bei beiden Maschinengattungen abgesehen von den räumlichen Ausmaßen grundsätzlich gleich, der des Läufers dagegen vollständig abweichend.

Um die jedesmaligen Unterschiede leicht zu erkennen und Wiederholungen von Einzelheiten zu vermeiden, erfolgt die Behandlung zusammen von Ständer, Läufer, Gehäuse usw. stets erst für die Schenkelpol- und dann für die Turbomaschine, bei ersterer mit liegender Welle. Die Maschine mit stehender Welle wird besonders besprochen.

Bei Maschinen kleiner Leistung bis etwa 1 MVA, Drehzahlen zwischen 500 und 1000 U/min und Spannungen bis etwa 3 kV sind nur unwesentliche Abweichungen in den Bauformen der verschiedenen Hersteller vorhanden. Man hat bei solchen Maschineneinheiten auf besondere Einzelheiten nicht in dem Maß zu achten wie bei den großen Stromerzeugern. Diese kleinen Maschinen werden je nach ihrer Größe und der Art des Antriebes mit Lagerschildern oder mit Stehlagern ausgeführt. Für die Schmierung der Lager kommt die Ringschmierung zur Anwendung. Der Antrieb erfolgt entweder unter Zwischenschaltung einer Kupplung unmittelbar von der Antriebsmaschine oder durch Riemenübertragung, wobei im letzteren Fall je nach der Größe der Maschine und der Drehzahl die Riemenscheibe entweder auf den Wellenstumpf fliegend aufgesetzt oder noch durch ein drittes Lager abgestützt wird (Dreilagerausführung). Das im Band III/1 über Achsenentfernung Gesagte ist zu beachten. Bei kleineren Drehzahlen und unmittelbarem Zusammenbau mit der Antriebsmaschine wird die Einlagerbauart unter Umständen notwendig, oder es werden auch Welle und Lager vom Hersteller der Antriebsmaschine geliefert. Näheres ist bei den Antriebsmaschinen bereits erörtert worden. Diese letztere Bauart also ohne Lager und Welle wird zumeist bei Diesel- und Gasmaschinenantrieb gewählt. Es ist dann Aufgabe des Antriebsmaschinenherstellers, die Wellenstärke zu bestimmen, um Betriebsstörungen durch Wellendreherschwingungen sicher zu vermeiden.

Der Ständer (Stator, ruhender Teil) besteht aus dem aktiven Eisenkörper und einem zur Aufnahme desselben dienenden Gehäuse. Der Eisenkörper, auch Ankerring genannt, wird aus dünnen, einseitig mit Papier beklebten hochlegierten Dynamoblechen¹ mit möglichst geringem

¹ VDE 0522/1914 Vorschriften für die Prüfung von Eisenblech.

spezifischen Verlust, etwa 1,8 bis 2,0 W/kg, und hoher Magnetisierbarkeit zusammengesetzt, um die Wirbelstromverluste zu verringern. Diese Bleche erhalten entweder geschlossene Ringform bei kleinen oder Segmentform bei allen größeren Maschinen, die dann so aufeinander geschichtet werden, daß sich die einzelnen Lagen überlappen. Das vollständige Blechpaket wird durch starke Druckplatten und durch isolierte Stahlbolzen zusammengehalten und mit dem Gehäuse verschraubt.

Zur Erzielung einer guten Wärmeabführung aus dem Ständerinnern und der in diesem liegenden Wicklungen sind die Bleche, wie in Abb. 105 und 107 gezeigt, in einzelne Pakete unterteilt, die durch eingelegte Stege voneinander getrennt werden. Dadurch werden die Luftkanäle gebildet, durch welche die vom Läufer angesaugte oder auf andere Weise eingeführte Kühlluft hindurchgetrieben wird. Je länger das Blechpaket ist, um so größer ist die Anzahl der Luftschlitze. Bei großen Turbomaschinen (Abb. 107) erhält der Ständer neben diesen radialen Luftschlitzen auch noch Längskanäle. Über die Belüftung des Maschineninnern ist bereits gesprochen worden. Von ihrer richtigen Durchbildung hängen Größe, Leistungsfähigkeit, Lebensdauer, Beaufsichtigung und Reinigung der Maschine ab.

Die Ständerwicklung liegt in Nuten im Blechpaket, die entweder offen, halbgeschlossen oder geschlossen hergestellt werden. Die Entscheidung über die Nutenform muß dem Hersteller überlassen bleiben. Maßgebend dafür sind neben rein elektrischen Verhältnissen aber auch Gesichtspunkte, die betrieblich von Bedeutung sind, und zwar beziehen sich diese in der Hauptsache auf die Forderung des besten Wirkungsgrades, der geringsten Geräuschbildung und des leichten Auswechslens einzelner Spulen. Auf letzteres hat der Betriebsingenieur in erster Linie zu achten und hierzu Erläuterungen des Maschinenherstellers zu fordern, besonders wenn es sich um große Maschinen für höhere Spannungen handelt.

Bei der offenen Nut (Abb. 128) werden Wirkungsgrad und Erwärmungsverhältnisse gegenüber den anderen Nutenformen ungünstiger, und es kann sich unter Umständen ein stärkeres Geräusch beim Lauf zeigen (sog. Heulen). Auch der Verlauf der Spannungskennlinie erfordert eine besondere Polausbildung. Demgegenüber steht der große Vorteil der leichten Spulenauswechslung, die um so größere Bedeutung besitzt, je länger das Blechpaket also die Spule ist. Durch Entfernen eines oder mehrerer Pole des Läufers kann auf einfache Art der erforderliche Platz für die Herausnahme der beschädigten Spule oder des Wicklungsstabes geschaffen werden. Die Zähne der äußeren Bleche, die unter dem Einfluß des wechselnden magnetischen Feldes in dauernde Schwingungen versetzt werden, sind durch starke, genügend weit heruntergezogene Druckplatten (Abb. 129) so zu schützen, daß sie nicht mit der Zeit abspringen und dann zu sehr gefährlichen Wicklungs-

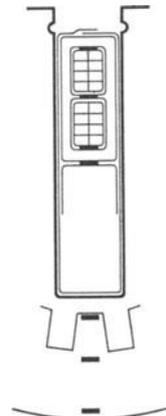


Abb. 128. Offene Nut mit Wicklung und Temperatur-Meßelementen.

verletzungen Anlaß geben können¹. Diese Druckplatten werden entweder ganz aus unmagnetischem Baustoff (Bronze mit Messingfingern) hergestellt oder mit eingeschobenen unmagnetischen Kappen versehen, um die Streuungsverluste zu verringern (Abb. 130 a/b). Zur Beseitigung der elektrischen Nachteile der offenen Nuten werden sie durch seitlich eingeschobene Federn oder Keile aus unmagnetischem Baustoff oder auch durch Eisenkeile besonderer Durchbildung verschlossen, womit Verringerung der Streuungsverluste erreicht werden soll.

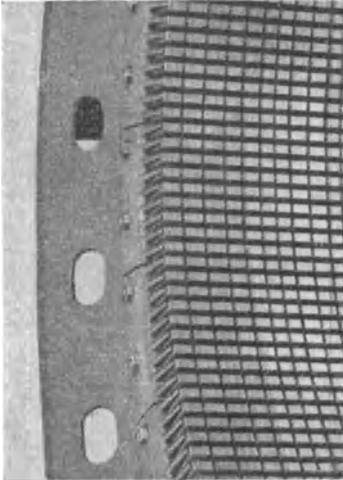


Abb. 129. Ständerblechpaket mit offenen Nuten, Preßplattenschutz der äußeren Blechzähne.

Die halb- und ganz geschlossene Nut vermeidet die vorgenannten Nachteile der offenen Nut, hat aber eine umständliche Wicklungsaustauschung zur Folge, weil hier der Stab oder die Spule eingeschoben werden muß (Abb. 131 und Abb. 135). Auch bei der halbgeschlossenen Nut müssen die äußeren Zähne durch Druckplatten gesichert werden.

Höhenlage der Welle über dem Maschinenhausfußboden (selten über 1 bis 1,5 m) der untere Teil des Ständers in das Fundament tief einge-

Bei langsam laufenden Maschinen muß infolge des großen Gehäusedurchmessers und der notwendigen geringen

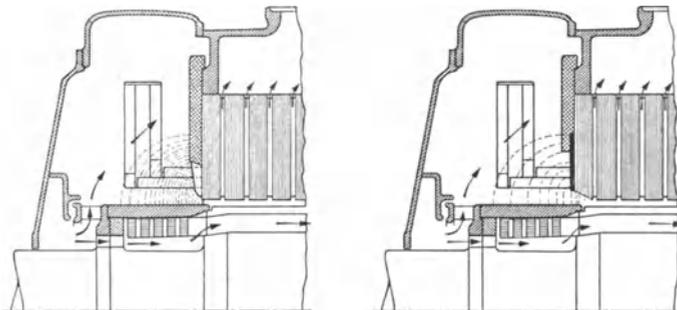


Abb. 130a und b. Belüftung und Streufluß des Wickelkopfes, sowie Deckplatte des Ständerblechpaketes bei einem Turbostromerzeuger ohne und mit besonderer Isolierung und Abtropfung des Blechpaketes.

lassen werden. Dadurch wird die Zugänglichkeit zu den Wicklungen in der unteren Ständerhälfte für Besichtigung, Reinigung und Instandsetzung sehr erschwert. Um diesem Übelstand zu begegnen, empfiehlt es sich, den Ständer im unteren Teil noch auf Rollen abzustützen, um

¹ Braun: Siehe Fußnote S. 111.

ihn nach Entfernen der seitlichen Gehäusefüße so drehen zu können, daß der Unterteil nach oben zu liegen kommt (Abb. 132). Dann ist die Wicklungsbesichtigung und -auswechslung ohne weitere Zerlegungsarbeiten durchführbar, und das Herausheben des Läufers kann vermieden werden. Der Mehrpreis für diese etwas teure Bauart wird durch die leichtere und bequemere Einbauarbeit und durch die erzielbare Zeitersparnis bei Instandsetzungen (Berücksichtigung des Ausfalles der Stromlieferung) als ausgeglichen angesehen werden können.

Die Isolierung der Wicklung richtet sich nach der Höhe der Spannung und muß auch auf die Überspannungen Rücksicht nehmen, wenn keine Umspanner oder Überspannungsschutzgeräte im Maschinenstromkreis liegen (Sprungwellen). In den REM sind besondere Normen für die elektrische Beanspruchung der verschiedenen Isolationsbaustoffe und für die Wicklungsproben aufgestellt.

Ist kein Überspannungsschutz vorhanden, dann sind die Eingangswindungen verstärkt zu isolieren und unter Umständen mit vergrößertem Abstand der Eingangslage auszuführen. Auch bei den Nullpunktsenden einer in Stern geschalteten Wicklung wird diese verstärkte Isolation gerne angewendet, oder es wird der Nullpunkt aufgelöst aus der Maschine herausgeführt und außerhalb des Gehäuses zusammengeschlossen. Bei Hochspannungsmaschinen, die unmittelbar auf Freileitungen arbeiten, ist das besonders zu beachten.

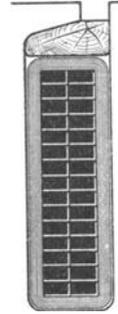


Abb. 131. Schnitt durch eine Stabwicklung in halbgeschlossener Nut.

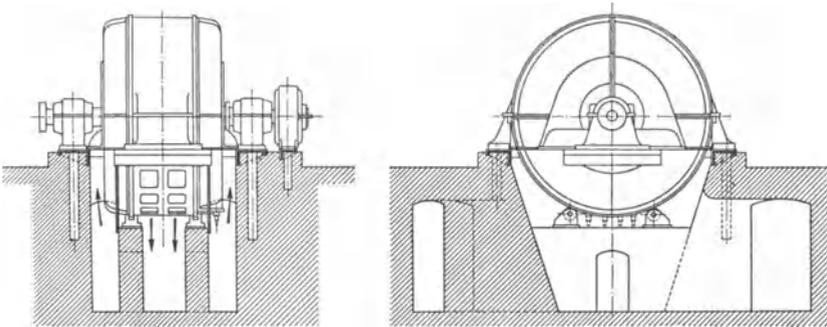


Abb. 132. Schenkelpol-Synchronstromerzeuger mit drehbar gelagertem unteren Gehäuseteil.

Hinsichtlich der Ausführung der Wicklung ist zwischen der Stab- und der Schablonenwicklung (Formwicklung, Spulenwicklung) zu unterscheiden. Mit Rücksicht auf die Verluste und die Erwärmung ist allgemein zu fordern, daß möglichst geringe Strombelastung/mm² Querschnitt (kleine Stromdichte) gewählt wird.

Bei der Stabwicklung, die bei halb- und ganz geschlossener Nut Verwendung finden kann, besteht der Wicklungsteil in der Nut aus ein

oder mehreren massiven Kupferstäben (Abb. 133). Bei größeren Maschinen mit Stabquerschnitten über 300 mm^2 entstehen in diesen massiven Kupferstäben

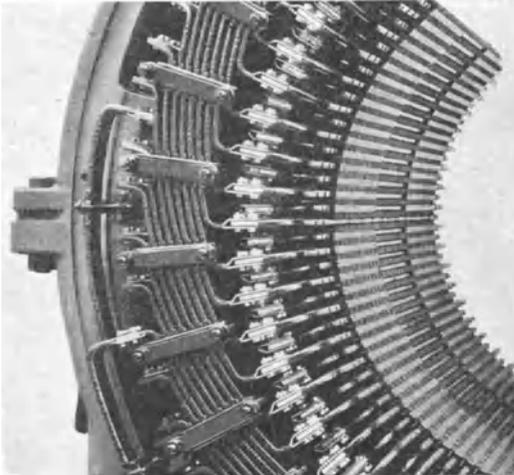


Abb. 133. Ständer eines Drehstrom-Synchronstromerzeugers mit Stabwicklung.

Wirbelströme, die aus der ungleichmäßigen Verteilung der Feldstärke innerhalb der tiefen Nuten herrühren. Sie verringern den Wirkungsgrad und können durch Erhitzen der Leiter zu Wicklungsschäden führen. Aus diesen Gründen werden besondere Leiterformen angewendet, von denen die bekannteste der BBC-Röbelstab ist (Abb. 134), bei welchem der Leiter aus einer großen Zahl von

gegeneinander durch Glimmer isolierte Parallelleiter mit kleinem Querschnitt besteht. Jeder Teileiter ist je mit einer Kröpfung versehen, welche ihn um 360° verdrillt oder

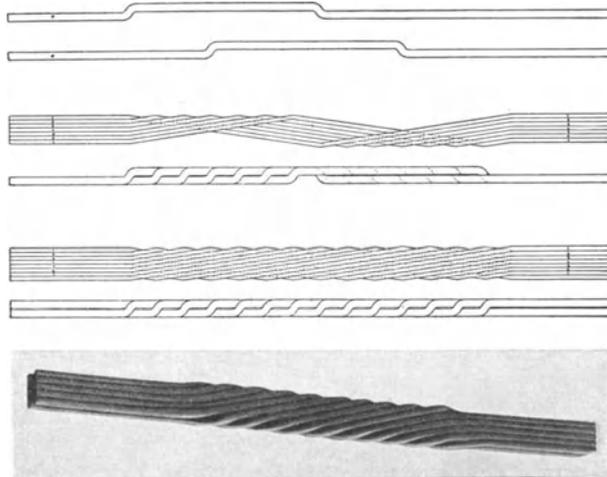


Abb. 134. Versellter Brown-Boveri-Stab für hohe Stromstärken (Röbelstab).

verschränkt erscheinen läßt. Alle Teileiter zusammen sind so zu einem Stab verbunden, daß jeder einzelne Teileiter einmal durch jede Stelle

des Nutenquerschnittes hindurchgeführt wird, wobei er diese Lage innerhalb der Eisenlänge auf der gleichen Streckenlänge einnimmt. Durch diese Anordnung wird jeder Einzelstab genau der gleichen Induktionswirkung ausgesetzt, so daß keine Wirbelstrombildung auftreten kann. Über solche Einzelheiten sollte sich der Besteller ebenfalls unterrichten lassen.

Da bei längeren Stäben das Herausziehen eines bereits seit langer Zeit im Betrieb gewesenen Stabes oft Schwierigkeiten bereitet, ist eine entsprechend ausgebildete halbgeschlossene Nut vorteilhaft, um dieses Ausbringen zu erleichtern. Abb. 131 und 135 zeigen hierfür ein Beispiel. Auf der durchgehenden Nutenseite kann der Stab in der Nut mit Hilfe eines Sonderwerkzeuges gelockert werden.

Die Stabwicklung hat ihr begrenztes Verwendungsgebiet nach Länge des Blechpaketes, Stromstärke und Höhe der Spannung.

Die Verbindungen außerhalb des Blechpaketes bestehen aus kräftigen, aufgelöteten, aufgeschweißten oder angeschraubten Kupferbändern, die durch Isolierstücke (getränktes Holz) voneinander und von dem Gehäuse getrennt werden (Abb. 133).

Die Schablonenwicklung (Spulenwicklung) ist vielseitiger verwendbar, besonders bei höheren Spannungen der Stabwicklung vorzuziehen. Die Drähte werden auf Schablonen gewickelt und können im ganzen besonders vorzüglich isoliert und geprüft werden. Die Spule wird vor dem Einlegen in die Nuten vollständig fertiggemacht und verlangt zumeist offene Nuten. Bei kurzem Blechpaket kann die Spule auch eingeschoben werden (Abb. 135).

Bei allen Spannungen über 3 kV wird die Asphaltierung der Wicklung angewendet, die darin besteht, daß jeder Stab oder jede fertig gewickelte Spule mit besonderer Asphaltmasse getränkt, im Trockenofen gebacken und erst dann mit Mikanit fest umpreßt wird. Diese Wicklungsausführung hat gegenüber der einfachen Wicklungsisolierung eine Reihe von Vorteilen. Wegen der besseren Wärmeleitung der asphaltierten Wicklung kann die Maschine besser ausgenutzt werden, die Drähte liegen fester in den Spulenhülsen und sind allen mechanischen Beanspruchungen bei Erschütterungen und Stromstößen sicherer gewachsen. Das Eindringen von Feuchtigkeit und säurehaltiger Luft in



Abb. 135. Eingeschobene Spulenwicklung für 6 kV; halbgeschlossene Nuten.

die Spulen, sowie die Zersetzung durch Glimmentladungen (Ozonisierungsgefahr, Bildung salpetriger Säure) ist nicht möglich. Um das Nutzen-

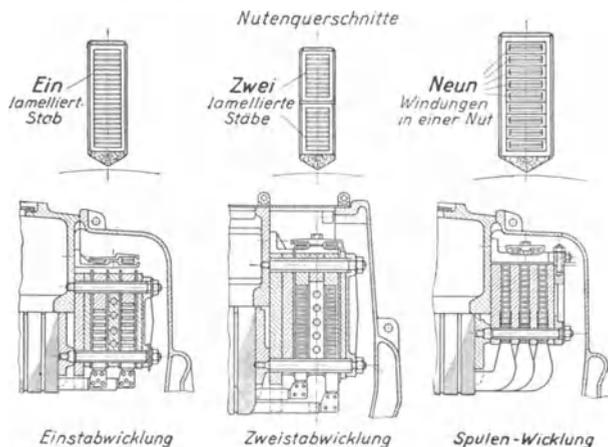


Abb. 136. Nutenquerschnitte und Wickelkopfabsteifungen für verschiedene Wicklungsformen (AEG).

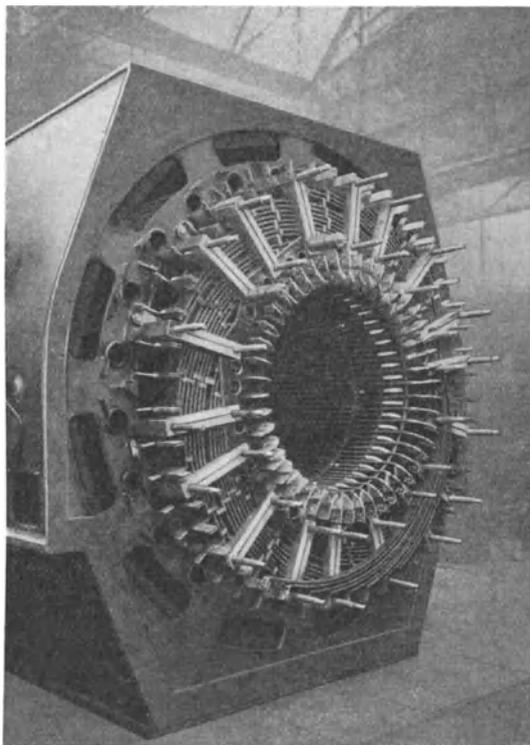


Abb. 137. Ständer eines Drehstrom-Turbostromerzeugers mit halbfertiger Wickelkopfversteifung; Blechgehäuse (SSW).

glimmen bei hoher Spannung zu verhüten, wird die Hülse durch besondere Mittel leitend gemacht und so das gleiche erreicht wie durch einen Glimmschutz an den Wicklungsköpfen (siehe weiter unten).

Eine Forderung von besonderer Bedeutung hinsichtlich der Wicklungsausführung erstreckt sich auf die Befestigung der Wicklungsköpfe, d. h. derjenigen Teile der Wicklung, der aus dem Blechpaket beiderseitig heraustritt. Diese Wicklungsteile müssen ebenfalls sehr sorgfältig isoliert und gegen die mechanischen Beanspruchungen durch die Kurzschlußkräfte sicher gehalten wer-

den¹. Über diese Kurzschlußbeanspruchungen wird im 13. Kap. eingehend gesprochen. In Abb. 136 sind einige Ausführungsformen der AEG zusammengestellt. Abb. 137 zeigt den Ständer eines Drehstromturboströmerzeugers in halbfertigen und Abb. 138 in fertigem Zustand, woraus die Wicklungsversteifung ebenfalls gut zu ersehen ist.

Bei Maschinen für hohe Spannungen muß ferner dafür gesorgt sein, daß Überschläge und Durchschläge an den Austrittsstellen der Wicklung aus dem Blechpaket durch abgelagerten leitenden Staub auch nach längerer Betriebszeit nicht eintreten. Die besondere Bandisolierung an diesen Stellen (Abb. 139) bis auf die Hülse gibt längere Wicklungsköpfe und damit Schwierigkeiten in der sicheren mechanischen Absteifung. Elektrisch zuverlässiger ist die Führung dieser Bandwicklung unter der Hülse, bei der dann der Wicklungskopf kürzer wird.

In der Nähe dieser Austrittsstellen und an den Kanten der Zähne und Preßfinger besonders bei Hochspannung können ferner bei ungünstiger Feldverteilung Glimm- und Büschelentladungen auftreten, die die Spulenisolation gefährden. Um dieses zu vermeiden, wird bei Spannungen von 10 kV aufwärts die Spule beim Austritt aus dem Eisen noch mit einem Glimmschutz² versehen, für den die Hersteller ihre besonderen Ausführungsformen besitzen. In der Regel besteht ein solcher Glimmschutz aus einer enganschließenden leitenden Umhüllung aus Stanniol oder Metallfolie, die durch einen Überwurf aus leitendem Baustoff geschützt und mit dem Eisenkörper verbunden wird. Dadurch wird die Spule an ihrer Austrittsstelle auf das Potential des Ständers also auf das Erd-

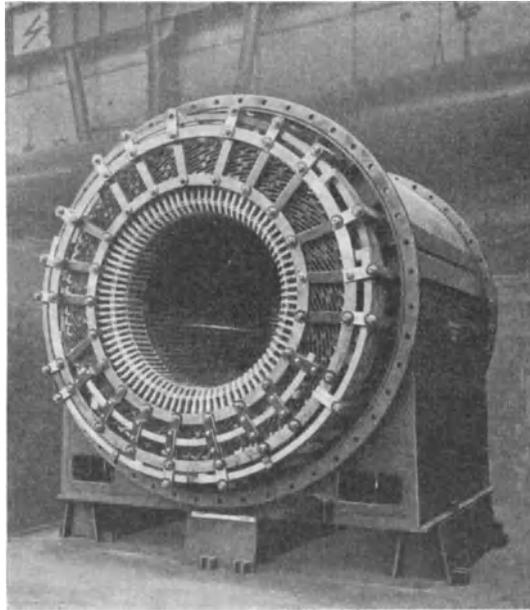


Abb. 138. Ständer eines Drehstrom-Turbostromerzeugers mit fertiger Versteifung der Wickelköpfe (SSW).

¹ Laßwitz, E.: Mechanische Wirkung von Kurzschlüssen auf Läufer und Ständer der Wechselstromgeneratoren. Bergmann-Mitt. 1928 S. 182.

² S. Fußnote 1 Seite 83. Beldi, F.: Verbesserung der Isolation von Hochspannungsmaschinen. BBC-Nachr. 1930 S. 297.

potential gebracht, und alle Entladungen der Spule sind auf das Erdpotential festgelegt.

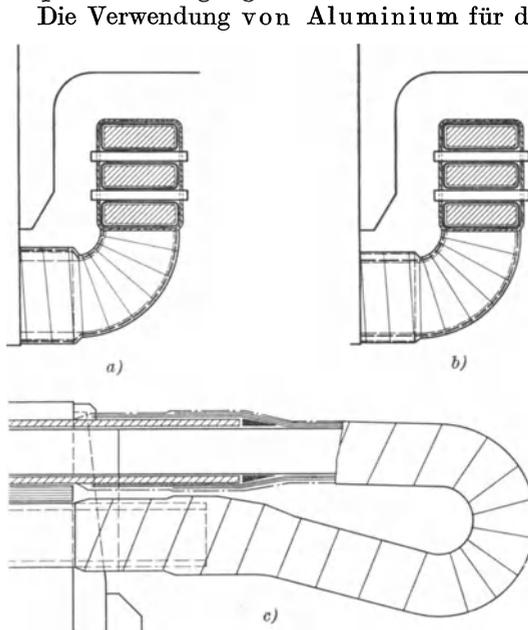


Abb. 139a bis c. Isolierung des Wickelkopfes von Wechselstrommaschinen.

- a) unzureichende ältere Form bei einer Stabwicklung,
- b) beste Ausführung bei einer Stabwicklung,
- c) beste Ausführung bei einer Schleifenwicklung.

nem Joch, dem Magnetkranz, zusammengefaßt werden. Je nach der Größe der Maschine, der Drehzahl, der Umfangsgeschwindigkeit und

erfordert wegen des größeren Wärmeausdehnungswertes dieses Baustoffes gegenüber Kupfer (S. 81) eine besonders sichere Wickelkopfbesetzung auf gleitenden Trägern und eine entsprechende bauliche Berücksichtigung der damit in Verbindung stehenden Baueinzelteile. Andernfalls sind Beschädigungen der Isolation durch Ausbeulungen, Knickung, Durchreiben und damit wiederum Wicklungsschluß, Eisenschluß u. dgl. also unter Umständen schwere innere Maschinenzerstörungen zu befürchten.

Der Läufer trägt bei der Schenkelpolmaschine die ausgeprägten Magnetpole, die auf einem Joch, dem Magnetkranz, zusammengefaßt werden. Je nach der Größe der Maschine, der Drehzahl, der Umfangsgeschwindigkeit und

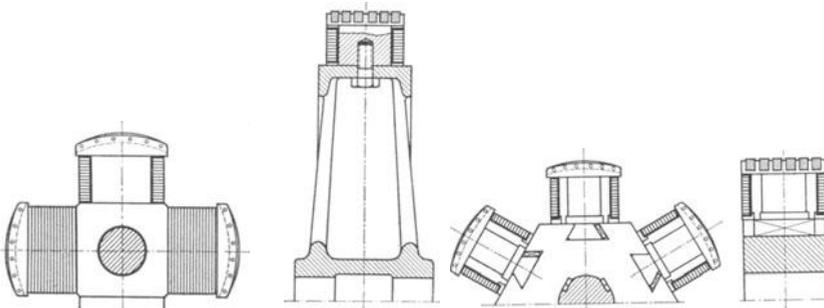


Abb. 140. Läufer mit Polen aus einem Stück hergestellt.

Abb. 141. Speichenrad mit aufgeschraubten Polen.

Abb. 142. Polbefestigung durch Schwalbenschwänze.

der Durchgangsdrehzahl (besonders bei Wasserturbinen) werden die Pole mit dem Joch zusammengelassen also aus einem Stück gefertigt, schwalbenschwanzförmig eingesetzt oder aufgeschraubt (Abb. 140 bis

142). Der heutige hohe Stand in der Baustoffherstellung und Baustoffprüfung (Röntgenuntersuchung über fehlerhafte Innenstellen, Magnetpulververfahren, Probestabentnahme) gewährleistet für alle diese Ausführungsformen vollständige Sicherheit. Vom Besteller hier Vorschriften zu machen ist nicht ratsam. Es muß den Erfahrungen und dem Entwurfsgeschick des Herstellers überlassen bleiben, die vorteilhafteste Bauform, namentlich bei großen Maschinen für Wasserturbinenantrieb, also den dann zu beherrschenden Schleuderkraftbeanspruchungen entsprechend zu finden. Die schwalbenschwanzförmige Befestigung ist teurer als die Verwendung von Schrauben. Sie erfordert höheren Baustoffaufwand, vergrößert also das Läufergewicht. Der Betrieb stellt hierzu nur die Bedingung, daß, falls für die Instand-

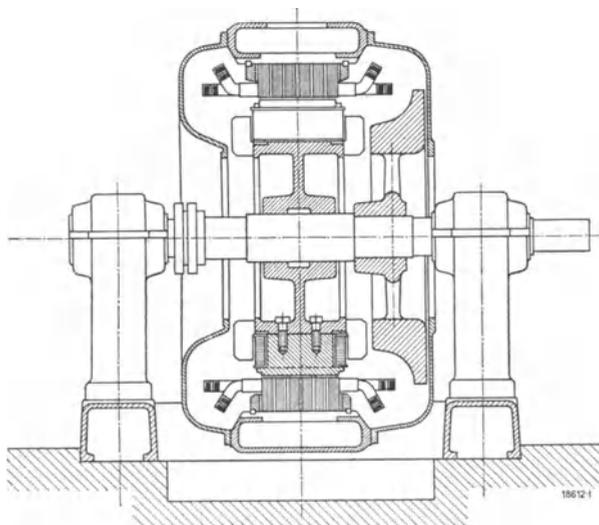


Abb. 143. Schenkelpol-Schwungradmaschine in besonderem Zusammenbau (BBC).

setzung das Entfernen eines oder mehrerer Pole erforderlich ist, diese ohne umständliche Zerlegungsarbeiten am Läufer mit einfachen Hilfsmitteln und in kürzester Zeit möglich und daß das erneute Befestigen solcher Pole vollständig sicher gewährleistet sein muß. Die Baubeschreibung muß hierzu ganz besonders Stellung nehmen und das Angebot auch die erforderlichen Vorrichtungen und Werkzeuge enthalten.

Im einzelnen ist zum Polträger zu erwähnen, daß dieser bei schmalen Maschinen aus einem Stück gegossen oder geschmiedet wird. Bei breiten Maschinen wird er aus mehreren nebeneinander liegenden Platten oder Ringen zusammengesetzt. Diese Ausführung erhöht die Sicherheit gegen das Vorkommen von Lunkerstellen und gestattet bei geschmiedetem Baustoff das bessere Durchschmieden. Bei sehr hohen Durchgangsdrehzahlen nähern sich die Baubedingungen bereits denen für Turbomaschinen. Dann wird der Läuferkörper mit den Polen als Zylinderläufer

(Trommelläufer) aus einem Stück hergestellt. Polzahl und Läuferdurchmesser sind in diesem Fall klein.

Das bei der Schenkelpolmaschine zumeist erforderliche Schwungmoment wird entweder vollständig im Läufer untergebracht oder mit einem angebauten Zusatzschwungrad erreicht. Welche Ausführung zu wählen ist, richtet sich nach der Größe des Schwungmomentes, den Maschinenabmessungen und dem Maschinenpreis, wobei auch die

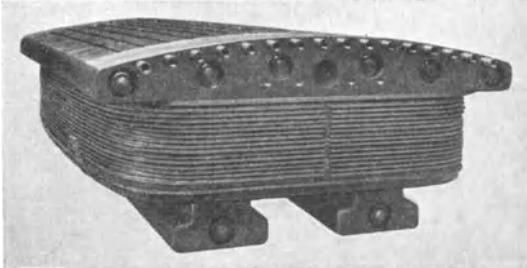


Abb. 144. Erregerpol mit eingelegten Dämpferstäben (BBC).

Wärmebeseitigung aus der Maschine zu beachten ist, also die offene oder geschlossene Bauform untersucht werden muß. Letztere wird gleichzeitig bestimmt durch die Drehzahl. Kann der Läufer noch innerhalb des Ständers liegen, so ist die Maschine eine Innenpolmaschine. Muß

der Läufer einen größeren Durchmesser als der Ständer erhalten, so bezeichnet man eine solche Maschine als Außenpolmaschine. Letztere wird heute nur noch selten gebaut und kommt nur für sehr kleine Drehzahlen in Frage. Bestimmend für die Abmessungen und den Preis der Maschine ist die Größe des Schwerpunktsdurchmessers D , denn je größer dieser ist, um so geringer werden Gewicht und Belastung von Welle und Lager, aber der Preis höher, weil die Eisenbreite kleiner und die Baustoffaufwendungen für die Wicklungen größer werden. Ein besonderes Schwungrad verlängert das Baumaß der Maschine und erhöht die Kosten für Welle und Lager. Abb. 143 zeigt eine besondere Bauform von BBC als Innenpolmaschinen mit Zusatzschwungrad.

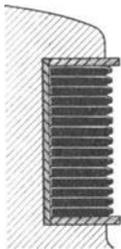


Abb. 145. Erregerwicklung hochkant gewickelt mit gerippter Oberfläche (BBC).

Die Pole (Abb. 144) werden aus Stahlguß oder Siemens-Martinstahl gefertigt. Der Querschnitt der Pole ist entweder rechteckig oder rund, wobei die runde Form die günstigste wicklungstechnische Ausnutzung ermöglicht und auch in mechanischer Beziehung die Gefahr der Ausbeulung der Magnetwicklung durch die Schwungkkräfte des Polrades am besten vermeidet. Die Polschuhe sind zumeist geschichtet und werden auf die Pole aufgeschraubt. Ihre Form richtet sich nach der Art der Ständerwicklung und der Nuten, um die Forderung des sinusförmigen Verlaufs der Maschinenspannung zu erfüllen.

Die Erregerwicklung wird bei kleinen Maschinen wie die Magnetwicklung der Gleichstrommaschinen, bei großen Maschinen aus hochkantgebogenem, blankem Flachkupfer hergestellt, zur Vergrößerung der Abkühlungsfläche gegebenenfalls auch besonders profilmäßig gestaltet

(Abb. 145). Die einzelnen Lagen werden durch imprägniertes Papier voneinander isoliert. Diese Ausführung hat den Vorteil besserer Wärmeableitung, weil die Kühlluft unmittelbar an dem Erregerkupfer vorbeistreichen kann. Außerdem ergibt sie eine sehr gedrängte Bauart bei gleichzeitig hoher Festigkeit. Das über Aluminium auf S. 158 Gesagte gilt auch hier entsprechend. Auf die Befestigung der einzelnen Spulenden ist bei hohen Drehzahlen besonders zu achten, damit im Laufe der Zeit kein Loslösen der Enden eintritt, das gefährlich werden kann.

Bei Einphasenmaschinen zumeist, bei Drehstrom-Schenkelpolmaschinen nur unter besonderen Verhältnissen erhalten die Pole eine besondere Dämpferwicklung, die die Oberschwingungen in der Spannungskennlinie und die mit diesen verbundenen zusätzlichen Verluste verringern. Auch zur Dämpfung von Schwingungen des Maschinenläufers beim Parallelbetrieb dienen solche Zusatzwicklungen (S. 192). Sie werden aus massiven, kreisrunden Kupferstäben gebildet, die in den geblättern Polschuhen liegen und beiderseits mit Kupferringen zu einer Kurzschlußwicklung verbunden sind (Abb. 144 und 146).

Bei Turbomaschinen kommt nur die Innenpolbauart zur Ausführung; der Läufer ist grundverschieden von dem der Schenkelpolmaschine.

Da nach den Angaben im Band III/1 die Dampfturbine hohe Drehzahlen erfordert, um mit bester Wirtschaftlichkeit zu arbeiten, sind für die Frequenzen $16\frac{2}{3}$, 25 und 50, die heute praktisch nur noch vorkommen, die Drehzahlen nach Gl. (44):

bei 50 Perioden	und 2 Polen	$n = 3000$	U/min
„ 50	„ „ 4	„	$n = 1500$ „
„ 25	„ „ 2	„	$n = 1500$ „
„ $16\frac{2}{3}$	„ „ 2	„	$n = 1000$ „

Die günstigsten Dampfturbinendrehzahlen sind 3000 und darüber. Für die niedrigen Frequenzen werden daher je nach der Höhe der Leistung hochwertige Zwischengetriebe verwendet, die für Leistungen bis 10 MVA bereits im Betrieb sind. Der Stromerzeuger wird dann als Schenkelpolmaschine gebaut.

Die Polzahl 2 oder 4 und die hohe Läuferdrehzahl verlangen kleinsten Läuferdurchmesser. Infolgedessen ist der Läuferaufbau der Turbomaschine, wie bereits gesagt, völlig abweichend von dem des Langsam-

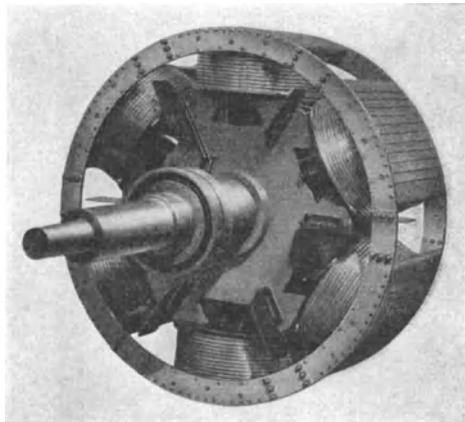
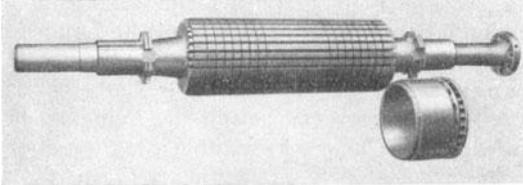
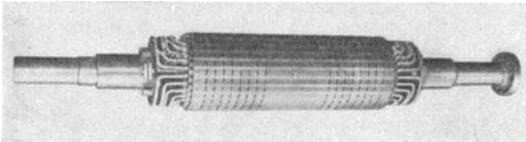


Abb. 146. Fertiger Läufer mit Dämpferwicklung (BBC).

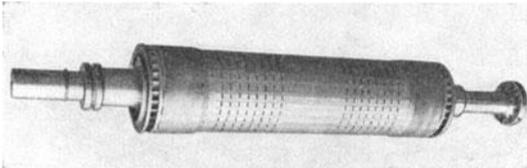
läufers. Das zeigt ohne weiteres Abb. 147. Der Turboläufer hat keine ausgeprägten Pole für die Erregerwicklung. Diese liegt vielmehr wie die Ständerwicklung in Nuten. Der Läuferkörper wird entweder aus einzelnen Blechen oder Platten zusammengesetzt, die auf die Welle auf-
gepreßt werden, oder er besteht aus Siemens-Martinstahl flüssig gepreßt und mit der Welle aus einem Stück geschmiedet. Bei sehr großen Läufern müssen andere Verfahren angewendet werden (Abb. 148), auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll, da solche großen Maschinen eine Sonderausführung darstellen¹.



a) Läuferkörper, Abschlußkappe mit Lüfter.



b) Erregerwicklung eingelegt.



c) Fertiger Läufer.

Abb. 147a bis c. Läufer eines Turbostromerzeugers in verschiedenem Bauzustand (SSW).

Diese Läuferbauart ermöglicht die beste gleichmäßige Verteilung der Fliehkräfte und vermindert die Geräuschbildung beim Lauf ganz wesentlich. Da die Durchgangsdrehzahl bestimmend ist, muß der Läuferaufbau der Überdrehzahl bis 25 vH der Nennzahl gewachsen sein.

Die Nuten für die Erregerwicklung werden so tief eingefräßt, daß sie nicht vollständig von der Erregerwicklung ausgefüllt werden. Der



Abb. 148. Läufer eines Turbostromerzeugers, dreiteilig (Trommel und seitlich eingesetzte Wellenstummel), mit offenen Nuten und Längsbelüftung der Erregerwicklung (AEG).

untere Teil jeder Nut bildet vielmehr einen Belüftungskanal in Achsenrichtung der Erregerwinden, um auch diese und den Läuferkörper zu kühlen und zu belüften (Abb. 148).

¹ ETZ 1937 S. 681. Siemens-Z. 1933 S. 85. Klüpfel, A.: Fortschritte im Bau von Turbogeneratoren. BBC-Mitt. 1936 S. 15.

Die Sicherung der Wicklungsköpfe der Erregerwicklung gegen die außerordentlich hohen Beanspruchungen durch die Fliehkraft erfolgt durch aufgeschobene geschmiedete Metallkappen aus unmagnetischem Stahl (Abb. 147), die so bemessen werden, daß bei Überschreitung der Drehzahl beim Durchgehen der Turbine keine Weitung eintritt, die eine Verlagerung der Wicklung herbeiführen könnte.

Die Erregerwicklung selbst wird aus hochkantigen Kupferstäben entsprechend isoliert ausgeführt.

Infolge der hohen Drehzahlen und der Baustoffbeanspruchung durch die Fliehkraft, die mit dem Quadrat der Drehzahl wächst, muß der Läufer in allen Teilen ganz besonders sorgfältig gearbeitet sein und darf auch nicht die geringste Gewichtsverlagerung zeigen. Um gleiche Gewichtsverteilung zu erzielen, wird der Läufer dynamisch und statisch besonders ausgewuchtet und durch Zusatzgewichte eingeregelt. Im Betrieb muß von Zeit zu Zeit die Auswuchtung nachgeprüft werden; daher muß sie so durchgebildet sein, daß sie ohne Schwierigkeit und ohne Abbau von Maschinenteilen bequem zugänglich ist (Abb. 147).

Die Dämpferwicklung wird beim Turboläufer durch die Nutenverschlußkeile gebildet, die gegebenenfalls durch entsprechende Baugestaltung unter sich gut leitend verbunden werden, um eine gleiche Käfigwicklung zu erhalten wie in Abb. 146.

Hinsichtlich der Verwendung von Aluminium statt Kupfer für die Läuferwicklung gilt das bereits auf S. 158 Gesagte auch hier.

Das Gehäuse zusammen mit dem Ständer wird ein- oder zweiteilig hergestellt¹. Es richtet sich das nach dem Durchmesser und den Vorschriften über Abmessungen bei Bahn- und Landanfuhr. Bei dem nicht unterteilten Gehäuse kann die Ständerwicklung im Herstellerwerk vollständig fertig gemacht, bei unterteiltem Gehäuse müssen die Wicklungsverbindungen an den Trennungsfugen nach der Aufstellung im Kraftwerk hergestellt werden.

Beim ungeteilten Gehäuse ist die Auswechslung von Ständerspulen ganz besonders zu beachten. Hierzu muß die Baubeschreibung in allen Einzelheiten wiederum Aufschluß geben. Das gilt aber auch für das geteilte Gehäuse, wenn je nach der Art der Ständerwicklung eine Lösung der Wicklungen an der Gehäusetrennfuge vermieden werden soll. Der Betrieb begrüßt die Vermeidung solcher Arbeiten stets, da sie immer als Fehlerquelle angesehen werden müssen. Bei Turbomaschinen wird das Gehäuse nicht geteilt. Es ist daher seitlich der Maschine genügend Platz vorzusehen, um den Läufer ausfahren zu können.

Bei der geschlossenen Innenbelüftung muß auch das Gehäuse vollständig geschlossen sein. Um eine Überprüfung der Wicklungsbeschaffenheit, der Verstaubung und der Temperatur durchführen zu können, sollen leicht verschließbare Besichtigungsöffnungen vorhanden sein. Sie dürfen aber nicht zum gelegentlichen Abströmen der Warm-

¹ Bätz, K.: Gehäusebauformen von Wechselstrommaschinen. ETZ 1939 Heft 6 S. 177.

luft in den Maschinenraum benutzt werden, da dadurch die Führung des Kühlluftstromes geändert oder unterbrochen wird, was mit Rücksicht auf die Wicklungserwärmung unter allen Umständen zu vermeiden ist.

Die Schutzschilde bei der offenen Bauart verhindern gleichzeitig ein unbeabsichtigtes Hineingreifen in die Wicklungen. Diese Schutzschilde müssen zu Besichtigungszwecken ebenfalls leicht abnehmbar sein.

Neuerdings werden auch diese Verschaltungen aus Aluminium oder unmagnetischem Stahl gefertigt, um ebenfalls die Streuungsverluste zu verringern und weiter an Gewicht zu sparen.

Für die Befestigung des Gehäuses von Schenkelpolmaschinen auf dem **Fundament** erhält der obere Teil angegossene oder angeschraubte Füße, die entweder getrennt von den Lagern auf Sohlplatten fundiert werden oder mit den Lagern zusammen auf einer Grundplatte bzw. einem Grundrahmen ruhen. Der geschlossene Grundrahmen ist vorzuziehen, da er der vollständigen Maschine eine viel bessere Standsicherheit gibt und den Einbau vereinfacht. Er setzt allerdings für sich selbst eine sehr sorgfältige Verbindung mit dem Fundament voraus, die bei Kastenform durch Ausfüllen mit Zement oder dünnflüssigem Beton vorgenommen wird. Für das einwandfreie Ausgießen des Grundrahmens muß dieser mit Luftschlitzen versehen sein. Sind die Lager und die Ständerfüße je getrennt aufzustellen, so muß jeder dieser Teile sorgfältig ausgerichtet und fundiert werden, um den Mittellauf des Magnetrades in bezug auf Lager und Kupplung einerseits und den gleichmäßigen Luftspalt andererseits zu gewährleisten, was bei der Aufstellung viel Mühe, Zeit und große Zuverlässigkeit erfordert und zudem ständig bestes Fundament auf sicherstem Grund voraussetzt. Ein dadurch etwa herbeigeführter ungleicher magnetischer Zug zwischen Läufer und Ständer kann zu unruhigem Lauf, zum Schleifen bei sehr kleinem Luftspalt und zu Beschädigungen auch der Antriebsmaschine führen. Schon $\frac{1}{10}$ Exzentrizität kann den einseitigen magnetischen Zug außerordentlich steigern: Bei einer 20-MVA-Schenkelpolmaschine mit 6000 mm Ständerbohrung hat 1 mm Exzentrizität eine magnetische Zugkraft von etwa 40000 kg zur Folge. Bei geschlossenen Maschinen, die die Kühlluft aus der Maschinengrube ansaugen, ist der Grundrahmen zum Anschluß der Belüftungstutzen notwendig.

Bei sehr großen Kurzschlußkräften muß die Fundierung der Maschine sehr sorgfältig rechnerisch¹ geprüft werden und die Überleitung der Kurzschlußkräfte auf das Fundament letzteres nur so stark belasten, daß bei dieser zusätzlichen Beanspruchung keine Wellenverschiebung eintritt.

Turbostromerzeuger erhalten stets einen in Kastenform geschlossenen Grundrahmen, der mit dem Turbinenrahmen fest verschraubt und auf dem Fundament vergossen wird.

¹ Winkelsträter, H.: Kurzschlußkräfte und Fundamentbelastungen. VDE-Fachberichte 1936 S. 90 (dort auch weitere Schrifttumsangaben).

Die Lager werden in der Regel als Bocklager gebaut. Für ihre Beurteilung gilt, daß sie leicht bedien- und prüfbar sein müssen, daß ferner eine genügende Wärmeableitung vorhanden ist, die bei sehr großen Maschinen nicht mehr allein durch die Ringschmierung zu ermöglichen ist. Man muß dann entweder Preßölschmierung oder noch zusätzliche Wasserkühlung der Lagerschalen anwenden. Auf das im Band III/1 hierzu Gesagte ist zu verweisen. Ölstands- und Temperaturzeiger müssen an jedem größeren Lager vorhanden sein, desgleichen Druckmesser, falls Öldruckschmierung notwendig ist. Für die Wasserkühlung ist zur ständigen Überwachung des Wasserumlaufes ein Druckabzweig mit Trichter und offenem Ablauf erforderlich.

Ölspritzen aus dem Lager und ein Ölsaugen entlang der Welle in die Maschine darf unter keinen Umständen eintreten, weil das Öl in der Maschine zerstäubt und die Wicklungen benetzt, wo es Staubverkrustungen und Isolationsbeschädigungen sehr unangenehmer Art herbeiführen kann. Hierauf hat der Betrieb besonders zu achten.

Für Turbostromerzeuger ist Zusätzliches nicht zu erwähnen.

Ganz besonders ist auf das im Band III/1 hinsichtlich der Isolierung der Lager gegen Lagerströme Gesagte auch hier aufmerksam zu machen¹.

Die Schleifringe müssen für die Betriebsbeobachtung und die Bürstenauswechslung leicht zugänglich sein. Die Bürstenbesetzung soll so zahlreich gewählt werden, daß im Betrieb mehrere schadhafte Bürsten ausgewechselt werden können, ohne die Maschinenlast zu beschränken.

Die Anschlußklemmen für die Ableitung des Stromes befinden sich am unteren Teile des Gehäuses, weil die Verbindungsleitungen zwischen Maschine und Schaltanlage stets im Maschinenhausfußboden verlegt werden. Sehr von Vorteil ist es, bei Drehstrommaschinen mit Sternschaltung der Ständerwicklung den Nullpunkt ebenfalls zu einer Anschlußklemme zu führen, um gegebenenfalls die Nullpunktserdung oder Schutzgeräte anwenden zu können. Nach den Angaben im 16. Kap. empfiehlt es sich, bei Betriebsspannungen von 500 V aufwärts den Maschinen zum Schutz gegen Überspannungen Drehstromkabel von mindestens 10 m Länge für die doppelte Betriebsspannung isoliert vorzuschalten, sofern dieser Ausführung nicht der Belastungsstrom (auch Kurzschlußstrom) und dadurch die Zahl der zu benutzenden Kabel mit ihren Endverschlüssen eine Grenze setzt. In solchem Fall werden blanke Schienenleitungen gut versteift und sicher gelagert benutzt.

Eine besondere Bauart erhalten die Stromerzeuger, die von **Wasserturbinen mit stehender Welle** angetrieben werden. Die Maschine liegt dann über der Turbine, die Stromerzeuger- und die Turbinenwelle werden starr gekuppelt.

Bei der Durchbildung des ganzen Maschinensatzes mit stehender Welle sind eine große Zahl von Lösungen möglich, die in engster Fühlung mit dem Betrieb überprüft werden sollten, bevor die Ausführung festgelegt wird. Es kommt dabei darauf an, festzustellen:

¹ Schröder, H.: Lagerschäden an elektrischen Maschinen durch Stromeinflüsse. Der Maschinenmarkt 1939 Heft 1 S. 7.

an welchen Stellen das Trag- oder Spurlager; das das gesamte Gewicht der umlaufenden Teile und den Wasserschub aufzunehmen hat, wo die Führungslager, über die die Kurzschlußkräfte auf das Fundament zu übertragen sind, anzuordnen sind, damit:

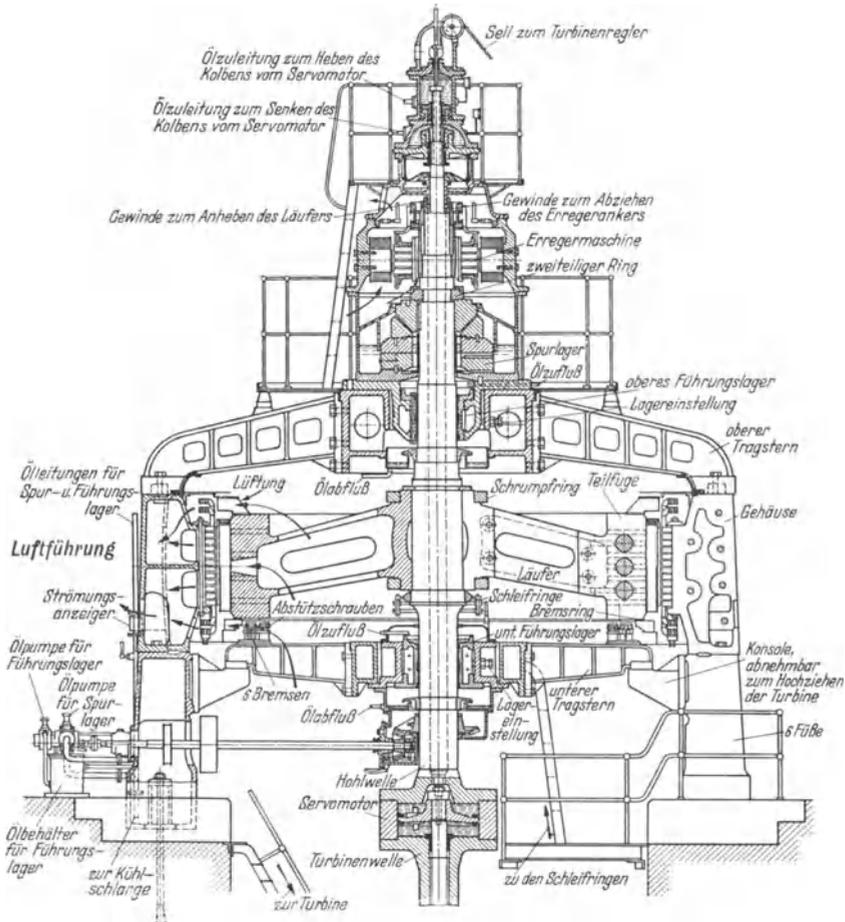


Abb. 149. Wasserkraft-Drehstromerzeuger 3,2 MVA, $n = 125$ U/min für Kaplanturbinenantrieb. Erregermaschine aufgebaut, Schleifringe unten.

- die geringste Lagerentfernung und dadurch die sicherste und billigste Wellenlagerung,
- die sicherste und einfachste Kräftefortleitung,
- die geringste Bauhöhe der Maschine über Maschinenhausfußboden unter Einschluß der Erregermaschine und der Schleifringe,
- die einfachste Beaufsichtigung und Instandsetzung,
- die übersichtlichste und betrieblich beste Unterbringung des Turbinenreglers mit der Leitrad-schaufelsteuerung und dem Servomotor,
- die einfachste und billigste Fundamentdurchbildung erzielt werden.

Bestimmend sind dafür Leistung und Drehzahl, daraus Länge, Breite, Aufbau des Ständers mit dem Gehäuse, Art der Wärmebeseitigung, leichte Zugänglichkeit und Instandsetzungsmöglichkeit der Ständerwicklung, Anordnung der Erregermaschine und der Schleifringe mit den Bürsten, dann natürlich Ein- und Ausbau des Turbinenlaufrades, sowie der Preis des Maschinensatzes.

Aus dieser Zusammenstellung von bautechnischen und betrieblichen Einzelheiten ist zu ersehen, daß die Lösung der Gesamt-Maschinendurchbildung stets erst gesucht werden muß. Es würde zu weit führen, auf alle Punkte ausführlich einzugehen, obgleich auch eine breitere Erörterung nicht unangebracht wäre. Um indessen wenigstens einigermaßen vollständig zu sein, sollen einige grundlegende Betrachtungen erfolgen. Um zunächst die mannigfaltigen Einzelheiten zu übersehen, die den Betrieb schon bei der ersten Bearbeitung des Maschinenentwurfes in besonderem Maße interessieren, zeigt Abb. 149 einen Maschinensatz mit allen wichtigen Eintragungen.

In den Ausführungen der letzten Jahre ist das Traglager zumeist oberhalb der Maschine angeordnet worden (Abb. 150). Hier ist es am besten zugänglich, gut zu beaufsichtigen und leicht instanzzusetzen. Befestigt wird dieses Lager auf einem Armstern, der dann gleichzeitig auch das obere Führungslager aufnimmt. Der Armstern stützt sich auf dem Maschinengehäuse ab. Die Kurzschlußkräfte werden durch den Armstern und das Gehäuse auf das Fundament übertragen. Es ist unbedingt notwendig, daß nicht die geringste Bauformänderung in dieser Kräftebahn auftritt, sonst wird das Wellenmittel verschoben und die auf S. 164 angegebenen Gefahren treten ein, die bis zur Zerstörung des Maschinensatzes führen können.

Auf die gleiche Leistung bezogen wird bei kleiner Drehzahl die Maschine in der Höhe kleiner und im Durchmesser größer als bei großer Drehzahl (Abb. 151 und 152). Bei Maschinen kleiner Leistung ist dann im Turbinenschacht kaum Platz vorhanden, den Regler mit dem Servomotor unterzubringen. Man muß auf Maschinenflur gehen und setzt, um den erforderlichen Platz zu erhalten, die Maschine bei kleinerer Leistung auf Füße, bei größerer Leistung auf einen Gußsockel nach Abb. 151 bis 154 oder bildet bei besonderer Kühlung mit Kanälen das Fundament nach der einen Seite entsprechend aus und baut die Maschine unmittelbar auf (Abb. 121 und 155). Dadurch wird die Gehäusedurchbildung einfacher und die Beaufsichtigung im Betrieb vom Maschinenhausfußboden aus erleichtert. Bei sehr großer Leistung und kleiner Drehzahl wird die Maschine so hoch, daß dieses Maß für

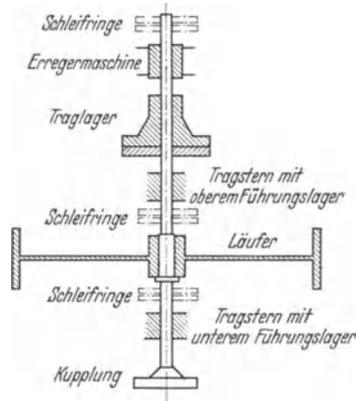


Abb. 150. Läufer mit 2 Führungslagern in den Tragsternen, Traglager oben, Erregermaschine aufgebaut.

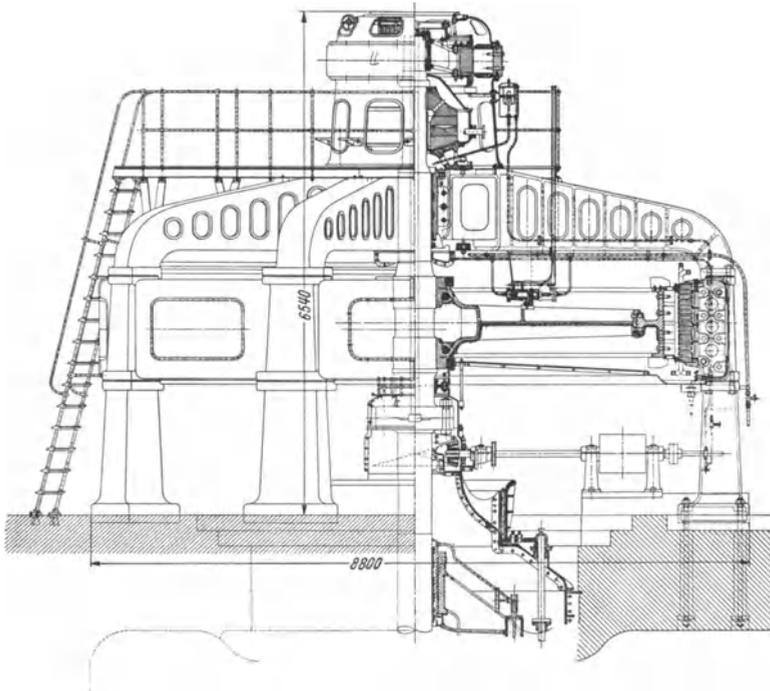


Abb. 151. Wasserkraft-Drehstromerzeuger auf Fundamentfüßen für niedrige Drehzahl; schmale Maschine — großer Durchmesser. 7 MVA, 8,4 kV, $n = 83,3$ U/min.

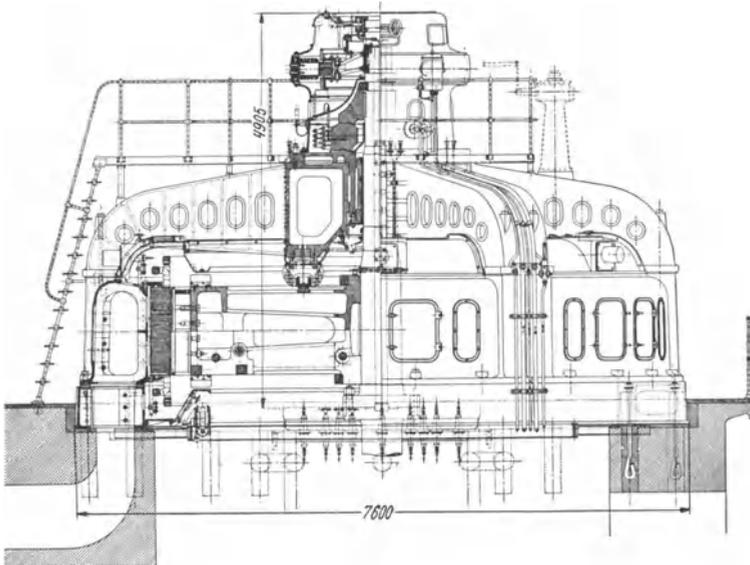


Abb. 152. Wasserkraft-Drehstromerzeuger auf Gußsockel für hohe Drehzahl; hohe Maschine — kleiner Durchmesser. 8 MVA, 17,6 kV, $n = 166,6$ U/min.

die Höhe des Kranes und damit die Abmessungen des Maschinenhauses zu ungünstig ausfällt. Dann wird die Maschine nach Abb. 154 in das

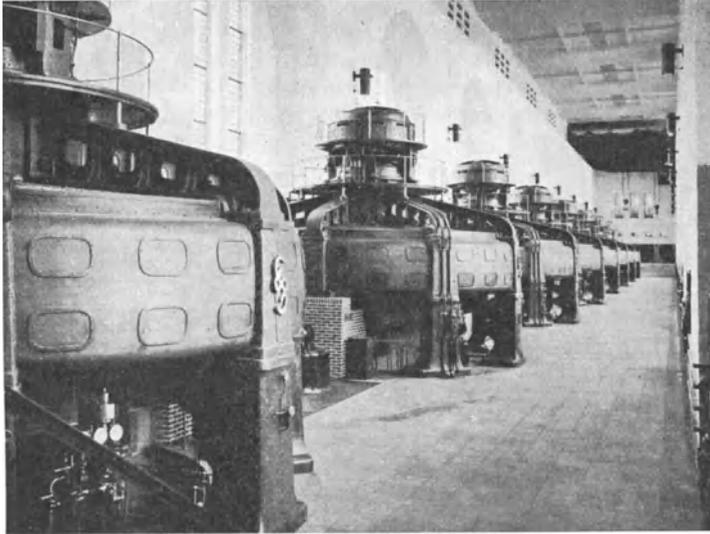


Abb. 153. Wasserkraftwerk mit 8 Drehstromerzeugern auf Füßen, Regler und Servomotoren auf Maschinenhausflur.

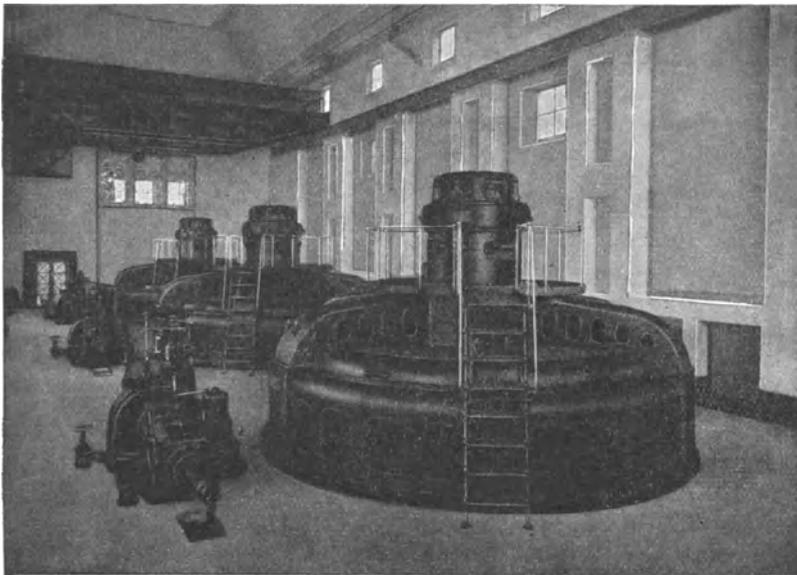


Abb. 154. Maschinenhaus mit Wasserkraft-Drehstromerzeugern je 6 MVA, 5,5 kV, $n = 166\frac{2}{3}$ U/min auf Maschinenhausfußboden fundiert; Turbinenzugang im Keller, Regler auf Maschinenhausflur.

Fundament eingelassen und ein Zwischenboden für die Steuergeräte, Stromwandler usw. geschaffen.

Die Erregermaschine wird fliegend über dem Traglager aufgebaut, ist dadurch ebenfalls leicht zugänglich und infolge des oberen Führungslagers auch im Rundlauf so gesichert, daß keine Betriebsbeanstandungen vorkommen.

Werden die Schleifringe ebenfalls über die Maschine gelegt, so sind die Leitungen für den Polanschluß in der durchbohrten Welle zu führen, was betrieblich nicht erwünscht ist. Besser auch für die Bau-

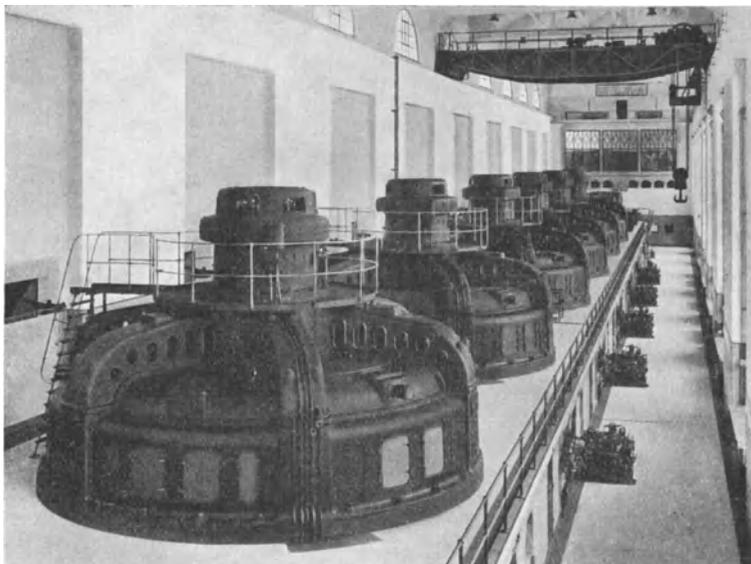


Abb. 155. Maschinenhaus mit 6 Wasserkraft-Drehstromerzeugern je 8 MVA, 17,6 kV, $n = 133$ bis 167 U/min, $f = 40/50$ Per/s, auf hochgezogenem Fundament; Turbinenzugang vom Maschinenhausfußboden.

höhenersparnis ist die Anordnung der Schleifringe zwischen den Lagern oben oder unten (Abb. 150).

Bei der Kaplanturbine ist noch zu berücksichtigen, daß über der Erregermaschine der Steuerkopf mit der Ölzu- und -abführung für die beweglichen Laufradschaufeln angeordnet wird.

Das zweite Führungslager für den Stromerzeuger wird entweder wiederum in einem Tragstern unterhalb des Läufers untergebracht (Abb. 150), oder wenn damit in der Gesamtbauhöhe des Maschinensatzes eine Verkürzung eintritt, ohne daß die Welle verstärkt zu werden braucht, mit dem Turbinenführungslager auf dem Turbinendeckel vereinigt (Abb. 156). Letzteres hat den großen Vorteil, daß ein Lager weniger vorhanden ist, und daß vor allen Dingen das Überkopfarbeiten am unteren Lager vermieden wird, das bei der Anordnung dieses Lagers in einem unteren Tragstern betrieblich recht unerwünscht ist.

Um namentlich bei kleinen Drehzahlen und großen Leistungen die Bauhöhe und die Kräftewege so kurz wie möglich zu halten, geht man neuerdings dazu über, auch das Spurlager mit dem unteren Führungslager zusammen auf den Turbinendeckel zu setzen, von dem aus die Kräfte senkrecht und unmittelbar auf das Fundament übergeleitet

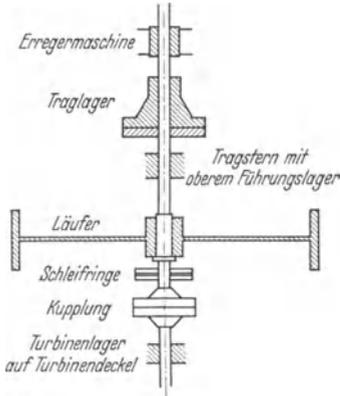


Abb. 156. Läufer mit einem Führungslager, Traglager im oberen Tragstern, unteres Führungslager mit Turbinendeckel vereinigt, Erregermaschine aufgebaut.

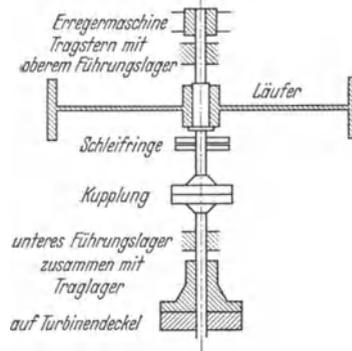


Abb. 157. Läufer mit einem oberen Führungslager, Traglager und unteres Führungslager auf Turbinendeckel, Erregermaschine aufgebaut.

werden. Instandsetzungsarbeiten am Spurlager sind hier allerdings schwieriger auszuführen (Abb. 157). Da das Führungslager wiederum in einen Tragstern eingebaut werden muß, ist diejenige Maschinendurchbildung die bessere, bei der der Tragstern für sich allein ohne Verbindung mit dem Maschinengehäuse die Kräfteübertragung übernimmt. Bei dieser Bauform kann die Erregermaschine fliegend über dem Maschinenläufer sitzen. Es muß dann eine besondere Lagerung der Erregerwelle erfolgen. Wird die getrennte Aufstellung der Erregermaschine vorgenommen, so ergibt das eine weitere Bauhöhenverkürzung des Maschinensatzes nach Abb. 158.

Diese kurzen Feststellungen zu den verschiedenen Lageranordnungen lassen erkennen, daß die entsprechenden Untersuchungen schon der Mühe wert sind, wenn preislich und betrieblich die vorteilhafteste Ausführung des Maschinensatzes gefunden werden soll.

Betrieblich weiter von Bedeutung ist die Durchbildung der gesamten Lagerschmierung mit Ölzuführung, Ölpumpen, Ölkühlung, Wasserkühlung usw. Hier sind die neuesten Gesichtspunkte dahin zusammenzufassen, daß alle Einzelpumpen an der Maschine tunlichst vermieden

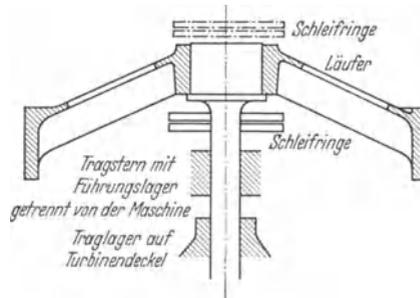


Abb. 158. Läufer fliegend; getrennter unterer Tragstern mit Führungslager auf Turbinendeckel; getrennte Erregermaschine.

werden sollten und dafür eine Gemeinschaftsölanlage mit entsprechenden Überwachungseinrichtungen wünschenswert ist. Die Beaufsichtigung wird einfacher und zuverlässiger und Störungen an einer kleinen Einzelpumpe können die Inbetriebhaltung des Maschinensatzes nicht gefährden. Selbstverständlich ist, daß die Gemeinschaftsanlage volle Aushilfsanlage besitzt, die bei Störungen selbsttätig zugeschaltet wird.

Die neueste Bauart des Wasserkraftwerkes bei Maschinen mit stehender Welle wird in Freiluftausführung¹ gewählt, bei der dann der Hochbau des Maschinenhauses vollständig fortfällt. Abb. 159 und 160 zeigen zwei Ausführungsformen. Der Stromerzeuger wird in das Fundament eingelassen und entweder mit einer umschließenden Haube oder einer kastenförmigen Überdachung wasserdicht abgedeckt. In dem Raum zwischen Stromerzeuger und Turbine werden die Schalt- und Steuerungseinrichtungen aufgestellt, der somit gleichzeitig den Hauptbedienungsraum bildet. Um an Bauhöhe weiter zu sparen, wird die Erregermaschine entweder mechanisch von der Maschinenwelle oder getrennt durch einen Motor angetrieben und die Lage der Schleifringe unter dem Läufer gewählt.

Für diese außerordentlich einfache und in den Gesamtkosten auch billige Ausführung sind hinsichtlich des Betriebes besondere Forderungen zu stellen. In erster Linie muß die gegen die freie Umgebung schützende Abdeckung unter allen Temperatur- und Witterungsverhältnissen vollständig dicht abschließen. Im Hinblick auf die wechselnden Temperaturen unter dieser Abdeckung je nach den Außentemperaturen, der Belastung oder dem Stillstand der Maschine ist dafür Sorge zu tragen, daß weder Schwitz- noch Kondenswasser in den Stromerzeuger gelangen können. Da sich diese Wasserbildung nach der Bauform der Abb. 159 nicht vermeiden läßt, muß für Wasserabführung besonders gesorgt werden, oder die Haube ist doppelwandig mit entsprechender Wärmeisolierschicht auszuführen. Die Form der Abb. 160 erfordert die Durchbildung der Überdachung als Doppeldach mit Luftraum. Bei stillstehender Maschine im Winter ist in beiden Fällen gegebenenfalls eine elektrische Heizung vorzusehen. Ferner müssen alle Maschinenteile, die eine ständige Aufsicht fordern, so z. B. die Lager, die Erregermaschine und die Schleifringe, gut zugänglich sein und Instandsetzungsarbeiten ohne besondere Zerlegung anderer Maschinenteile durchgeführt werden können. Das bezieht sich auch auf Instandsetzungsarbeiten an der Ständerwicklung. Der Maschinenaufbau nach Abb. 160 ist hier der vorteilhaftere.

An Stelle der kastenförmigen Abdeckung nach Abb. 160 wird mit gleicher Höhe auch ein allseitig geschlossenes Maschinenhaus gewählt. Dabei werden die Schwierigkeiten der Freiluftausführung hinsichtlich der Schwitzwasserbildung und der Temperaturverhältnisse vermieden, und es werden zudem Räume geschaffen, in denen auch die Schalt- und

¹ Wiedemann, E.: Wasserkraftgeneratoren für Freiluftaufstellung. VDE-Fachberichte Bd. 9 (1937) S. 61.

Regelgeräte untergebracht, sowie Instandsetzungsarbeiten ausgeführt werden können.

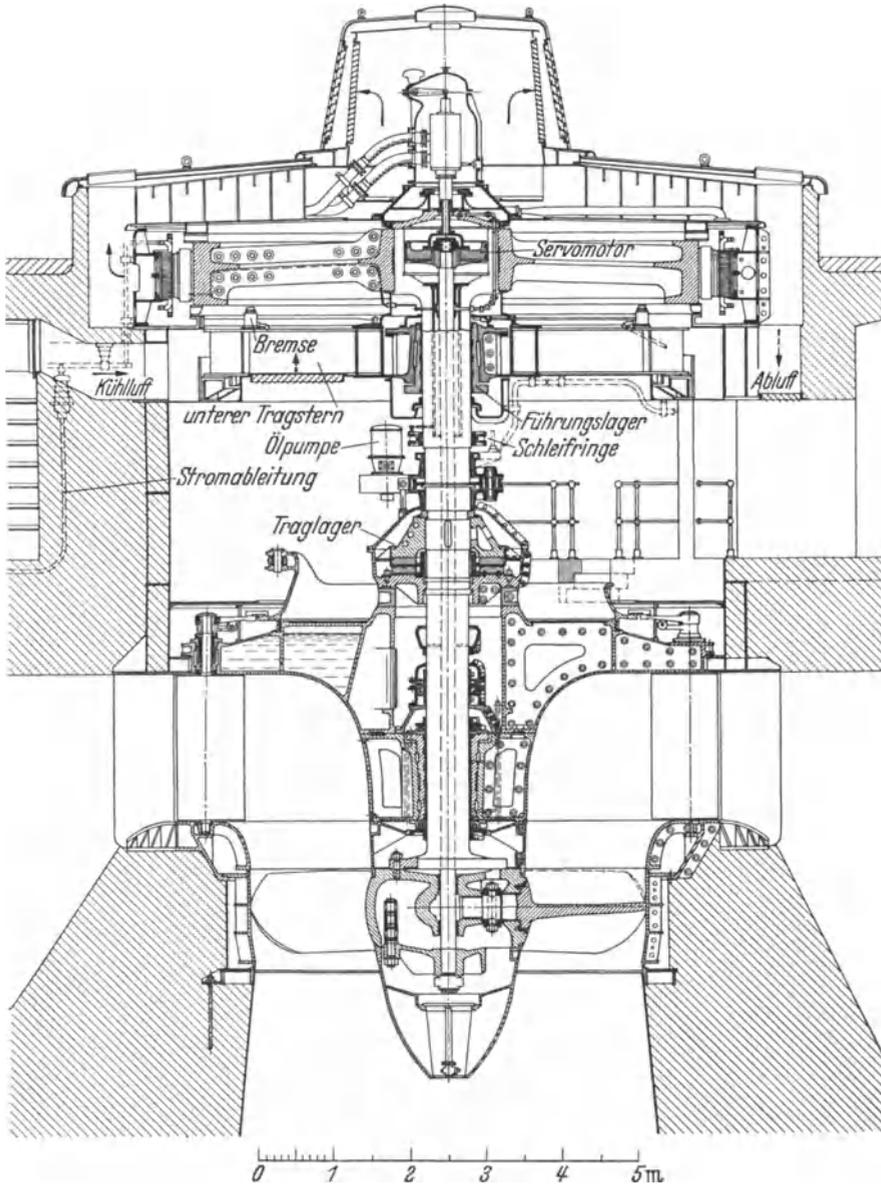


Abb. 159. Schnitt durch einen Drehstrom-Schenkelpolstromerzeuger in Freiluftausführung; Antrieb durch Kaplanmaschine, getrennte Erregermaschine.

Auf eine zweckmäßige Durchbildung des Daches ist besonders zu achten, da der Maschinenhauskran im Freien steht und für seine Be-

nutzung zu allen Arbeiten an den Maschinen einzelne Teile des Daches vorübergehend entfernt werden müssen.

Läuferbremsung. Bei großen Maschinen ist infolge des Schwungmomentes des Läufers nach Absperren des Wasserzufflusses zur Turbine mit einer sehr langen, oft mehr als einer halben Stunde dauernden Aus-

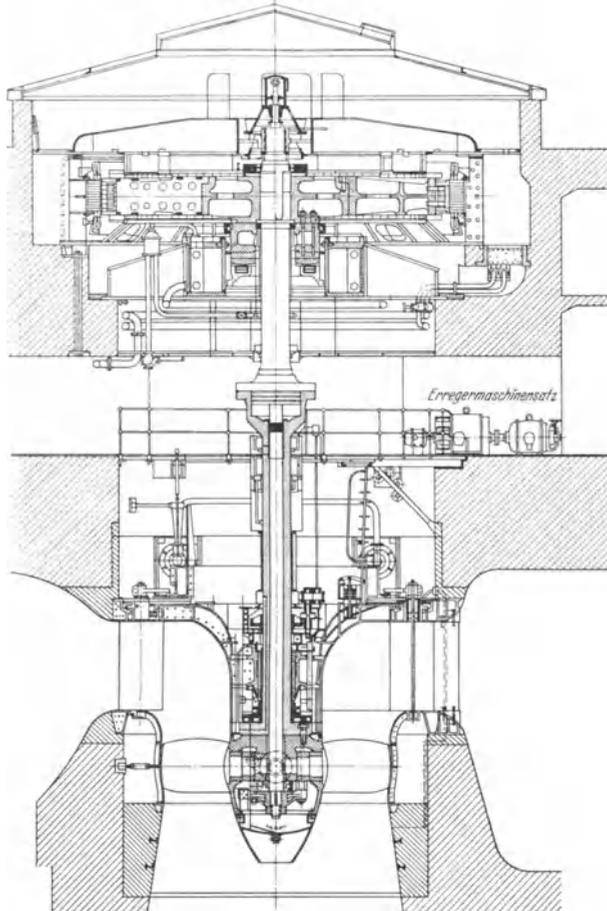


Abb. 160. Schnitt durch einen 3,7 MVA-Drehstrom-Schenkelpolstromerzeuger $n = 100$ U/min, in Freiluftausführung, getrennte Erregermaschine.

laufzeit zu rechnen. Wenn das einerseits für den gewöhnlichen Betrieb auch zumeist unbeachtlich ist, so hat andererseits bei einem im Innern der Maschine entstehenden Brand das sofortige Stillsetzen des Läufers den Vorteil, daß der Brand durch das Aufhören der Luftbewegung nicht noch weiter angefacht wird. Der Läufer muß zu diesem Zweck abgebremst werden. Es werden hierzu Öl- oder Luftdruckbremsen oder auch elektrisch betätigte Bremsen unterteilt in einzelne Bremszylinder benutzt, die auf den Armstern des Läufers wirken.

Betrieblich ist für solche Bremsen zu fordern, daß die beim Bremsen entstehende Wärme richtig abgeleitet wird, daß kein Bremsstaub und kein Bremsfunke in die Wicklungen gelangen kann, daß das Bremsen sanft erfolgt und in der Wirkung entsprechend der gewünschten Bremszeit regelbar ist. Diese Bedingungen erfüllt am besten die Öldruck- oder die Luftdruckbremse mit vorgeschaltetem Windkessel. Der Druckluftantrieb wird vorzugsweise verwendet, weil in jedem größeren Kraftwerk Druckluft zum Bedienen der Steueranlagen, zum Reinigen der Maschinen und Schaltgeräte und dgl. vorhanden ist. Die elektrische Bremse ist nur anwendbar, wenn die passende Stromquelle ständig stromabgabebereit ist, was am sichersten durch eine Batterie erfüllt wird.

An Stelle dieser auf den Läuferarmstern wirkenden Bremse wird auch eine besondere Brems Scheibe verwendet, bei der sich die vorgenannten Bedingungen leichter erfüllen lassen¹.

¹ AEG-Mitt. 1925 S. 95.

Zweiter Abschnitt.

Der Parallelbetrieb (Kraftwerkekupplung, Verbundbetrieb) von Wechselstrommaschinen.

8. Der Parallelbetrieb.

Einleitung. Der Parallelbetrieb der Stromerzeuger in Wechselstromanlagen ist heute die Regel. Gegenüber den Verhältnissen bei Gleichstrom, bei denen nur der Parallelbetrieb der Maschinen eines Kraftwerkes praktisch in Frage kommt, ist bei Wechselstrom zu dieser Betriebsform in immer steigendem Maße und in ausgedehntester Form der weitergehende zu finden, mehrere Kraftwerke parallel zu schalten, sie dadurch zur besten wirtschaftlichen Ausnutzung zu bringen und gleichzeitig zur gegenseitigen Unterstützung oder Aushilfe aller Art heranzuziehen. Für die Verbindung der Kraftwerke werden die Hochspannungsnetze, oder besondere Kuppelleitungen benutzt (Verbundbetrieb). Auf diese Weise wird die Hebung der Gesamtwirtschaftlichkeit aller vereinigten Betriebe angestrebt und vorzugsweise der Gedanke verfolgt, den Kraftwerken nach ihrer Wertigkeit ihre Aufgaben in der Netzstromversorgung zuzuweisen z. B. Ausnutzung von Lauf-, Spitzen-, Pumpspeicherkraftwerken, Wärmekraftwerken auf der Kohle, alten Wärmekraftwerken, Gas- und Dieselmotorkraftwerken, günstigste Lastverteilung, Ersparnisse an Übertragungsverlusten, Beschränkung der Kraftwerksaushilfsanlagen, wehrpolitische Gesichtspunkte und Störungsbegrenzungen. Auch dort, wo Wasserkraftanlagen verschiedener Eigenart und abweichender Niederschlagsgebiete bestehen oder gebaut werden, steht das gleiche zur Erörterung. Der Gedanke des Zusammenschlusses der Kraftwerke im ständigen Verbundbetrieb geht heute soweit, Großkraftwerke über weite Landstrecken zusammenarbeiten zu lassen und alle im Bereich der verschiedenen Stromversorgungsgebiete gelegenen Kraftwerke mit einzubeziehen.

Die elektrischen und daraus die betrieblichen Verhältnisse in solchen Gemeinschaftsanlagen sind, weil nur Wechselstrom mit hoher Spannung in Frage kommt, keineswegs so einfacher Natur, wie oftmals angenommen wird. Es bedarf vielmehr einerseits einer ganzen Reihe von Untersuchungen, andererseits bestimmter betrieblicher Maßnahmen, um das Zusammenarbeiten einwandfrei und vor allen Dingen wirtschaftlich durchzuführen, wobei noch hinzukommt, ob die zu kuppelnden Kraft-

werke in einer Hand liegen oder getrennten Unternehmungen gehören¹. In diesem Kapitel soll die technische Seite des Verbundbetriebes behandelt werden. Da es bei der Mannigfaltigkeit der Verhältnisse nicht möglich ist, erschöpfende Erörterungen zu geben, wird nur Grundsätzliches besprochen werden, das aber jedenfalls genügt, um einen geschlossenen Einblick zu erhalten und einfache rechnerische Untersuchungen durchführen zu können. Der Parallelbetrieb der Maschinen innerhalb eines Kraftwerkes wird dabei besonders hervorgehoben werden.

Vorweg sei ferner bemerkt, daß ein Betrieb zwischen zwei Werken dergestalt, daß von einem Werk über eine besondere Leitung auf eine unabhängige Sammelschiene des zweiten Werkes mit abgetrenntem

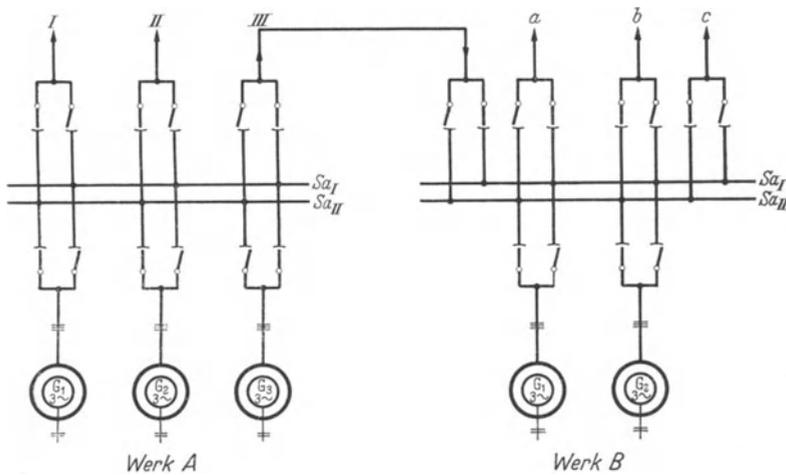


Abb. 161. Stromaustausch zwischen zwei Werken ohne Parallelbetrieb.

Netz Strom geliefert wird, nicht als Parallelbetrieb anzusehen ist. Ein solcher Betrieb, der vielfach als Richtungsbetrieb stattfindet, bietet keine Schwierigkeiten, da die Leistungs- und Spannungsregelung in beiden Werken unabhängig voneinander ist. Abb. 161 zeigt diesen Fall. Werk A gibt über Leitung III Strom in die Leitung a von Werk B. Das von a gespeiste Gebiet muß elektrisch vollständig von b und c getrennt sein. Der Betrieb ist, wenn die abzugebende Leistung entsprechend groß ist, auch derart durchführbar, daß Maschine 3 im Werk A ganz für Werk B zur Verfügung steht. Das richtet sich nach der Eigenart der Stromabnahme in B. Handelt es sich aus den vielen möglichen Fällen z. B. um die Stromlieferung an eine Bahn oder eine Industrie mit stark schwankender, stoßweiser Lastabnahme (Elektroöfen), so wird dieser getrennte Maschineneinsatz vorteilhafter auf eine Sammelschiene Sa_I in A und B geschaltet.

Kurz umrissen und zur Kennzeichnung der technischen Aufgaben, die für den einwandfreien Parallelbetrieb zu lösen sind, ist zunächst Be-

¹ Der Verfasser: Verbundbetrieb und Leistungsregelung. Elektr.-Wirtsch. 1937 Heft 19.

dingung, daß die Stromerzeuger innerhalb eines Kraftwerkes unter sich einwandfrei parallel laufen. Da die Leistungen der zusammenzuschließenden Werke zumeist stark voneinander abweichen werden, ist ferner besonders auf die Kurzschlußströme zu achten, die je nach der Lage der Kurzschlußstelle zu den einzelnen Werken auftreten können. Es muß dieses durch Rechnungen, über die im 13. Kapitel eingehender gesprochen wird, festgestellt werden. Die Höhe der Kurzschlußströme bedingt auch Schalter, die der in solchen Fällen abzuschaltenden Leistung gewachsen sind, und zudem einen ganz besonders zuverlässig arbeitenden Überstromschutz. Zu diesen Ermittlungen für jede der am Parallelbetrieb beteiligten Anlagen kommt weiter diejenige der Erdschlußstromlöschung und der Wahl der entsprechenden Schutzvorrichtungen, schließlich — und dieses soll im nachfolgenden zunächst besprochen werden — die Regelung der Spannungen und der Lastverteilung für jedes Werk. Schon aus diesen Angaben ist zu ersehen, daß das Zusammenschalten mehrerer Werke nicht kurzerhand vorgenommen werden darf, um nicht wesentliche Teile der Kraftwerke bzw. diese selbst nach ihrer Größe und damit den Gesamtbetrieb außerordentlich zu gefährden.

Dem Zusammenschluß müssen auch Untersuchungen über die Schaltung aller Umspanner ober- und unterspannungsseitig vorausgehen, um die Übereinstimmung der Schaltgruppen festzustellen. Ferner sind die Schaltanlagen und die Stromwandler hinsichtlich der Höchstströme, die sie führen können, und der in Störungsfällen übertragbaren Leistung zu prüfen. Schließlich wird gleichzeitig mit diesen Untersuchungen festzulegen sein, an welchen Stellen Meßgeräte und Zähler für die Betriebsführung und die Stromabrechnungen, für wirtschaftliche und statistische Aufzeichnungen usw. eingebaut sein müssen. Daß ein sicher arbeitendes Fernsprechnetzt vorhanden sein muß, ist selbstverständlich.

Für den einwandfreien Parallelbetrieb sind die Hersteller sowohl des elektrischen als auch des mechanischen Teiles gleich verantwortlich. Das muß bei der Bestellung eines Maschinensatzes Bedingung sein. Insbesondere müssen die Gewährleistungsbedingungen in der Form beiderseits übernommen werden, daß jeder Teil dem anderen die erforderlichen maschinentechnischen Unterlagen liefert und ein enges Zusammenarbeiten beider Hersteller stattfindet. Nicht nur die elektrische Maschine kann beim fehlerhaften Parallelbetrieb die Schuld tragen. Das ist besonders zu beachten.

Aus den theoretischen und praktischen Untersuchungen der letzten Jahre sind einerseits die Anforderungen an die Stromerzeuger und ihre Regelung ermittelt, andererseits die Verhältnisse für die Leistungsübertragungen festgestellt worden, die sich aus den Netzdaten, den Maschineneigenschaften und den auftretenden Belastungsarten ergeben. Die Netzverhältnisse sind bekannt oder bei Neuanlagen im allgemeinen mit hinreichender Genauigkeit vorauszubestimmen. Alte Anlagen können durch Rechnung und Versuch vor ihrer Eingliederung in einen vorhandenen Netzbetrieb ebenfalls entsprechend mit guter Sicherheit

beurteilt werden. Die Maschineneigenschaften und der Einfluß der Betriebsvorkommnisse werden im folgenden besonders besprochen.

Auf die theoretischen Untersuchungen im einzelnen einzugehen würde zu weit führen, hätte zudem für den Entwurfs- und den Betriebsingenieur auch keinen rechten Zweck, da die Maschinenberechnungen nicht zu ihren Aufgaben gehören. Es sollen daher nur kurze Entwicklungen der Verhältnisse grundsätzlicher Art gegeben werden, aus denen besonders der Betriebsingenieur, der für die störungsfreie Durchführung des Parallelbetriebes verantwortlich ist, Schlüsse für seine Maßnahmen ziehen kann. Auch für die Bestellung und damit für die Auslegung der Maschinen geben

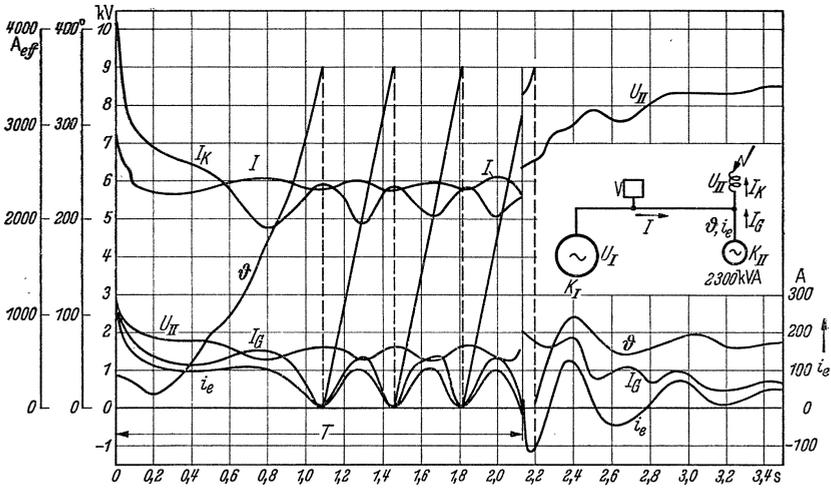


Abb. 162. Wirkungen eines dreipoligen Netzkurzschlusses im Kraftwerks-Verbundbetrieb. ϑ Polradwinkel der Maschine II, i_e Erregerstrom der Maschine II, T Kurzschlußdauer, U_I, U_{II}, I, I_G, I_K nach Schaltbild.

diese theoretischen Angaben wesentliche Anhaltspunkte. Es stärkt das Gefühl der Beherrschung der Betriebserscheinungen, wenn die inneren Vorgänge im Parallelbetrieb überblickt und die Wirkungen von Störungen z. B. die von diesen ausgelösten Pendelungen der Stromerzeuger übersehen werden. Von den einfachsten Verhältnissen wird ausgegangen. Weitere Schlüsse sind dann ohne Schwierigkeit abzuleiten.

Um zunächst eine kurze Darstellung vom Verhalten parallel arbeitender Stromerzeuger verschiedener Größe bei Störungen zu geben, sind die dabei auftretenden Erscheinungen in Abb. 162 zusammengefaßt¹. Sie zeigt in Kennlinien für die Ströme, Spannungen und den Polradwinkel den Störungsverlauf bei einem kleinen Stromerzeuger am großen (starken) Netz, der durch die Wirkung eines dreipoligen Kurzschlusses hervorgerufen wird. Die Klemmenspannung U_{II} der kleinen Maschine sinkt stark ab, so daß diese Maschine nicht mehr die volle Wirkleistung abgeben kann. Da die Leistung der Antriebsmaschine zunächst nicht

¹ Wanger, W. Dr.-Ing.: Stabilität von Drehstromnetzen mit Aufklärungsversuchen an kleinen und mittleren Maschinen. BBC-Mitt. 1937 Nr. 4 S. 99.

geändert wird, wird der Läufer beschleunigt und fällt aus dem Tritt. Der Polradwinkel ϑ wächst nach anfänglicher kleiner Abnahme schnell an und erreicht bereits nach einer halben Sekunde 80° und nach etwas mehr als einer Sekunde 360° . Wie aus der Abb. 162 zu ersehen ist, laufen Netz und Maschine durcheinander, die Ströme und damit die Leistungen sind heftigen Schwankungen unterworfen. Im vorliegenden Fall wird nach Abschalten des Kurzschlusses die kleine Maschine durch das starre Netz wieder in Synchronismus gezogen, und der Polradwinkel

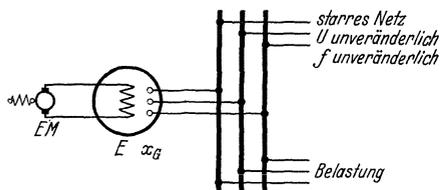


Abb. 163. Drehstromerzeuger im Parallelbetrieb am starren Netz.

nimmt einen festen Wert an. Mit einem derartig günstigen Verlauf der Störung kann jedoch nicht immer gerechnet werden, und vor allen Dingen ist nicht vor auszubestimmen, wann dies der Fall sein wird. Fängt sich die Maschine K_{II} nicht, kommt sie also nicht wieder in Synchronismus, muß sie sofort abgeschaltet

werden; durch Überlastung der anderen Maschinen können dann weitere Störungen die Folge sein.

Die synchrone Leistung¹. Der einwandfreie Parallelbetrieb verlangt, daß die Stromerzeuger in erster Linie stabil sind sowohl bei allmählichen Laständerungen als auch bei Laststößen durch plötzliches Zu- oder Abschalten größerer Last, Schaltvorgänge, Kurz- und Erdschlüsse, fehlerhaftem Parallelschalten.

Die am einfachsten zu übersehenden Verhältnisse liegen vor, wenn eine Synchronmaschine parallel an einem unendlich starken (starren) Netz liegt also z. B. ein Stromerzeuger kleiner Leistung an einem Großkraftwerk, das bei allen Laststößen unveränderte Spannung und Frequenz hält (Abb. 163).

¹ Görge, H.: Über das Verhalten parallelgeschalteter Wechselstrommaschinen. ETZ 1900 S. 188. Rosenberg, E.: Die Wirkung des Dämpfers bei parallel arbeitenden Wechselstrommaschinen. ETZ 1903 S. 857 und ETZ 1906 S. 873. Sarfert: Über das Schwingen der Wechselstrommaschinen im Parallelbetrieb. Mitt. u. Forschungsarbeiten des VDI 1908 Heft 61. Berlin: Julius Springer. Ollendorff, F., u. W. Peters: Schwingungsstabilität parallel arbeitender Synchronmaschinen. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. Bd. 5 (1926) Heft 1 S. 7; ferner: Einfluß der Dämpferwicklung auf die Eigenschwingungszahl der Synchronmaschine. Arch. Elektrotechn. Bd. 20 (1928) S. 559. Peters, W.: Einfluß von Laststößen auf die Stabilität gekuppelter Kraftwerke und Kraftwerksmaschinen. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. Bd. 8 (1930) S. 109. Frensdorff, E., K. Kühn, R. Mayer u. W. Peters: Versuche über Maschinenregelung und Parallelbetrieb in den Großkraftwerken Hirschfelde und Böhlen. ETZ 1931. Schenkel, M.: Der Ständerwiderstand und die Drehmomente der Synchronmaschine. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. Bd. 10 (1931) Heft 3 S. 92. — Synchronisierleistung und Querfelddämpfung beim Parallelbetrieb von Turbogeneratoren. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. Bd. 7 (1933) Heft 2 S. 1 und Über das synchronisierende Moment der Synchronmaschinen. Ebenda S. 15. — Leitungsschutz beim Außertrittfallen der Kraftwerke. ETZ 1937 S. 598. Leonhard, A.: Vergleich der Stabilitätsverhältnisse von Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen beim Arbeiten über lange Leitungen. Elektrotechn. u. Maschinenb. 1939 S. 77 und ETZ 1939 Heft 27 S. 812.

Die Maschine sei parallel, und es handelt sich nun darum, zu überblicken, was geschieht, wenn zunächst allmählich verlaufende Laständerungen auftreten. Am leichtesten sind die Verhältnisse für den stationären Betriebszustand — den Beharrungszustand — aus dem Spannungsschaubild des Synchronstromerzeugers zu ermitteln.

Das Spannungsschaubild für Abb. 163 ist in seinem einfachsten Aufbau aus Abb. 164 bis 166 ohne Berücksichtigung des Wirkspannungsabfalles in der Ständerwicklung (also entgegen Abb. 58) gezeichnet. Da dieser Wirkspannungsabfall sehr gering ist, kann er in den folgenden Untersuchungen ohne weiteres vernachlässigt werden. Das vereinfacht den Überblick und die rechnerischen Feststellungen sehr. In

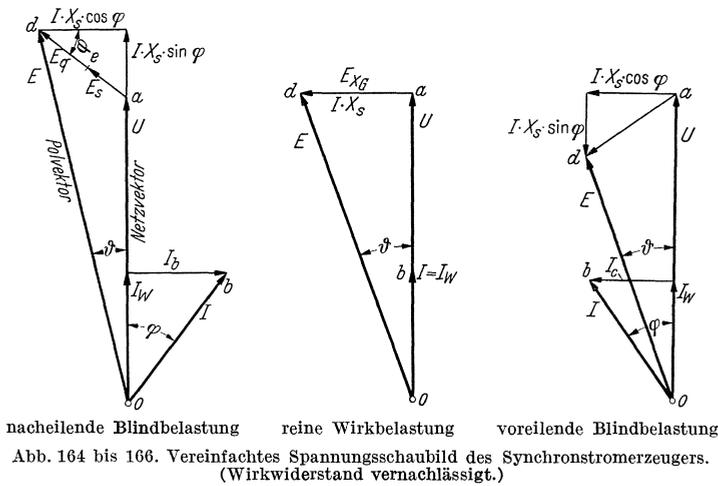


Abb. 164 ist wiederum angenommen, daß der Belastungsstrom $I = \overline{Ob}$ der Klemmenspannung — in diesem Fall der Netzspannung $U = \overline{Oa}$ um den Winkel φ nacheilt. Trägt man nach früher Gesagtem den Vektor des gesamten Blindspannungsabfalls $E_{X_g} = \overline{ad}$ senkrecht zum Strom an Oa an, so erhält man der Größe und Phasenlage nach den Vektor für die innere EMK E . Der induktive Spannungsabfall in der Maschine ist genau genommen gleich der Streuspannung $E_s = \overline{ae}$ der Ständerwicklung und dem gleichgerichteten Spannungsabfall durch die Ständer-Rückwirkung $E_q = \overline{ed}$, also:

$$E_{X_g} = E_s + E_q \text{ kV.}$$

Die Streuspannung E_s beträgt bei Schenkelpol- und Turbostromerzeugern etwa 20 bis 24 vH, die Spannung E_q bei Schenkelpolmaschinen zwischen 100 bis 130 vH, bei Turbostromerzeugern dagegen 120 bis 160 vH der Klemmenspannung. Diese Werte sind für die Berechnung der synchronen Leistung des Stromerzeugers bei Laständerungen bei Turbostromerzeugern im allgemeinen anwendbar, nicht aber bei Schenkelpolmaschinen, weil infolge des Luftspaltes die Durchflutungs-

verhältnisse wesentlich anders geartet sind. Für E_q sind hier nur etwa 40 bis 60 vH der Klemmenspannung zu setzen. Da E_s und E_q zumeist nicht bekannt sind, soll für überschlägliche Berechnungen an ihrer Stelle der Spannungsabfall infolge des synchronen Blindwiderstandes (der synchronen Reaktanz) der Ständerwicklung verwendet werden, der sich unter Hinweis auf das oben Gesagte ergibt aus:

$$E_{X_G} = E_s + E_q \text{ kV für Turbomaschinen,} \quad (57a)$$

$$E'_{X_G} = E_s + k_q \cdot E_q = E_s + E'_q \text{ kV für Schenkelpolmaschinen,} \quad (57b)$$

wobei:

$$E_{X_G} = \sqrt{3} \cdot I \cdot X_s \text{ kV,}$$

$$E'_{X_G} = \sqrt{3} \cdot I \cdot X'_s \text{ kV,}$$

und:

$$X_s = \frac{U_n^2}{m_0 \cdot N_n} \text{ Ohm/Phase für Turbomaschinen,} \quad (57c)$$

$$X'_s = \frac{E_s + k_q \cdot E_q}{E_s + E_q} \cdot X_s \text{ Ohm/Phase für Schenkelpolmaschinen,} \quad (57d)$$

U_n = Nennspannung in kV,

N_n = Scheinleistung in MVA,

I = Belastungsstrom in kA,

$m_0 = \frac{I_{K, d_0}}{I_n}$ = Kurzschlußverhältnis bei Leerlauf (S. 259),

bei Turbostromerzeugern $\sim 0,7$,

„ Schenkelpolstromerzeugern $\sim 0,8$,

I_{K, d_0} = Dauerkurzschlußstrom bei Leerläuferregung in kA.

Die Ungenauigkeit des Ergebnisses spielt für betriebliche Untersuchungen keine wesentliche Rolle.

Den Winkel ϑ zwischen U und E , der somit auch die Lage des Polrades d. h. die Lage des Maschinenvektors¹ gegenüber dem Vektor der Klemmenspannung kennzeichnet, nennt man den Polradwinkel. Ihm kommt eine ganz besondere Bedeutung zu. Er ändert sich mit der Belastung, wenn U unverändert bleibt, die Maschine also an dem vorausgesetzten starren Netz liegt.

Die Wirkleistung (synchrone Leistung) der Drehstrommaschine ist bei einer bestimmten Belastung:

$$N_W = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ MW} \quad (58)$$

Um den Polradwinkel ϑ in Gl. (58) einzuführen, bedarf es einer Umrechnung. Aus Abb. 164 folgt²:

$$\cos \varphi = \frac{E \cdot \sin \vartheta}{E_{X_G}}. \quad (59)$$

Da sich der Spannungsabfall E_{X_G} mit dem Strom genau ändert, ergibt

¹ Zur besseren Vorstellung kann man annehmen, daß der Polradvektor von der Wellenmitte radial durch die Mitte eines Poles gezogen sei.

² Für E ist Phasenwert $\cdot \sqrt{3}$ zu setzen.

sich die elektrisch abgegebene Leistung der Maschine für irgendeinen Belastungszustand, wenn mit dem Fußzeichen n die Nennwerte bei Vollast, für die die Maschine entworfen ist, bezeichnet werden:

$$N_W = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \frac{E \cdot \sin \vartheta}{E_{x_{Gn}}} = \frac{U_n \cdot E \cdot \sin \vartheta}{X_s} \text{ MW}$$

$$= N_n \cdot \frac{E \cdot \sin \vartheta}{E_{x_{Gn}}} \text{ MW}, \quad (60)$$

d. h. sie ist also dem Sinus des Polradwinkels verhältnismäßig. Den Leistungsverlauf nach der Sinuslinie zeigt Abb. 167 in Abhängigkeit vom Winkel ϑ . Bei 90° tritt der Höchstwert auf (Grenzleistung). Wird Gl. (60) in der Form geschrieben:

$$\frac{N_W}{N_n} = \frac{E \cdot \sin \vartheta}{E_{x_{Gn}}},$$

so geht daraus hervor, daß sich die höchste Wirkleistung zur Nennleistung (Scheinleistung) verhält wie die innere EMK E zum Blindspannungsabfall (gesamte Streuspannung einschl. Spannungsabfall durch Ständer-Rückwirkung) bei Nennstrom.

Durch Umrechnung¹ findet man schließlich:

$$N_W = N_n \cdot \sin \vartheta \sqrt{\left(\frac{U_n}{E_{x_{Gn}}} \pm \frac{I_B}{I_n}\right)^2 + \left(\frac{I_W}{I_n}\right)^2} = N_n \cdot \sin \vartheta \cdot k, \quad (61)$$

worin I_B und I_W den Blind- und Wirkstrom darstellen, der bei der Belastung N_W durch die Erregung eingestellt ist. Ist der Blindstrom rein kapazitiv, ist unter der Wurzel das Minuszeichen zu benutzen. Man bezeichnet N_W als die synchrone Leistung der Maschine.

Fällt der Vektor der EMK E mit dem Vektor U zusammen, so ist die Leistung Null. Eilt der E -Vektor dem Klemmenspannungsvektor vor, so arbeitet die Maschine als Stromerzeuger, eilt er nach, so arbeitet die Maschine als Motor.

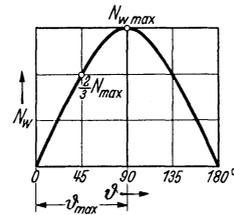


Abb. 167. Synchrone Leistung des Stromerzeugers in Abhängigkeit vom Polradwinkel unter Vernachlässigung der Wirkwiderstände der Maschine und Netz.

¹ Es ist für irgendeinen Belastungszustand:

$$\frac{E_{x_G}}{I} = \frac{E_{x_{Gn}}}{I_n}$$

und die innere EMK E für einen bestimmten Belastungszustand nach der eingestellten Erregung aus Abb. 164:

$$E = \sqrt{(U_n + E_{x_{Gn}} \cdot \sin \varphi)^2 + (E_{x_{Gn}} \cdot \cos \varphi)^2}.$$

Ferner ist der Blindstrom: $I_B = I \cdot \sin \varphi$
und der Wirkstrom: $I_W = I \cdot \cos \varphi$.

Diese Werte eingesetzt und umgerechnet, ergibt:

$$N_W = N_n \cdot \sin \vartheta \sqrt{\left(\frac{U_n}{E_{x_{Gn}}} \pm \frac{I_B}{I_n}\right)^2 + \left(\frac{I_W}{I_n}\right)^2}.$$

Die augenblickliche Leistung der am starren Netz parallel arbeitenden Synchronmaschine ist demnach abhängig von der augenblicklichen Stellung des Polrades und der Wirk- und Blindbelastung.

Sind $E_{x_{Gn}}$ und $\cos \varphi$ bekannt, kann der Polradwinkel berechnet werden aus der Gl. (61) für Abb. 164 bis 166:

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{E_{x_{Gn}} \cdot \cos \varphi}{U_n + E_{x_{Gn}} \cdot \sin \varphi}, \quad (62)$$

$$\sphericalangle \vartheta = \operatorname{arctg} \vartheta.$$

Mit der festen Abgabe von nacheilender Blindleistung (Magnetisierungsleistung) wird die synchrone Leistung vergrößert, bei voreilender Blindleistung also kapazitiver Leistungsabgabe stark vermindert (Abb. 164 bis 166).

Für Phasengleichheit zwischen Strom und Klemmenspannung ergibt sich aus Abb. 165:

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{E_{x_{Gn}}}{U_n}, \quad (63)$$

und für voreilenden Strom aus Abb. 166:

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{E_{x_{Gn}} \cdot \cos \varphi}{U_n - E_{x_{Gn}} \cdot \sin \varphi}. \quad (64)$$

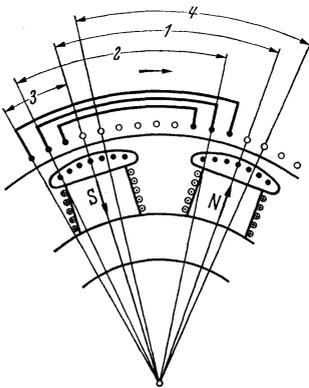


Abb. 168. Polradlage für den Synchronstromerzeuger bei verschiedener Belastungsart.

1 Ständerstrom und induzierte EMK in Phase, 2 Ständerstrom der EMK nacheilend, 3 Auslenkung, 4 Ständerstrom der EMK voreilend.

Wird die Belastung der Maschine über den Höchst- oder Grenzwert $\vartheta = 90^\circ$ getrieben, dann kippt die Maschine um, d. h. sie kommt in den Motorbereich und fällt dabei aus dem Parallellauf, oder wie man sagt, sie fällt aus dem Tritt. Dieser Zustand tritt also ein, sobald ein Pol des einen Feldes genau in die Mitte zwischen zwei Pole des anderen Feldes gelangt (Abb. 168). Dann wird das Gleichgewicht gestört, die Maschine wird labil. Die Leistungsgrenze wird die statische Kippgrenze genannt (statische Stabilität¹). Ist der Stromerzeuger belastet, und tritt eine Zusatzlast auf, so ist auf diese Vorbelastung bei der Beurteilung der möglichen Zusatzbelastung zu achten.

Die höchste Betriebsleistung muß daher stets kleiner als die Grenz- oder Kippleistung d. h. als der stabile Leistungswert gewählt werden². Der Unterschied dieser beiden Leistungen hängt von dem Wert für E_{x_G} bzw. X_s ab, also von der Größe des synchronen Blindwiderstandes oder dem elektrischen Aufbau der Maschine. Dazu kommt weiter die Stärke der Erregung und für diese die Arbeitsweise der Erregermaschine d. h. wiederum ihre Stabilität, über die

¹ Statische Stabilität = ruhende Stabilität; dynamische Stabilität = wechselnde Stabilität. Beide zusammen geben die Gesamtstabilität.

² Piloty, H.: Leistungsgrenzen und Stabilität von Großkraftübertragungen. Forschung und Technik S. 200. Berlin: Julius Springer 1930.

bereits gesprochen worden ist. Für den Betrieb ist daher das Verhältnis der Kipp- oder Grenzleistung zur Nennleistung besonders wichtig, um beim Vergleich von Maschinenangeboten entsprechende Gegenüberstellungen zu ermöglichen. Im praktischen Betrieb wird im allgemeinen mit $\vartheta = 40$ bis 42° gerechnet, so daß dann die Grenzleistung etwa 50 vH über der Nennleistung liegt. Es kann nach praktischen Erfahrungen die Grenzleistung auch bei $\frac{2}{3}$ der Kippleistung gewählt werden, insbesondere wenn bei der Wahl der Erregerstromlieferung d. h. der Ausführung der Erregermaschine auf die Erhöhung der Stabilität entsprechend Rücksicht genommen wird.

6. Beispiel: Feststellung der Leistungsverhältnisse bei einem 5,5-MVA-Schenkelpolstromerzeuger 6 kV, Frequenz 50 Per/s, bei Nennbetrieb belastet mit $\cos \varphi = 0,8$ nachteilend.

Es ist:

$$X_s = \frac{U_n^2}{m_0 \cdot N_n} = \frac{6^2}{0,8 \cdot 5,5} = 8,2 \text{ Ohm/Phase}$$

und:

$$E_{x_{Gn}} = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot X_s = 1,73 \cdot 0,53 \cdot 8,2 = 7,54 \text{ kV,}$$

das sind:

126 vH der Nennspannung.

Bei $E_{s,n} = 20$ vH wird somit $E_{q,n} = 106$ vH.

Nach den Angaben auf Seite 182 ist für die Ermittlung des synchronen Blindwiderstandes bei Laständerungen in diesem Fall nicht mit $E_{q,n} = 106$ vH, sondern mit $E'_{q,n} = 40$ bis 60 vH zu rechnen. Gewählt wird: $E'_{q,n} = k_q \cdot E_q = 40$ vH.

Dann beträgt:

$$X'_s = \frac{E_{s,n} + E'_{q,n}}{E_{s,n} + E_{q,n}} \cdot X_s = \frac{60}{126} \cdot 8,2 = 3,92 \text{ Ohm/Phase.}$$

Es ist:

$$k = \sqrt{\left(\frac{1}{0,60} + 0,6\right)^2 + 0,8^2} = 2,4,$$

$$N_w = 5,5 \cdot \sin \vartheta \cdot 2,4 = 13,2 \cdot \sin \vartheta,$$

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{3,6 \cdot 0,8}{6,0 + 3,6 \cdot 0,6} = 0,354,$$

$$\vartheta = 19^\circ 30',$$

$$\sin \vartheta = 0,334,$$

somit: $N_w = 13,2 \cdot 0,334 = 4,4 \text{ MW.}$

Soll die Maschine vorübergehend allmählich mit 40 vH bei $\cos \varphi = 0,6$ überlastet werden, was an sich hinsichtlich der Erwärmung kaum zulässig wäre, so wird:

$$N_w = 1,4 \cdot N_w = 1,4 \cdot 3,3 = 4,62 \text{ MW,}$$

$$I_n = \frac{4,62}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,6} = 0,74 \text{ kA,}$$

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,74 \cdot 3,92 \cdot 0,6}{6,0 + \sqrt{3} \cdot 0,74 \cdot 3,92 \cdot 0,8} = 0,30,$$

$$\vartheta = 16^\circ 42'$$

gegenüber dem Grenzwinkel von 90° daher immer noch verhältnismäßig klein. Sind noch Umspanner am Ende und Anfang einer Leitung mit je 7° und eine Leitung

mit 12° Winkeleinfluß zu berücksichtigen, so wird $\vartheta = 42^\circ 41'$ also immer noch zulässig. Für andere Verhältnisse ist diese Rechnung noch fortzusetzen, um festzustellen, ob die Maschine bei allen Wirk- und Blindbelastungen induktiver oder kapazitiver Art auch z. B. bei $\cos \varphi = 0$ zusätzlich stoßweise stark beansprucht werden kann, ohne aus dem Tritt zu fallen. Je nach der Art und Größe der Belastungsstöße unmittelbar auf diesen Stromerzeuger wird die Auslegung etwa für $\cos \varphi = 0,6$ zu erfolgen haben, was mit dem Maschinenhersteller zu besprechen ist.

Ändert sich die Netzspannung, was praktisch stets in mehr oder weniger weiten Grenzen der Fall ist, so ist Gl. (61) ebenfalls benutzbar.

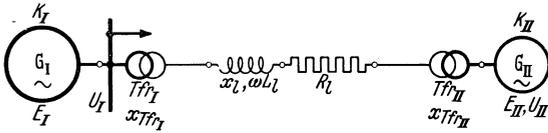
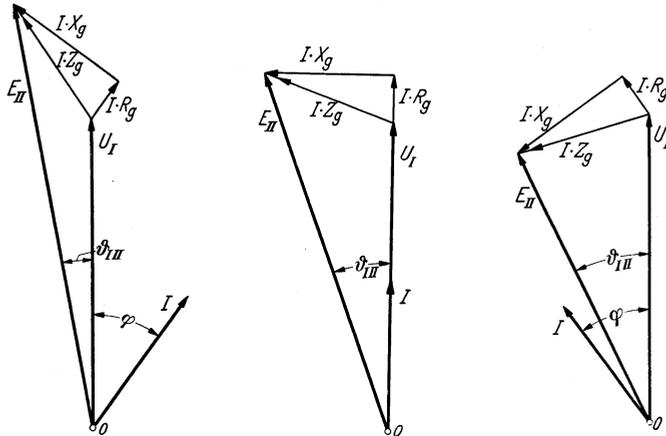


Abb. 169. Synchronstromerzeuger kleinerer Nennleistung mit Freileitungsübertragung am Großkraftwerk.

Sie gilt ganz allgemein für eine der Größe und Phasenlage nach veränderliche Klemmenspannung. Es ist dann der tatsächliche Wert von $U \cdot \sin \vartheta$ gegenüber E zu berücksichtigen.

Aus den bisherigen Betrachtungen ist zu ersehen, daß E' und der Polradwinkel ϑ mit der Spannung U in einem bestimmten, festen Ver-



nacheilende Blindbelastung reine Wirkbelastung voreilende Blindbelastung

Abb. 170 bis 172.

Spannungsschaubild für den Synchronstromerzeuger bei verschiedenen Belastungsarten. (Wirkwiderstand berücksichtigt.)

hältnis stehen. Die abzugebende Leistung ist nur abhängig vom Winkel ϑ und dem synchronen Blindwiderstand.

Wesentlich anders werden die Verhältnisse, wenn das Kraftwerk K_{II} über Umspanner und eine Fernleitung mit dem Großkraftwerk K_I nach Abb. 169 zusammenarbeitet und das starre Netz an den Maschinensammelschienen des Großkraftwerkes besteht. Das ist heute im Verbundbetrieb großer Versorgungsanlagen häufig zu finden.

Für die rechnerische Untersuchung der zu übertragenden synchronen Leistung müssen nun die Wirk- und induktiven Blindwiderstände der Übertragungsanlagen berücksichtigt werden, die bis zu den

Maschinen des Großkraftwerkes auftreten. Ohne auch hier wieder auf genauere mathematische Einzelheiten einzugehen, soll zur Vereinfachung angenommen werden, daß die Großkraftstromerzeuger dargestellt werden durch eine einzige Maschine, deren Klemmenspannung U_I bei allen Lastverhältnissen durch entsprechende Regelung ihrer Erregung unverändert bleibt. Dann sind alle Widerstände bis U_I einzubeziehen. Das Spannungsschaubild zum Stromlaufbild Abb. 169 zeigt Abb. 170 bis 172, aus dem für die Einführung des Polradwinkels ϑ statt des Phasenverschiebungswinkels φ zur Feststellung der übertragbaren Wirkleistung folgt:

$$\begin{aligned} E_{II} \cdot \cos \vartheta &= U_I + \sqrt{3} \cdot I \cdot R_g \cdot \cos \varphi + \sqrt{3} \cdot I \cdot X_g \cdot \sin \varphi \text{ kV,} \\ E_{II} \cdot \sin \vartheta &= \sqrt{3} \cdot I \cdot X_g \cdot \cos \varphi - \sqrt{3} \cdot I \cdot R_g \cdot \sin \varphi \text{ kV,} \end{aligned}$$

und durch Umrechnung für Drehstrom:

$$\begin{aligned} N_W &= \sqrt{3} \cdot U_I \cdot I \cdot \cos \varphi \\ &= \frac{U_I \cdot E}{\sqrt{R_g^2 + X_g^2}} \left[\frac{R_g \cdot \cos \vartheta}{\sqrt{R_g^2 + X_g^2}} + \frac{X_g \cdot \sin \vartheta}{\sqrt{R_g^2 + X_g^2}} - \frac{R_g}{\sqrt{R_g^2 + X_g^2}} \cdot \frac{U_I}{E} \right] \text{ MW,} \end{aligned} \quad (65)$$

oder wenn der Scheinwiderstand:

$$Z_g = \sqrt{R_g^2 + X_g^2} \text{ Ohm/Phase,}$$

so ist:

$$N_W = \sqrt{3} \cdot \frac{U_I \cdot E}{Z_g} \left[\frac{R_g}{Z_g} \cdot \cos \vartheta + \frac{X_g}{Z_g} \cdot \sin \vartheta - \frac{R_g}{Z_g} \cdot \frac{U_I}{E} \right] \text{ MW.} \quad (66)$$

Der Wirkwiderstand R_g ist gleich der algebraischen Summe aller Wirkwiderstände der in Reihenschaltung liegenden Umspanner mit der Fernleitung also:

$$R_g = \sum R = r_{TfI} + R_l + r_{TfII} \text{ Ohm/Phase}$$

und der Blindwiderstand X_g ist ebenfalls gleich der Summe aller Einzelblindwiderstände also:

$$X_g = \sum X = X_{sI} + x_{TfI} + x_l + x_{TfII} + X_{sII} \text{ Ohm/Phase.}$$

Wiederum für die drei Fälle des nacheilenden, phasengleichen und voreilenden Stromes folgt aus Abb. 170 bis 172, wenn mit der Phasenspannung U_p gerechnet wird:

für Abb. 170

$$\text{tg } \vartheta_{III} = \frac{\delta u}{U_p + \Delta u} = \frac{I(X_g \cdot \cos \varphi - R_g \cdot \sin \varphi)}{U_p + I(R_g \cdot \cos \varphi + X_g \cdot \sin \varphi)}, \quad (67)$$

für Abb. 171

$$\text{tg } \vartheta_{III} = \frac{I \cdot X_g}{U_p + I \cdot R_g}, \quad (68)$$

für Abb. 172

$$\text{tg } \vartheta_{III} = \frac{I(X_g \cdot \cos \varphi + R_g \cdot \sin \varphi)}{U_p - I(X_g \cdot \sin \varphi - R_g \cdot \cos \varphi)}. \quad (69)$$

Die Lage der Leistungskennlinie geht durch das Auftreten des Wirkwiderstandes gegenüber der Abb. 167 in die in Abb. 173 gezeich-

nete Form über, wobei die Abweichung von der Nulllinie gegeben ist durch:

$$\operatorname{tg} \varrho = \frac{R_g}{X_g}. \quad (70)$$

Bei hohen Übertragungsspannungen muß ferner auch die Kapazität der Leitung berücksichtigt werden. Die Umgestaltung ist nach den Angaben im Band II nicht schwer vorzunehmen und soll daher hier unterbleiben.

Es ist dann:

$$\operatorname{tg} \varrho = \frac{R_g}{\sqrt{(X_g - X_c)^2}} \quad (71)$$

Die übertragbare Leistung wird also wesentlich bestimmt durch die Widerstände der Übertragungsanlagen und ist nicht ohne weiteres änderbar. Das ist wohl zu beachten.

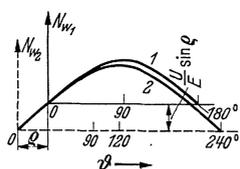


Abb. 173. Verschiebung der synchronen Leistungskennlinie durch den Einfluß des Netz-Wirkwiderstandes.

1 Kennlinie für N_W ohne Berücksichtigung von R_g ,
2 Kennlinie für N_W mit Berücksichtigung von R_g .

Bei großen Werten für R_g und X_g also niedriger Spannung kann die übertragbare Leistung außerordentlich beschränkt werden. Auch z. B. bei Änderung der Maschinenzahl im Kraftwerk II also anderer Leistungsverteilung auf eine bestimmte Leistung bezogen, oder bei Änderung von R_g und X_g durch Abschalten eines Umspanners oder eines Stromkreises bei einer Doppelleitung kann N_W für die im Betrieb befindliche Maschine an einen Punkt der Leistungskennlinie kommen, der einem großen Polradwinkel entsprechend nahe an der Kippgrenze liegt. Die statische Stabilität wird dann stark herabgesetzt, und eine Überlastung

kann zum Außertrittfallen des Kraftwerkes II führen. Das geht ohne weiteres aus dem Kennlinienverlauf der Abb. 173 hervor. Es ist daher dringend erforderlich, daß in allen solchen Fällen des Parallelbetriebes kleiner Werke oder einzelner Stromerzeuger — auch solcher von Industrierwerken — entsprechende Untersuchungen vorgenommen werden, zumal weiter auch die Eigenschwingungen zu beachten sind, die den Parallelbetrieb unmöglich machen können. Die Kupplungsanlagen müssen daher stets entsprechend leistungsfähig sein, um zunächst die statische Stabilität der Übertragung zu gewährleisten.

Bereits oben ist auf die Beachtung der Leitungskapazität hingewiesen worden. Große Kapazität bewirkt bekanntlich eine Verminderung des Blindwiderstandes, so daß die übertragbare synchrone Leistung größer wird. Das setzt allerdings voraus, daß die Kapazität nicht durch die Einstellung der Maschinenerregung geändert wird, was bei Lastschwankungen und entsprechenden Spannungsänderungen die Parallelbetriebsverhältnisse wieder verschlechtern kann. Es ist auch hierauf betrieblich besonders zu achten. Wird die Leitungskapazität C_l z. B. in der Mitte der Leitung zusammengezogen wirksam angenommen, so ist der Gesamtblindwiderstand Abb. 174:

$$X_{l,c} = \omega \cdot L_l \left(1 - \frac{\omega^2 \cdot L_l \cdot C_l}{4} - \frac{\omega^2 \cdot L_l \cdot C_l}{2} \right) \text{ Ohm/Phase.} \quad (72)$$

Überwiegt die Kapazität der Übertragungsanlagen gegenüber der Induktivität, was bei gering belasteten Maschinen auf ein großes Hochspannungsnetz oder auf ein langes Hochspannungskabel eintreten kann, so kann die Selbsterregung des Stromerzeugers durch einen kapazitiven Strom in der Ständerwicklung eintreten. Das Spannungsschaubild erhält die in Abb. 166 und 172 gezeichnete Gestalt. Die innere EMK ist also kleiner als die Klemmenspannung. Der Erregerstrom wird demnach ebenfalls kleiner als bei ordnungsmäßiger Erregung durch die Erregermaschine bei nicht kapazitiver Rückwirkung des Netzes. Der Einfluß auf die dynamische Stabilität, der später noch besprochen wird, ist ebenfalls zu

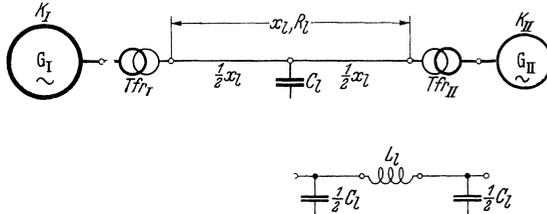
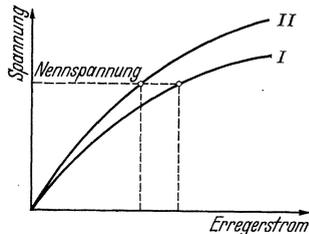


Abb. 174. Kraftwerks-Verbundbetrieb über Kuppelleitung mit Kapazität (Ersatzschaltung).

beachten. Es müssen somit die gesamten Netz- und Betriebsverhältnisse für die Maschinendurchbildung bzw. die Betriebsbeurteilung vorhandener, in den Verbundbetrieb zu bringender Kraftwerke bekannt sein bzw. untersucht werden. Für die kapazitive Selbsterregung liegt die Klemmenspannung der Maschine über der normalen Kennlinie (Abb. 175). Dabei sind die Verhältnisse für die statische Stabilität zu untersuchen. Die Einschaltung von Blindwiderständen ändert sofort das Verhältnis. Da immer Umspanner vorgeschaltet sein werden, sind diese zu berücksichtigen.



Die Behandlung der einzelnen Fälle von der betrieblichen Seite aus wird erst später erfolgen.

Abb. 175. Klemmenspannung und Erregung bei induktiver und kapazitiver Belastung.

Aus dieser Betrachtung ist nunmehr zu ersehen, daß der parallelgeschaltete Stromerzeuger in seiner Leistungs- und Spannungsregelung nicht mehr selbständig ist, sondern vollständig vom starren Netz beeinflusst wird. Soll er mit einem bestimmten Wirk- oder Blindstrom belastet werden, so sind die Verhältnisse im starren Netz also vom Großkraftwerk so zu regeln, daß diese Maschinenbelastung erreicht wird. Hierin liegt der eine große Vorteil des Verbundbetriebes, Netz und Stromerzeuger so betrieblich gegenseitig einzustellen, daß wirtschaftlich das günstigste Ergebnis erzielt wird also z. B. die volle Wirkleistungslieferung oder die Erzeugung großen Blindstromes zur Entlastung des Netzes.

I Klemmenspannung bei Erregung durch den Erregerstrom des Läufers, II Klemmenspannung bei Selbsterregung durch kapazitiven Belastungsstrom.

Die Eigenschwingungen der Synchronmaschine. Zeigt die Feststellung der synchronen Leistung, welchen allmählichen Belastungen die Maschine im Parallelbetrieb elektrisch ausgesetzt werden darf, ohne aus

dem Tritt zu fallen, so sind weiter die Eigenschwingungen von besonderer Bedeutung, die das Polrad bei plötzlichen Lastschwankungen ausführt.

Tritt gegenüber einem augenblicklichen Beharrungszustand mit dem Polradwinkel ϑ eine plötzliche Be- oder Entlastung auf, so muß der Polradwinkel auf einen anderen übergehen, weil sich die synchrone Leistung ändert. Dieser Übergang kann aber nicht ebenfalls plötzlich und unmittelbar erfolgen, sondern nur durch Schwingungen, weil das Polrad Schwungmassen besitzt, die beschleunigt oder verzögert werden müssen. Ferner schlüpft der Läufer gegenüber dem Ständerdrehfeld. Dadurch werden in der Dämpferwicklung und in den massiven Teilen des Läufers Dämpferströme und Wirbelströme induziert, die die Schlüpfung zu verringern suchen. Die Schlupfleistung widerstrebt der neuen Polradlage. Schließlich tritt noch eine weitere elektrische Leistung, die synchronisierende Leistung auf, die bestrebt ist, das Polrad in die neue synchrone Lage zu ziehen. Die neue Gleichgewichtslage des Polrades wird durch elektromagnetische Ausgleichschwingungen vermittelt. Das Polrad kommt gegenüber der neuen Mittel- oder Nulllage zum Pendeln. Es setzt sich dabei elektrische Energie in Bewegungsenergie (Wucht) um, die im Polrad aufgespeichert wird und umgekehrt.

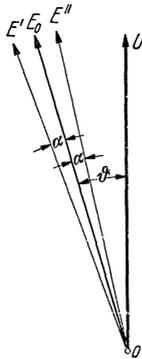


Abb. 176. Eigenschwingungen des Maschinenvektors der EMK.

Um diese Verhältnisse zu übersehen, diene folgende kurze Erläuterung, wobei vorausgesetzt wird, daß die Synchronmaschine wieder an einem starren Netz liegt.

Gibt in Abb. 176 E_0 die augenblickliche Lage des Polradvektors zum Vektor der Klemmenspannung U im Beharrungszustand an, so ist die synchrone Leistung der Maschine nach dem Vorhergesagten bestimmt. Beide Vektoren drehen sich mit gleichbleibender Winkelgeschwindigkeit ω_0 ; sie können demnach gegeneinander als stillstehend angesehen werden. Tritt nun ein Belastungsstoß auf, so bleibt bis zur Änderung der Kraftzufuhr zur Antriebsmaschine durch den Regler mit der Verzögerungszeit T_R die mechanische Leistung unverändert. Die Maschine verzögert sich, wenn die verlangte Netzleistung größer ist und beschleunigt sich, wenn die Netzleistung sinkt.

Mit der Änderung des Polradwinkels wird die synchronisierende Leistung ausgelöst, die sich wie die synchrone Leistung entwickelt. Sie ist bestrebt, wie bereits gesagt, das Polrad in die neue synchrone Lage E_2 zu ziehen, gleicht also einer elastischen Kupplung zwischen den Vektoren E' und E'' zu E_2 . Dazu führt das Polrad noch eine gleichförmige Drehung aus. Es ist die synchronisierende Leistung:

$$N_s = k_s \cdot N_W \text{ MW}, \quad (73)$$

worin k_s die Synchronisierziffer bezeichnet.

Es ist¹:

$$k_s = \frac{U_n}{E_{s,n} + E_{q,n}} \pm \frac{I_B}{I_n} + \frac{E_{q,n}}{E_{s,n}} \cdot \frac{\frac{U_n}{E_{s,n} + E_{q,n}} \cdot \left(\frac{I_W}{I_n}\right)^2}{\left(\frac{U_n}{E_{s,n} + E_{q,n}} \pm \frac{I_B}{I_n}\right)^2 + \left(\frac{I_W}{I_n}\right)^2}, \quad (74)$$

wobei die Angaben für $E_{q,n}$ je nach der Bauart der Maschine zu berücksichtigen sind. Von der Einführung der Minderung k_q in Gl. (74) ist der klareren Übersicht wegen abgesehen worden. Die synchronisierende Leistung kann für mäßige Winkelabweichung praktisch als unverändert angesehen werden, weil bei größeren Maschinen das Erregerfeld praktisch unverändert bleibt.

Die synchronisierende Leistung ist ebenfalls abhängig von den Streu- spannungen bzw. dem synchronen Blindwiderstand der Maschine und von der Art der Belastung. Ist diese induktiv, dann steigt N_s an, ist sie kapazitiv, dann sinkt N_s . Um bei starkem kapazitiven Einfluß die synchronisierende Leistung zu erhöhen, muß vor den Ständer ein Blindwiderstand in Form eines Umspanners oder einer Drosselspule geschaltet werden.

Die synchronisierende Leistung und der Trägheitsausgleich der bewegten Massen dürfen bei der plötzlichen Stoßbelastung keine Auslenkung des Polradwinkels über 90° bewirken, sonst fällt die Maschine wieder aus dem Tritt. Der Stromerzeuger muß demnach auch eine dynamische Stabilität besitzen. Da Laständerungen größten Ausmaßes im Parallelbetrieb großer Kraftwerke von außerordentlicher Bedeutung sind, ist die dynamische Stabilität für die Aufrechterhaltung des Gesamtbetriebes bestimmend und von größerer Wichtigkeit als die statische Stabilität. Die Grenzleistung, die die Maschine nach einem Stoß noch abgeben kann, ohne aus dem Tritt zu fallen, wird die dynamische Grenzleistung genannt. Die dynamische Stabilität ist die statische Kippgrenze bedingt durch das Überpendeln über den den geänderten Werten entsprechenden Endwert der statischen Kippgrenze. Nur bei starker Dämpfung kann die dynamische Stabilität die Höhe der statischen Stabilität erreichen.

Liegen zwischen dem Netzpunkt des Laststoßes und dem Stromerzeuger Umspanner und längere Fernleitungen, so ist wiederum deren Wirk- und Blindwiderstand zu berücksichtigen. Dann geht Gl. (74) über in:

$$k'_s = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot Z_g} \pm \frac{I_B}{I_n} + \frac{E_{q,n}}{E_{s,n}} \cdot \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot Z_g} \cdot \left(\frac{I_W}{I_n}\right)^2}{\left(\frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot Z_g} \pm \frac{I_B}{I_n}\right)^2 + \left(\frac{I_W}{I_n}\right)^2}, \quad (75)$$

wobei:

$$E_{s,n} + E_{q,n} = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot Z_g$$

und die Minderung k_q wiederum entsprechend zu berücksichtigen ist. Es würde zu weit führen in Form von Gleichungen noch eine besondere Darstellung dieser Verhältnisse zu geben. Das Gesagte genügt zur Erkenntnis der Vorgänge und ihrer Beeinflussung.

¹ Die synchronisierende Leistung großer Wechselstrommaschinen. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. X. Bd. 3. Heft 1931.

Der Scheinwiderstand hat also gleichfalls eine Schwächung von N_s zur Folge, der Polradwinkel wird kleiner.

Der voreilende kapazitive Belastungsstrom zum Aufladen einer Leitung bewirkt nach vorher Gesagtem eine Verstärkung des Ständerfeldes und somit eine Verringerung der Erregung bzw. der synchronisierenden Leistung. Bei Maschinen mit ausgeprägten Polen liegen die Verhältnisse günstiger als bei Turbostromerzeugern. Es ist daher z. B. Vorsicht geboten, für die Aufladung einer langen Leitung nur eine Maschine einzusetzen, weil die Stabilität, insbesondere die dynamische Stabilität, stark herabgesetzt werden kann. Besser wird das Netz dann durch mehrere parallelgeschaltete Maschinen auf Spannung gebracht. Die zwischengeschalteten Umspanner bessern die Verhältnisse wesentlich.

Das Pendeln des Läufers wird auch durch die Reibungswiderstände des ganzen Maschinensatzes gedämpft (gebremst). Da diese Dämpfung aber verhältnismäßig sehr gering ist, so wird noch eine besondere elektrische Dämpfung angewendet, die in einer kurzgeschlossenen Wicklung auf dem Läufer besteht (Abb. 146). Diese Wicklung gleicht also der Kurzschlußwicklung des Läufers eines Asynchronmotors. Auch Wirbelströme in massiven Polschuhen oder in den Nutenverschlußkeilen und ähnliche Maßnahmen verursachen gleiche Dämpfungswirkung.

Die Dämpfungsleistung ist verhältnismäßig der Schlüpfung und kann ausgedrückt werden durch:

$$N_{D\ddot{a}} = s_g \cdot N_W \text{ MW}, \quad (76)$$

worin s_g die Schlüpfung in vH bedeutet. In s_g ist sowohl die natürliche Schlüpfung infolge der Wirbelströme in den Bauteilen und der Bauform des Läufers als Turbo- oder Schenkelpollläufers mit massiven oder Blechpolen als auch die zusätzliche Schlüpfung durch den besonderen Dämpferkäfig enthalten. $s_g = 0$ gilt für die ungedämpfte Maschine, $s_g = 9$ vH entspricht einem starken, $s_g = 3$ vH einem normal gedämpften Läufer¹.

Bei der Bemessung der Dämpfung ist zu berücksichtigen, daß die Selbstinduktionen von Umspannern, Drosselspulen und langen Fernleitungen zwischen der unveränderlichen Spannung U und dem Synchronstromerzeuger die Dämpferwirkung stark vermindern können. Es müssen daher dem Maschinenrechner alle entsprechenden Angaben gemacht werden, um die günstigste Auslegung der Maschine zu erreichen. Der Aufbau des Läufers bei Turbostromerzeugern als Vollkörper bewirkt an sich bereits eine besonders kräftige Schwingungsdämpfung durch die im Eisenkörper und den Nutenverschlußkeilen entstehenden Wirbelströme, die die Feldänderung im Takt der Ständerstromschwankung beim Pendeln zu verhindern bestrebt sind.

Es sei hier bemerkt, daß die elektrischen Leistungsschwankungen nicht durch Schwungmassen im Polrad verkleinert werden können, denn solche Schwungmassen können nur mechanische Ungleichförmigkeiten ausgleichen, also kinetischen Energieausgleich herbeiführen, oder die Arbeit des Reglers der Antriebsmaschine beeinflussen.

¹ Siehe Bd. I S. 54 u. f.

Der Einfluß des Reglers soll erst weiter unten behandelt werden.

Für den mechanischen Ausgleichvorgang ist die Trägheitsleistung des Polrades und aller umlaufenden Teile des ganzen Maschinensatzes maßgebend, die sich aus dem Trägheitsmoment und der Geschwindigkeitsänderung ergibt.

Wird von dem gegebenenfalls noch zu berücksichtigenden Reglereinfluß auf den Ausgleichvorgang abgesehen, so lautet die Leistungsgleichung der Antriebsmaschine für den Ursprungszustand ω_0 :

$$N_{A, \omega_0} = \frac{\Theta \cdot \omega_0 \cdot g}{p} \cdot \frac{d^2 \alpha_p}{dt^2} + \frac{N_{D\ddot{a}}}{\omega_0 \cdot p} \cdot \frac{d \alpha_p}{dt} + k_s \cdot N_W \cdot \alpha_p + N_{W \vartheta_0}, \quad (77)$$

worin α_p den Pendelwinkel in elektrischen Graden gemessen (der räumliche Winkel ist somit $\frac{\alpha_p}{p}$),

p die Polpaarzahl,

Θ das Trägheitsmoment aller umlaufenden Teile des Maschinensatzes, bei Wasserturbinen mit Rohrleitungsanschluß einschließlich der Trägheitsmassen des Wassers in der Rohrleitung und in der Turbine, in tms^2 ,

$g = 9,81$ Umrechnungszahl,

ω_0 die Kreisfrequenz (Winkelgeschwindigkeit) der umlaufenden Teile sec^{-1} ,

$N_{W \vartheta_0}$ die Belastung bei dem Polradwinkel ϑ_0 vor dem Stoß in MW bezeichnet.

Da sich im Beharrungszustand die unveränderlichen Größen N_{A, ω_0} und $N_{W \vartheta_0}$ im Gleichgewicht halten, folgt die Differentialgleichung für den elektromagnetischen Ausgleichvorgang¹:

$$\frac{\Theta \cdot \omega_0 \cdot g}{p} \cdot \frac{d^2 \alpha_p}{dt^2} + \frac{s_g \cdot N_W}{\omega_0 \cdot p} \cdot \frac{d \alpha_p}{dt} + k_s \cdot N_W \cdot \alpha_p = 0 \quad (78)$$

und daraus unter Vernachlässigung der Dämpfung ($N_{D\ddot{a}} = 0$) die Pendelfrequenz oder Eigenschwingungszahl des Polrades²:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_S \cdot p}{\Theta \cdot \omega \cdot g}} = \frac{241}{n} \sqrt{\frac{f \cdot k_s \cdot N_W}{G \cdot D^2}}, \quad (79)$$

worin:

f die Frequenz = $\frac{p \cdot n}{60}$ Per/s,

$G \cdot D^2$ das Schwungmoment in tm^2

bezeichnet. Es ist wohl zu beachten, daß N_W in Gl. (79) in MW einzusetzen ist.

Die Dauer der Eigenschwingungen ist:

$$T_{\nu_0} = \frac{1}{\nu_0} \text{ s.} \quad (80)$$

¹ Schenkel, Dr.-Ing. M.: Die wichtigsten Gesichtspunkte für den Parallelbetrieb von Drehstromgeneratoren. Siemens-Z. 1931 Heft 5 S. 253.

² Der Gang der Lösung der Differentialgleichung ist zu finden in R. Richter: Elektrische Maschinen II. Band: Synchronmaschinen und Einankerumformer. Berlin: Julius Springer 1930.

Die Dämpfung bewirkt ein allmähliches Abklingen der Eigenschwingungen. Sie können aber immer wieder angestoßen werden, wenn im Parallelbetrieb die Netzleistung und damit die Leistung der Antriebsmaschine schwankt, oder die Erregung geändert wird.

7. Beispiel: Ermittlung der Eigenschwingungszahl eines Schenkelpolstromerzeugers an einem sehr großen (starrten) Netz:

a) auf die Sammelschienen bezogen bei Nennlast,

b) unter Zwischenschaltung eines Umspanners gleicher Leistung mit 10 vH und einer Freileitung mit 15 vH Blindspannungsabfall, bezogen auf die Klemmenspannung U_n . Die Wirkwiderstände sollen vernachlässigt werden. Leistungsfaktor: $\cos \varphi = 0,7$. Der Stromerzeuger hat eine Nennleistung von 20 MW bei 10,5 kV und $\cos \varphi = 0,7$, also 25 MVA; $f = 50$ Per/s, $n = 150$ U/min, $G \cdot D^2 = 1800$ tm², Antrieb durch Wasserturbine mit Rohrleitungsanschluß; Trägheitsmassen sind im $G \cdot D^2$ zusätzlich mit rd. 11 vH zu berücksichtigen, so daß das gesamte $G \cdot D^2 = 2000$ tm² beträgt.

Es ist:

$$X_s = \frac{U_n^2}{m_0 \cdot N_n} = \frac{10,5^2}{0,8 \cdot 25} = 5,5 \text{ Ohm/Phase}$$

und

$$E_{X_{Gn}} = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot X_s = 13,1 \text{ kV} = 125,5 \text{ vH}$$

bezogen auf U_n .

Nach den Angaben auf Seite 182 wird aber gewählt:

$$E'_{X_{Gn}} = 60 \text{ vH} = 6,3 \text{ kV},$$

$$E_{s,n} = 25 \text{ vH} = 2,63 \text{ kV},$$

$$E'_{g,n} = 35 \text{ vH} = 3,68 \text{ kV}.$$

Somit ergeben sich folgende Verhältnisse:

a) auf der Sammelschiene bezogen bei Nennlast:

$$k_s = \frac{10,5}{6,3} + 0,715 + \frac{3,68}{2,63} \cdot \frac{\frac{10,5}{6,3} \cdot 0,7^2}{\left(\frac{10,5}{6,3} + 0,715\right)^2 + 0,7^2} = 2,57,$$

$$v_0 = \frac{241}{150} \sqrt{\frac{50 \cdot 2,57 \cdot 20}{2000}} = 1,82 \text{ Per/s},$$

$$T_{v_0} = \frac{1}{1,82} = 0,55 \text{ s},$$

ohne Berücksichtigung der Dämpfung;

b) mit Zwischenschaltung von Blindwiderständen:

$$k'_s = \frac{10,5}{6,3 + 1,05 + 1,575} + 0,715 + \frac{3,68}{2,63} \cdot \frac{\frac{10,5}{8,925} \cdot 0,7^2}{\left(\frac{10,5}{8,925} + 0,715\right)^2 + 0,7^2} = 2,094,$$

$$v_0 = \frac{241}{150} \sqrt{\frac{50 \cdot 2,094 \cdot 20}{2000}} = 1,60 \text{ Per/s},$$

$$T_{v_0} = \frac{1}{1,60} = 0,625 \text{ s},$$

ohne Berücksichtigung der Dämpfung;

c) mit Zwischenschaltung von Blindwiderständen und $\cos \varphi = 1$:

$$k'_s = 1,178 + 1,4 \frac{1,178}{1,178^2 + 1^2} = 1,87,$$

$$v_0 = \frac{241}{150} \sqrt{\frac{50 \cdot 1,87 \cdot 25}{2000}} = 1,74 \text{ Per/s},$$

$$T_{v_0} = \frac{1}{1,74} = 0,574 \text{ s};$$

d) Synchronisierende Leistung der Maschine:

$$\text{bei } \cos \varphi = 0,7: \quad 2,57 \cdot 20 = 51,4 \text{ MW},$$

$$\text{bei } \cos \varphi = 1$$

und zusätzlichen

$$\text{Blindwiderständen: } 1,87 \cdot 25 = 46,8 \text{ MW}.$$

Die Eigenschwingungszahl ist am kleinsten bei Leerlauf und nimmt mit der Belastung stark zu. Bei Vollbelastung beträgt diese Zunahme etwa 4 bis 6 vH, je nachdem die Maschine nur Wirklast oder auch Blindlast abzugeben hat. Praktisch kann die Eigenschwingungszahl als eine feste Zahl angesehen werden. Sie ist weiter nahezu verhältnisgleich der Netzspannung und kann daher durch Änderung dieser sehr wesentlich beeinflusst werden. Die Änderung der Frequenz des Netzes ist dagegen von nur unwesentlichem Einfluß, wenn die Erregung der Maschine unverändert bleibt.

Abb. 177 zeigt den Verlauf solcher Eigenschwingungen ohne und Abb. 178 und 179 mit Dämpfungseinfluß. Die Leistungsschwankungen sind am Strom- und Leistungsmesser zu beobachten.

Aus Abb. 180 ist der Verlauf des Ständerstromes bei Eigenschwingungen des Polrades einer Synchronmaschine zu ersehen. Im Punkt *A* wird die Belastung der Maschine plötzlich erhöht. Der der neuen Belastung entsprechende Strom steigt nicht unmittelbar auf den neuen Wert, sondern er schwingt sich erst allmählich auf diesen Wert ein, pendelt also um den der neuen Belastung entsprechenden Mittelwert. Im Punkt *B* sinkt die Belastung plötzlich wieder auf den alten Wert zurück, obgleich die Eigenschwingungen des vorhergegangenen Zustandes noch nicht vollständig abgeklungen sind. Nunmehr tritt der gleiche Schwingungsvorgang ein. Aus Abb. 180 ist auch das Überschwingen deutlich sichtbar. Der Schwingung des Stromes entspricht die Schwingung des Polrades. Zwischen den Punkten *A* und *B* liegen 91 Perioden des Wechselstromes und 7,5 Eigenschwingungen. Somit hat eine Eigenschwingung $\frac{91}{7,5} = 12,13$ Perioden, und da eine Periode $\frac{1}{50}$ s dauert, ist die Dauer einer Eigenschwingung:

$$T_{v_0} = 12,13 \cdot \frac{1}{50} = 0,243 \text{ s}$$

und die Eigenschwingungszahl der Maschine:

$$v_0 = \frac{1}{0,243} = 4,11 \text{ Per/s}.$$

Es ist aus Gl. (79) noch zu ersehen, daß ν_0 nach $\cos \varphi = 1$ hin größer, nach $\cos \varphi = 0$ hin kleiner wird, daß also die Art der Belastung eine wesentliche Rolle spielt, was dann besonders zu beachten ist, wenn die

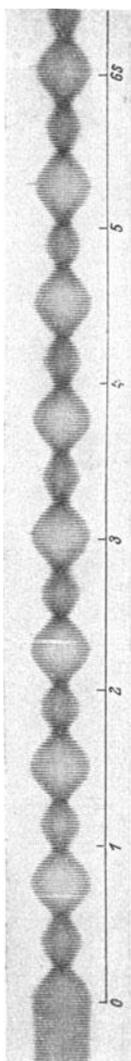


Abb. 177. Oszillographische Aufnahme des Pendelvorganges bei einem Schenkelpolstromerzeuger ohne Dämpferwicklung. 1,725 MVA, 500 U/min.; Pendelfrequenz 1,3 Per/s (Eigenschwingungszahl).

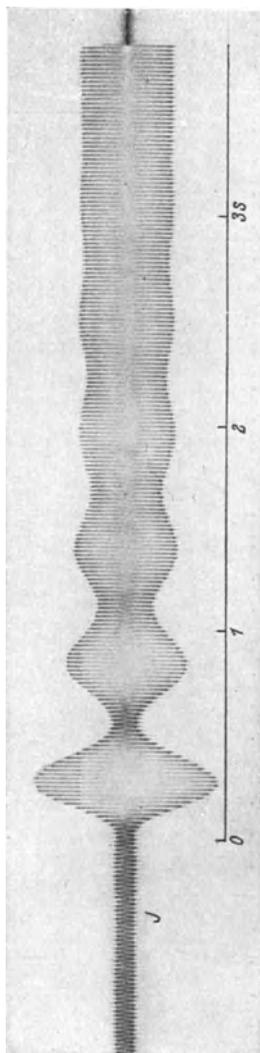


Abb. 178. Oszillographische Aufnahme des Pendelvorganges bei einem Schenkelpolstromerzeuger mit Dämpferwicklung. 0,8 MVA, 750 U/min.; Pendelfrequenz 1,78 Per/s (Eigenschwingungszahl).

Maschine mit schlechtem Leistungsfaktor bzw. kapazitiv belastet ist, oder als Phasenschieber mitarbeiten soll.

Die synchronisierende Leistung in ihrem Verhältnis zur Nennleistung der Maschine ist für die Eigenschwingungsdauer der Maschine maßgebend. Da die synchronisierende Leistung durch die Wirk- und Blindbelastung des Stromerzeugers stark verändert wird, ist ihre Ermittlung für die verschiedensten Betriebsfälle sehr schwierig namentlich dann, wenn die Eigenschwingungszahl in die Nähe der Frequenz der erzwungenen Schwingungen kommt, wenn also Resonanzgefahr besteht.

Die mit Gl. (79) berechnete Eigenfrequenz stimmt bei Schenkelpolmaschinen mit der aus Versuchen festzustellenden zumeist gut überein. Bei Turbo-stromerzeugern ergeben sich dagegen Abweichungen oft sehr großen Ausmaßes.

Das über die Änderung des Scheinwiderstandes bei der synchronen Leistung Gesagte gilt auch für die synchronisierende Leistung und den Winkel α der Auslenkung.

Die dynamische Stabilitätsgrenze wird durch die im Läufer vorhandenen Schwungmassen erweitert, die eine Erhöhung der Zeit bis zum Erreichen dieser Grenze bewirken. Das ist besonders bei Stoßbelastun-

gen (Schmelzöfen, Bahnbetrieb) zu beachten. Bei plötzlicher Kurzschlußbelastung kann das Außertrittfallen der Maschinen durch diese Zeiterhöhung so verzögert werden, daß der Überstromschutz (einschließlich Eigenschaltzeit des Schalters) die Fehlerstelle vor dem Außertrittfallen bereits abgeschaltet hat. Sind die Maschinen ins Pendeln gekommen

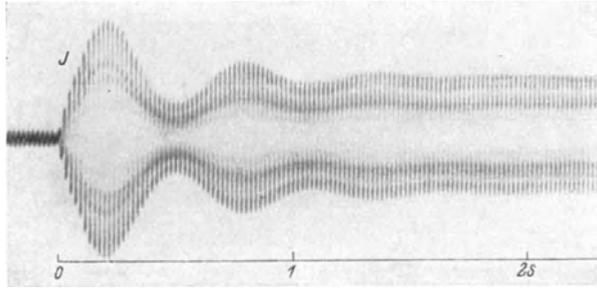


Abb. 179. Oszillographische Aufnahme des Pendelvorganges bei einem Turbostromerzeuger mit starker Dämpfung. 4 MVA, 3000 U/min; Pendelfrequenz 1,72 Per/s (Eigenschwingungszahl).

men, so kann die schnelle Fehlerabschaltung das Wiederfangen der Maschinen bewirken, bevor sie aus dem Tritt fallen. Auf die Ausführung der Erregung mit größtmöglicher Erregungsgeschwindigkeit (Schnell-

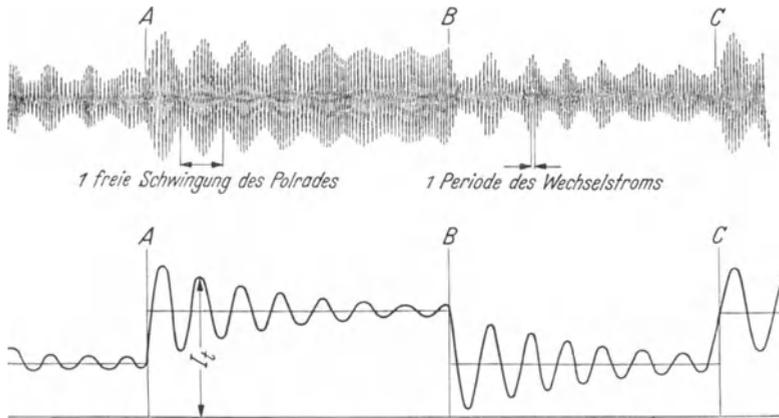


Abb. 180. Verlauf des Ständerstromes bei Eigenschwingungen des Polrades eines Synchronstromerzeugers.

erregung, Stoßerregung, Unterdrückung der Wirbelstrombildung in den magnetischen Bahnen) ist hier wiederum hinzuweisen.

Sind die Kraftwerke aus dem Tritt gefallen, dann fließen über die Leitungen Ausgleichströme (Abb. 181), die kurzschlußartige Eigenschaften aufweisen, ihre Größe aber stetig verändern ähnlich dem Ausschlag eines Pendels. Diese Vorgänge bezeichnet man als Netzpendelungen. Dabei dürfen nicht etwa die unabhängig verzögerten Meßwerke

der Maschinenschalter ansprechen, sondern es muß der Leitungs-Wahl-schutz richtig eingreifen, um den Eintritt von Netzpendelungen zu verhindern¹. Die Netzpendelungen treten vornehmlich in Freileitungsnetzen auf. In Kabelnetzen kommen sie selten vor, weil hier starke Ver-maschungen, große Leiterquerschnitte, kleine Leiterlängen, somit kleine Impedanzen vorhanden sind.

Die Pendelfrequenz ist:

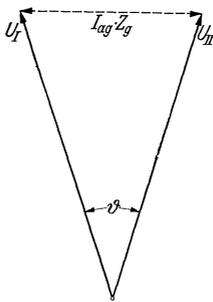
$$f_p = f_I - f_{II} \text{ Per/s} \quad (81a)$$

f_I Frequenz des Kraftwerkes I,

f_{II} Frequenz des Kraftwerkes II.

Die Pendeldauer ist:

$$T_p = \frac{1}{f_p} \leq 0,25 \div 0,3 \text{ s}; \quad (81b)$$



das ist die Zeit, während der Winkel ϑ alle Werte von 0 bis 360° durchläuft.

Für den Fall, daß die beiden Kraftwerke auf gleiche Spannungen $U_I = U_{II}$ im Verbundbetrieb eingeregelt waren und diese Werte nicht verändert werden, ist der Ausgleichstrom nach Abb. 181:

$$I_{ag} = \frac{2 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_g} \sin \frac{\vartheta}{2} \text{ kA.} \quad (82)$$

Abb. 181. Ausgleichstrom zwischen zwei pendelnden Kraftwerken bei gleicher Spannung $U_I = U_{II}$.

Liegen mehrere Synchronmaschinen im Parallelbetrieb, fällt also die Voraussetzung des starren Netzes, und nehmen alle Maschinen an den Laständerungen teil, wie es den tatsächlichen Verhältnissen in der Mehrzahl der Fälle entspricht, so

wird die Berechnung der Wirkung eines Belastungsstoßes oder einer Entlastung im Netz auf die einzelnen Maschinen sehr umständlich und ist kaum noch zu lösen. Es ist aber naturgemäß, daß sich ein Leistungsstoß auf die einzelnen Maschinen entsprechend ihrer synchronisierenden Leistung zu der Gesamtnetzleistung aufteilt, wobei die zwischenliegenden Scheinwiderstände oder Blindwiderstände zu berücksichtigen sind. Auch die Vorbelastung der einzelnen Maschinen nach Wirk- und Blindleistung ist dabei zu beachten insofern, ob noch eine Sicherheit für den Ausschwingwinkel α vorhanden ist.

Zu diesen Betriebsvorgängen ist weiter folgendes zu bemerken:

Im Beharrungszustand des Netzbetriebes für einen bestimmten Belastungsfall hat das Netz eine ideelle Eigenfrequenz als Mittelkraft der Eigenfrequenzen aller Maschinen, denn die Maschinen schwingen stets, wenn auch zunächst ohne Bedeutung. Jede Maschine arbeitet mit dem ihren Belastungsverhältnissen entsprechenden Polradwinkel ϑ und wird nun von einer plötzlichen Stoßbelastung nach Maßgabe ihrer elektrischen und mechanischen Bauverhältnisse, sowie der etwa zu berücksichtigenden Scheinwiderstände betroffen. Da die Eigenschwingungen auch

¹ Parschalk, Fr.: Das Verhalten des BBC-Distanzrelais bei Netzpendelungen. BBC-Nachr. 1936 S. 17.

von dem Schwungmoment des Läufers abhängig sind, ändert die Stoßbelastung die ideelle Eigenschwingungszahl des Netzes durch Änderung der Eigenschwingungszahl jeder beteiligten Maschine. Daraus folgt, daß eine plötzliche Leistungsänderung im Netz stärkere Pendelungen aller Maschinen gegeneinander auslösen kann, die unter Umständen zum Außertrittfallen einer stark vorbelasteten Maschine oder auch zum Zusammenbrechen des ganzen Netzbetriebes führen können. Das ist schon beim fehlerhaften Parallelschalten eines Stromerzeugers oder eines Synchronmotors möglich. Aus diesen Gründen ist in großen Netzen der Aufrechterhaltung des Betriebes bei plötzlichen größeren Laständerungen ganz besondere Beachtung zu widmen. Maschinen mit großer Eigenschwingungszahl, sog. starre Maschinen mit großer synchronisierender Leistung und kleinem Schwungmoment sind nicht gleich gefährdet wie Maschinen mit kleiner Eigenschwingungszahl (weiche Maschine) und großem Schwungmoment, die durch Überspringen leichter aus dem Tritt fallen. Um bei Stoßbelastungen durch Kurzschluß auf der Strecke das Außertrittfallen eines Kraftwerkes zu verhüten, muß der Überstromschutz so schnell arbeiten, daß die Fehlerstelle in etwa 0,3 bis 0,5 s abgeschaltet ist. Dann ist zumeist zu erwarten, daß sich die ins Pendeln gekommenen Maschinen wieder fangen, eine Betriebsstörung also vermieden wird.

Beim Parallelarbeiten mehrerer Synchronmaschinen bedingt das Schwingen der einzelnen Maschinen, daß auch der Netzvektor um eine feste Nullage schwingt. Aus Abb. 182 ergibt sich, wenn β den räumlichen Winkel zwischen den Netzvektoren bezeichnet, für die augenblickliche Leistung:

$$N'_W = N_W + k_s \cdot (\alpha_{P_1} - \beta) \cdot N_W \text{ MW}, \quad (83)$$

somit für die synchronisierende Leistung:

$$N'_s = k_s \cdot (\alpha_P - \beta) \cdot N_W \text{ MW}, \quad (84a)$$

für die Dämpfungsleistung:

$$N'_{Dä} = \frac{s'_g \cdot N_W}{\omega_0 \cdot p} \cdot \frac{d(\alpha_P - \beta)}{dt} \text{ MW} \quad (84b)$$

und für die Bewegungsgleichung der parallelgeschalteten Synchronmaschine:

$$\Theta \cdot \omega_0 \cdot g \cdot \frac{d^2 \alpha_P}{dt^2} + \frac{s'_g \cdot N_W}{\omega_0 \cdot p} \cdot \frac{d(\alpha_P - \beta)}{dt} + k_s \cdot N'_W \cdot (\alpha_P - \beta) = 0. \quad (85)$$

Für diesen Fall, der insbesondere noch dann eine Abweichung erfährt, wenn die Stromerzeuger von unterschiedlichen Antriebsmaschinengattungen angetrieben werden (Turbinen und Kolbenkraftmaschinen), schwingt also der Netzvektor ebenfalls um eine feste Nullage, der synchronen Lage, die der mittleren Leistung entspricht.

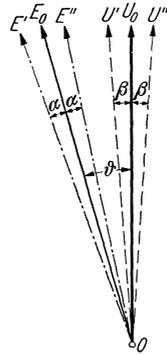


Abb. 182. Eigenschwingungen des Vektors der EMK und des Vektors der Klemmenspannung.

Für den Betrieb ergibt sich zunächst, daß infolge des Einflusses der Erregung und der Wirk- und Blindbelastung die parallel arbeitenden Maschinen innerhalb eines Kraftwerkes möglichst so eingestellt werden, daß die Eigenschwingungszahlen einander angeglichen sind. Eine Maschine leer oder schwachbelastet mitlaufen zu lassen, kann bei Belastungsstößen dazu führen, daß diese Maschine aus dem Tritt fällt und das ganze System so stört, daß der Betrieb unzulässig beeinflußt wird.

Liegen mehrere, in Leistung und elektrischem Aufbau ungleiche Maschinen im Parallelbetrieb, so beteiligen sie sich einzeln entsprechend ihren synchronisierenden Leistungen an den Störungs- bzw. den neuen Leistungsverhältnissen, wobei die in ihnen wirksamen, dann ebenfalls verschiedenen Dämpfungen (z. B. bei der einen Maschine 5 vH, bei einer zweiten Maschine 10 vH) Leistungsschwebungen zwischen den Maschinen auslösen, und das Pendeln bei abweichenden Eigenschwingungszahlen zum asynchronen Durcheinanderlaufen führen kann. Kommen dazu noch Reglereinflüsse in Gegensatz zueinander bei großen Dampf- und Wasserturbinenantrieben, so kann aus der Leitungsstörung auf der Strecke eine Maschinenstörung in den Kraftwerken folgen, die je nach dem Arbeiten der Erregung mit Schnellregler und der Ausschalt-einstellung der Maschinenschalter für einzelne Fälle zu überprüfen ist. Dabei ist ferner zu berücksichtigen, ob eine oder mehrere Maschinen-gruppen mit ihren Umspannern in der Kurzkupplung, also ohne zwischenliegende Schalter verbunden oder auf der Maschinenseite ohne Umspanner auf die Sammelschienen geschaltet sind.

Für die wesentliche Änderung von N_s sind die folgenden Störungsfälle von besonderer Bedeutung:

Kurzschluß auf der Fernleitung je nach seiner Entfernung von den einzelnen Kraftwerken,

Ausfall eines Stromkreises einer Doppelleitung ohne Belastungsänderung,

Auftrennen einer Ringleitung ohne Belastungsänderung,

Ausfall eines größeren Umspannwerkes,

Ausfall eines größeren Maschinensatzes.

Wenn vorher davon gesprochen wurde, daß die Kupplungsanlagen für den Verbundbetrieb leistungsfähig sein müssen, so gilt das nicht nur für mittlere Übertragungsspannungen, sondern in der Großstromversorgung mit z. B. 220 kV auch dann, wenn Z_g groß ist gegenüber den zusammengeschlossenen Leistungen. Hier kommt noch der Einfluß der Leitungskapazitäten und der zu ihrer Beherrschung bzw. Steuerung eingebauten Regeleinrichtungen (Synchronmotoren, Drosselspulen) hinzu. Auch die Über- oder Untererregung der einzelnen Stromerzeuger zur Beherrschung der Spannungsverhältnisse und der wirtschaftlichsten Verlustverteilung ist zu berücksichtigen.

Je ausgedehnter der Großverbundbetrieb gestaltet wird, um so mehr müssen alle diese Verhältnisse rechnerisch überprüft werden, um der Hauptbetriebsführung die entsprechenden Unterlagen an die Hand zu geben und damit die Sicherheit des Verbundbetriebes an sich zu erhöhen. Dazu gehört auch das betriebsmäßige Parallelschalten einzelner Ma-

schinengruppen nach den Belastungsverhältnissen, das Schnellparallel-schalten (Grobsynchronisieren) bei Störungen, die Wahl und Einstellung des Überstromschutzes und der Einschluß aller großen Synchronmotoren. Wenn heute in zusammengeschlossenen großen Netzen das Außertrittfallen von Maschinen verhältnismäßig selten ist, so hat das seine Ursachen einmal in dem verhältnismäßig kleinen Polradwinkel ϑ , mit dem die Maschinen auch bei Vollast arbeiten und ferner in der Durchbildung des Überstromschutzes mit Pendelsperren (S. 363).

Die erzwungenen Schwingungen. Während bei der Dampfturbine und der Wasserturbine das auf das Polrad ausgeübte Drehmoment vollständig gleichmäßig verläuft, ist bei allen Kolbenmaschinen dieses Drehmoment in der Zeit einer Umdrehung nicht vollständig gleichmäßig, sondern schwankt periodisch zwischen Höchst- und Mindestwerten, die aus dem Tangentialdruckschaubild festzustellen sind. Diese Antriebsmaschinen sind also Taktgeber und rufen als solche erzwungene Schwingungen des Polrades hervor. Die Drehmomentschwankungen als Anstöße auf das Polrad sind abhängig von der Zahl der Zylinder, den Zündzeitpunkten, der Kraftzuführung zu diesen (einfach- oder doppelwirkend) und der Kurbelstellung, sowie von dem Schwungmoment des Polrades und eines etwa vorhandenen Zusatzschwungrades, der Dämpfung und dem synchronisierenden Moment der Synchronmaschine¹.

Aus der Bewegungsgleichung der Synchronmaschine am starren Netz [Gl. (78)] errechnet sich die erzwungene Schwingung, wenn die Dämpfungsleistung und die synchronisierende Leistung = 0 gesetzt werden, für die Wirkung der Grundschiwingung:

$$\frac{\Theta \cdot \omega_0 \cdot g}{p} \cdot \frac{d^2 \alpha_p}{dt^2} = B_1 \cdot \sin 2\pi \cdot \nu \cdot t. \quad (86)$$

Diese Gleichung entspricht der nicht parallelgeschalteten Maschine. Zum besseren Auseinanderhalten ist für α_p daher die Winkelbezeichnung α_ν eingeführt.

Die Grundschiwingungszahl ν_z der erzwungenen Schwingungen ergibt sich aus der Zahl der Umdrehungen in der Sekunde bei Zweitaktmaschinen und aus der halben Umdrehungszahl in der Sekunde bei den einfach- und doppelwirkenden Viertaktmaschinen. Es ist:

bei Zweitaktmaschinen:

$$\nu_z = \frac{n}{60} \text{ Per/s}, \quad T_{\nu_z} = \frac{60}{\nu_z} \text{ s}, \quad (87)$$

bei Viertaktmaschinen:

$$\nu_z^n = \frac{n}{2 \cdot 60} \text{ Per/s}, \quad T_{\nu_z} = \frac{2 \cdot 60}{\nu_z} \text{ s}. \quad (88)$$

Auf die Oberschwingungen soll nicht weiter eingegangen werden.

Die Schwingungszahl der erzwungenen Schwingungen ist immer fest mit der erregenden Taktzahl verbunden. Sie kann nicht geändert werden,

¹ Parallel am Netz hängende Synchronmotoren für den Antrieb von Arbeitsmaschinen mit ungleichförmigem Belastungsmoment z. B. Kolbenpumpen erzeugen ebenfalls erzwungene Schwingungen.

da die Drehzahl der Antriebsmaschine praktisch nicht geändert werden kann, wenn die Netzfrequenz festliegt und gehalten werden muß. Auch die Änderung der elektromagnetischen Eigenschwingungszahl des Stromerzeugers ist ohne Einfluß. Eine solche Änderung hat nur eine Änderung der Schwingungsweite zur Folge.

Die Schnelligkeit der erzwungenen Schwingungen hat sehr großen Einfluß auf die Schwankungen der elektrischen Leistung. Bei unveränderter Netzspannung muß sich auch der Wirkstrom ändern. Verlaufen die erzwungenen Schwingungen nicht rein sinusförmig, so sind ferner die Oberwellen noch zu beachten.

Die Bewegung des Polrades kann durch Übereinanderlagerung von zwei einfachen Bewegungen entstanden gedacht werden. Die Hauptbewegung ist der Umlauf mit unveränderter Winkelgeschwindigkeit ω_m und die zweite die Pendelbewegung um eine Mittelstellung. Im Parallelbetrieb mit einem gleichmäßig angetriebenen Stromerzeuger leistet also die ungleichmäßig angetriebene Maschine bald mehr bald weniger je nach der gegenseitigen Lage der Läufer. Ist in Abb. 183 durch den Punkt B die mittlere Leistung der Maschine in Abhängigkeit vom Pen-

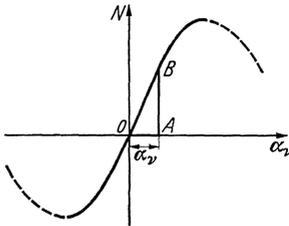


Abb. 183. Leistung (Drehmoment) in Abhängigkeit vom Pendelwinkel α_v .

delwinkel α_v gekennzeichnet (Strecke \overline{AB}), so pendelt die Maschine um diese durch Punkt A bestimmte Lage hin und her.

Wird α_v größer als etwa 80° , so fällt der Stromerzeuger mit diesem Polradwinkel aus dem Tritt. Bei sinusförmigem Verlauf der Schwingungsbewegung ist¹:

$$\alpha_v = \alpha_m + \alpha_{vz} \cdot \sin(v_z \cdot \omega_m \cdot t) \quad (89)$$

α_{vz} = Winkelabweichung in elektrischen Graden.

v_z ist die Anzahl der vollständigen Schwingungen der Antriebsmaschine während einer Umdrehung. Es ist in elektrischen Graden gemessen:

$$\alpha_{vz} = \frac{p \cdot \delta}{2 \cdot v_z} \cdot \frac{180}{\pi} = \frac{p \cdot \delta}{2 \cdot v_z} \cdot 57,3^\circ \quad (90)$$

und daraus der Ungleichförmigkeitsgrad:

$$\delta = \frac{\alpha_{vz} \cdot 2 \cdot v_z}{57,3 \cdot p} \quad (91)$$

8. Beispiel: Für einen durch einen Viertakt-Dieselmotor angetriebenen Drehstromerzeuger bei $n = 300$ U/min und $f = 50$ Per/s ist: die Grundschnwingungszahl:

$$v_z = \frac{n}{2 \cdot 60} = \frac{300}{120} = 2,5 \text{ Per/s,}$$

¹ Arnold, E.: Die Wechselstromtechnik IV. Band.

² Hier ist der Winkelbogen statt des Sinus des Winkels eingesetzt, was mit Rücksicht auf die Kleinheit des Winkels zulässig ist.

und der Ungleichförmigkeitsgrad:

$$\delta = \frac{2 \cdot \nu \cdot \alpha_{\nu z}}{57,3 \cdot p} = \frac{2 \cdot 2,5 \cdot \alpha_{\nu z}}{57,3 \cdot 10} = \frac{1}{114,5} \cdot \alpha_{\nu z}.$$

Soll $\alpha_{\nu z} \leq 3$ sein, so muß werden:

$$\delta \leq \frac{3}{114,5} \leq \frac{1}{38,2}.$$

Bei:

$$n = 150 \text{ U/min} \quad \text{wird} \quad \delta \leq \frac{1}{78} \quad (p = 20).$$

Eine vielpolige also langsamlaufende Maschine erfordert somit einen viel kleineren Ungleichförmigkeitsgrad als eine schnelllaufende Maschine.

Hat der Stromerzeuger mit allen wirksamen Schwungmassen andererseits bei einem Ungleichförmigkeitsgrad von $\delta = \frac{1}{470}$ ein Schwungmoment von 30000 kgm², so ist:

$$\alpha_{\nu z} = \frac{10 \cdot 1 \cdot 57,3}{470 \cdot 2 \cdot 2,5} = 0,2^\circ.$$

Über den Ungleichförmigkeitsgrad bei Kolbenkraftmaschinen ist bereits im Band III/1 gesprochen worden, worauf verwiesen werden muß.

Die Frequenz der erzwungenen Schwingungen ist angenähert:

$$\nu_z = \frac{\delta}{2 \cdot \alpha_{\nu z}} = \frac{N_W}{1,314 \cdot \alpha_{\nu z} \cdot n \cdot \frac{G \cdot D^2}{4 \cdot g}} \text{ Per/s.} \quad (92)$$

Das Schwungmoment beeinflusst naturgemäß das Gewicht des Läufers, die Bauform desselben, den zu wählenden Baustoff, die Polbefestigung, die Abmessungen und den Preis, ferner die Abmessungen des Maschinenhauskranes, die Fracht und die Einbaukosten. Es ist daher bei der Beurteilung des Stromerzeugers auch die Lösung der Schwungmomentfrage sehr zu beachten.

Treten Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen gleichzeitig auf, so können sie so verlaufen, daß ihre Frequenzen sich zu einer Schwingung zusammensetzen, deren Amplitude außerordentlich groß wird. Ohne auf weitere theoretische Untersuchungen einzugehen, genügt hier die Angabe des sogenannten Resonanzmoduls nach Görges, dessen Wert durch das Verhältnis der erzwungenen Schwingungszahl ν_z zur Eigenschwingungszahl ν_0 bestimmt wird aus der Gl. (93):

$$\zeta = \frac{\nu_z^2}{\nu_z^2 - \nu_0^2}. \quad (93)$$

Abb. 184 zeigt den Verlauf von ζ in Abhängigkeit von der Schwingungszahl ν_z für eine Maschine mit gleichbleibender Eigenschwingungszahl. Der Einfluß der Dämpfung ist besonders zu beachten.

Es ist nun aus Gründen der Resonanzgefahr eine Grundbedingung für den einwandfreien Parallelbetrieb, daß keine einzige der verschiedenen Schwingungszahlen der Grund-

schwingungen und Oberschwingungen in der Nähe des kritischen Zustandes $\nu_Z = \nu_0$ liegt. Entweder müssen die erzwungenen Schwingungen alle höher als ν_0 , oder besonders bei Maschinen, deren Grundschriftungszahl der halben Drehzahl entspricht, derart liegen, daß ν_Z unterhalb ν_0 und alle Schwingungszahlen höherer Ordnung also $2\nu_Z, 3\nu_Z$ über ν_0 liegen. Der Maschinenrechner muß also auf alle diese Verhältnisse achten und sie berücksichtigen z. B. in der Bemessung des Schwungmomentes.

Ganz besonders schwierig gestalten sich die Verhältnisse, wenn ein bisher selbständiges Kraftwerk mit Antrieben, die erzwungene Schwingungen auslösen, entweder mit einem ähnlichen oder auch mit einem Dampfturbinen- bzw. Wasserturbinenkraftwerk parallel arbeiten soll. Es kann dann leicht vorkommen, daß dieser Parallelbetrieb unmöglich wird, weil Resonanzgefahr der Schwingungen besteht. Umbauten an vorhandenen Maschinen¹ lassen sich zumeist nicht vornehmen.

Dr. Sarfert² kommt in seinen Untersuchungen zu folgendem Ergebnis:

Um zu vermeiden, daß ein synchroner Motor oder Stromerzeuger mit der Eigenschwingungszahl ν_0 in starkes Mitschwingen gerät, darf von keinem der aufs Netz arbeitenden Stromerzeuger eine erzwungene Schwingung ausgehen, deren Schwingungszahl ν_Z in der Nähe von ν_0 liegt. Wenn es sich um einen Stromerzeuger

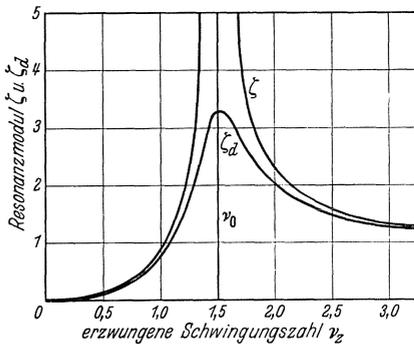


Abb. 184. Resonanzmodul ζ in Abhängigkeit von der erzwungenen Schwingungszahl ν_Z für eine Maschine mit der gleichbleibenden Eigenschwingungszahl $\nu_0 = 1,5$. ζ gilt für ungedämpfte, ζ_d für gedämpfte Schwingungen.

handelt, genügt es also nicht, die Periodenzahl der von der eigenen Antriebmaschine ausgehenden Schwingungen auf ihre Übereinstimmung mit ν_0 zu prüfen, sondern es ist notwendig, auf die Antriebmaschinen aller aufs Netz arbeitenden Stromerzeuger Rücksicht zu nehmen.

Für die Gesamtheit der Stromerzeuger³ gilt folgendes: Die Eigenschwingungszahlen ν_1, ν_2, ν_3 der sämtlichen Maschinen geben den Bereich der gefährlichen Werte an, in welchen keine von den erzwungenen Schwingungszahlen hereinfallen darf. Man kann daher jeder Gefahr aus dem Wege gehen, wenn man dafür sorgt, daß alle erzwungenen Schwingungszahlen größer sind als alle Eigenschwingungszahlen. Die Umlaufzahlen der Stromerzeuger für Zweitakt-diesel- oder Gasmaschinen müssen

¹ Punga, F.: Verbesserung des Parallellaufes von Maschinen, die durch Gasmaschinen oder Dieselmotoren angetrieben werden. Arch. Elektrotechn. Bd. 19 Heft 4 S. 513 und ETZ 1928 S. 1051 Heft 28 (elastische Kupplung zwischen Schwungrad und Generator).

² s. S. 180 Fußnote.

³ Die Eigenschwingungszahlen der Synchronmotoren liegen wesentlich höher als die der Stromerzeuger. Daher können die folgenden Sätze nicht ohne weiteres auf Synchronmotoren übertragen werden.

danach höher liegen als alle auf die Minute bezogenen Werte von Eigenschwingungszahlen.

Wenn es sich um Viertaktmaschinen handelt, würde diese Forderung nach Bonte¹ die Anwendung übermäßig großer Schwungmassen notwendig machen, weil durch den Viertakt sehr langsame Grundschwingungen entstehen, deren Frequenz durch die halben Umdrehungszahlen gegeben ist. Daher müßte man in diesem Fall die Verhältnisse so einrichten, daß sämtliche Werte von $\nu_1, \nu_2, \nu_3 \dots$ in den Bereich zwischen den Grundschwingungszahlen und den ersten Oberschwingungszahlen fallen. Damit dieser Bereich gewissermaßen möglichst viel Platz bietet, ist es zweckmäßig, alle Grundschwingungszahlen auf einen bestimmten Wert zu bringen, also eine bestimmte Umlaufzahl für alle Maschinen beizubehalten — das ist auch mit Rücksicht auf die Vermeidung der Schwebungen zweckmäßig —, und damit andererseits die Eigenschwingungszahlen gewissermaßen möglichst wenig Platz brauchen, wird man gut tun, auch alle Eigenschwingungszahlen auf einen bestimmten Wert zu bringen, natürlich auf einen möglichst günstigen Wert innerhalb des angegebenen Bereichs. Die Lage dieses günstigen Wertes ist verschieden je nach dem Maß, in welchem die Grundschwingungen gegenüber den Oberschwingungen in den Tangentialdruckschaubildern der Antriebsmaschinen ausgeprägt sind.

Maschinen mit wenigen Zylindern erfordern im allgemeinen große Schwungmomente, Maschinen mit vielen Zylindern dagegen häufig nur kleine. Bei ungünstigem Tangentialdruckschaubild kann es vorkommen, daß der Parallelbetrieb sogar nur durch ungewöhnlich große Schwungmomente erreichbar ist, und man sich dann mit mäßig gutem Parallelbetrieb begnügen muß, der heute im Verbundbetrieb für die öffentliche Stromversorgung nicht mehr zulässig ist. Besonders schwierig liegen die Parallelbetriebsverhältnisse dann, wenn Maschinen mit ungleichen Drehzahlen zusammenarbeiten, weil die Resonanzbereiche der verschiedenen Antriebstakte anderer Maschinen sich gewöhnlich überschneiden, so daß stärkere Schwingungen nicht vermieden werden können. In solchen Fällen muß der neu aufzustellende Stromerzeuger eine besonders bessere Dämpferwicklung erhalten.

9. Beispiel: Es soll untersucht werden, ob der Drehstromerzeuger eines Industrierwerkes von 3,1 MVA, $\cos \varphi = 0,8$ mit Viertakt-Gasmotorenantrieb, der über einen Umspanner von 1,25 MVA mit dem (starrten) Netz einer Großstromversorgung zu Aushilfszwecken verbunden ist, im Parallelbetrieb betrieben werden kann, ein Fall, der bei Eigenanlagen häufiger anzutreffen ist. Die Rechnungsdaten sind:

$$N_n = 3,1 \text{ MVA}, \quad \cos \varphi = 0,8, \quad 6 \text{ kV}, \quad G \cdot D^2 = 2700 \text{ tm}^2, \quad n = 94 \text{ U/min}, \\ f = 50 \text{ Per/s}, \quad k_s = 2,0.$$

Dann ist die Pendelfrequenz der Maschine, wenn der Stromerzeuger unmittelbar am starren Netz liegen würde:

$$\nu_0 = \frac{241}{94} \sqrt{\frac{50 \cdot 2 \cdot 3,1 \cdot 0,8}{2700}} = 0,775 \text{ Per/s.}$$

¹ Z. VDI 1906 S. 1362.

Da aber die Maschinenspannung mit 6 kV zur Verbindung mit dem Großversorgungsnetz die Zwischenschaltung einen Umspanner erfordert, dieser jedoch nur für Aushilfzwecke mit einer Leistung von 1,25 MVA vorhanden ist, so ergibt sich im Parallelbetrieb bei:

einer Kurzschlußspannung von $e_k = 4$ vH des Umspanners,

oder bezogen auf die Leistung des Stromerzeugers

$$e'_k = 4 \text{ vH} \frac{3,1}{1,25} \cong 10 \text{ vH}$$

für:

$$k'_s = \frac{1}{0,50 + 0,10} = 1,66$$

und die Pendelfrequenz nunmehr zu:

$$\nu'_0 = \frac{241}{94} \sqrt{\frac{50 \cdot 1,66 \cdot 3,1 \cdot 0,8}{2700}} = 0,712 \text{ Per/s.}$$

Die Grundschriftungszahl ν_z der erzwungenen Schwingung der Antriebsmaschine liegt, da es sich um eine Viertaktmaschine handelt, bei:

$$\nu_z = \frac{94}{2 \cdot 60} = 0,785.$$

Der Parallelbetrieb über diesen kleinen Umspanner ist daher nicht mit der erforderlichen Sicherheit möglich, da sehr starke Resonanznähe besteht, wenn der Leistungsfaktor etwas höher gehalten wird, durch die sehr heftige Pendelungen hervorgerufen werden würden, die den Betrieb des ganzen Netzes stören könnte. Es muß daher ein wesentlich größerer Umspanner oder eine Zusatzdrosselspule aufgestellt werden. Letztere würde aber die Spannungsregelung zu stark beeinflussen und kann daher nicht eingebaut werden.

Würde die Maschine unmittelbar an das Netz gelegt werden können, so wären die Frequenzen ebenfalls nicht weit genug entfernt und der Parallelbetrieb nicht ohne weiteres zulässig.

Sollen zu vorhandenen Maschinen neue, durch Kolbenkraftmaschinen angetriebene Stromerzeuger hinzukommen, so ist es unter Umständen erforderlich, wegen der Resonanzgefahr für letztere bestimmte Drehzahlen auszuschließen, oder die anzuwendende Drehzahl durch den Maschinenrechner vorschreiben zu lassen, um den Parallelbetrieb nicht zu gefährden. Auch hierauf ist ganz besonders bei der Entwurfsbearbeitung zu achten, damit nicht nach Aufstellung einer neuen Maschine Betriebsschwierigkeiten auftreten, die zu großen Geld- und Zeitverlusten führen. Es ist möglichst darauf zu achten, daß gleichartige und in der Drehzahl gleichliegende Maschinen zusammenarbeiten.

Die selbsterregten Schwingungen¹. Diese Art der Schwingungen können durch die Wirkung des Kraftmaschinenreglers hervorgerufen werden. Jeder Regler arbeitet in Abhängigkeit von der Drehzahl der Maschine und verstärkt oder vermindert die Leistungszufuhr, je nachdem die Drehzahl unter oder über die mittlere Drehzahl abweicht. Die Reglerarbeit kann aber erst einsetzen, wenn der Anstoß dazu gegeben, wenn also die Drehzahlabweichung eingetreten ist. Es liegt somit zwischen Ursache und Wirkung eine Verzögerungszeit T_{Re} , die sich aus der

¹ Reinhardt, E.: Selbsterregte Schwingungen beim Parallelbetrieb von Synchronmaschinen. Siemens-Z. 1925 S. 431.

Bauart des Reglers, seiner Arbeitsweise an sich, den zur beschleunigen den Massen des Reglers und der Übertragungseinrichtungen, sowie dem Weg des Treibmittels bis zur Arbeitsstelle in der Maschine ergibt.

Da jede parallel arbeitende Synchronmaschine bei Laststößen Eigenschwingungen ausführt, die je nach der synchronisierenden Kraft und der Dämpfung mehr oder weniger große Auslenkwinkel bedingen und schneller oder langsamer zum Abklingen kommen, kann es vorkommen, daß die Wirkung des Reglers auf die Leistungszufuhr zu einer Zeit einsetzt, wo bereits eine halbe Eigenschwingung vorüber ist. Dann wirkt der Regler gerade in der entgegengesetzten Phase der Schwingung, verstärkt diese und ist somit die Ursache der selbsterregten Schwingungen. Ein kurzes Beispiel wird diesen Vorgang schnell erkennen lassen:

Das Polrad ist durch einen Laststoß in Eigenschwingungen gekommen, der Regler soll eine Verstärkung der Leistungszufuhr bewirken. Liegt das Polrad in einer Schwingungsphase der Verzögerung, so wird der Regler zur Öffnung angestoßen. Beträgt die Reglerverzögerungszeit $T_{Rv} = \frac{1}{2} T_{v_0}$, so ist inzwischen das Polrad in den Bereich größerer Drehzahl gekommen, und nunmehr wirkt der Regler im Sinne einer verstärkten Leistungszufuhr. Er stößt also das Polrad weiter an, und dieses kommt dadurch in noch höhere Schwingung. Inzwischen ist das Polrad wieder in den Bereich der Verzögerung gekommen, und der Regler wird zur entgegengesetzten Wirkung veranlaßt. Da diese aber erst nach $T_{Rv} = \frac{1}{2} T_{v_0}$ einsetzt also wiederum in einer Schwingungsphase erhöhter Drehzahl, wird die Drehzahl weiter verstärkt. Somit erzeugt die Wirkung des Reglers eine Verstärkung also ein Aufschaukeln der Schwingungen; dieses sind die selbsterregten Schwingungen. Der Regler wirkt bei $T_{Rv} = \frac{1}{2} T_{v_0}$ um eine halbe Schwingung phasenverschoben, wenn T_{v_0} sich nicht ändert. Ist die Synchronmaschine ungedämpft, so werden die Eigenschwingungen nicht abklingen, sondern sich durch die Reglerwirkung immer mehr aufschaukeln. Ist die Maschine gedämpft, so kann die Wirkung der Dämpfung durch die Reglerwirkung aufgehoben, oder sogar negativ werden. Auch hier tritt dann ein Aufschaukeln ein. Durch die Einstellung der Reglerverzögerungszeit können die selbsterregten Schwingungen beeinflusst werden. Die Dämpferwicklung hierzu zu benutzen wird zumeist nicht angewendet, weil ihre nachträgliche Änderung nicht gut möglich ist, und schon bei der Berechnung der Synchronmaschine auf die selbsterregten Schwingungen nicht Rücksicht genommen werden kann. Bei der Wahl des Kraftmaschinenreglers muß daher die Vorschrift gemacht werden, daß sich die Reglerverzögerungszeit so ändern läßt, daß T_{Rv} unter etwa $\frac{1}{4}$ und über $\frac{3}{4}$ der Eigenschwingungszahl zu liegen kommt, um die selbsterregten Schwingungen mit Sicherheit zu verhüten.

Reinhardt hat den Einfluß des Reglers bei verschiedenen Verzögerungszeiten rechnerisch ermittelt. In Abb. 185 ist eine dieser Kennlinienzusammenstellungen wiedergegeben. Man sieht aus den verschiedenen zugrundegelegten Verzögerungszeiten das Abklingen bzw. das Aufschaukeln der Schwingungen sehr deutlich.

Angebotsunterlagen. Um das Angebot für eine neue Maschine mit Kolbenkraftmaschinenantrieb, die mit vorhandenen Maschinen parallellaufen soll, ausarbeiten zu können, müssen genaueste Angaben

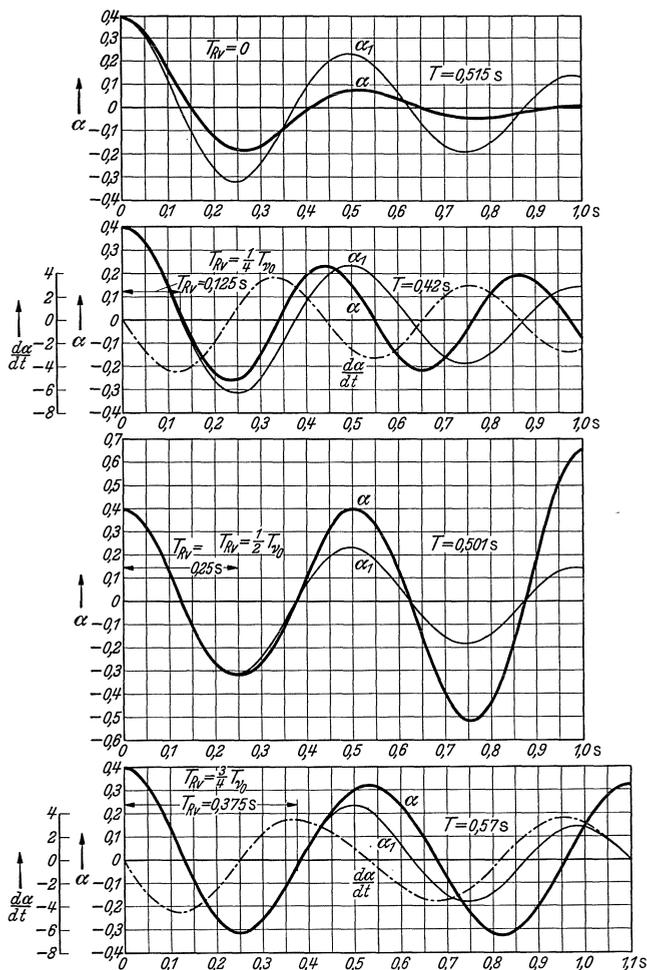


Abb. 185. Schwingungen einer gedämpften Synchronmaschine im Parallelbetrieb unter dem Einfluß einer Verzögerungszeit T_{Rv} am Kraftmaschinenregler.

α Schwingungen mit Reglerwirkung und mit Dämpfung, T , α_1 Schwingungen ohne Reglerwirkung und mit Dämpfung, $T_1 = 0,506''$.

über die vorhandenen Maschinen gemacht werden. Als Unterlage hierzu kann die folgende Zusammenstellung Zahlentafel 14 dienen, die gegebenenfalls noch durch Angaben über die Verhältnisse der Leitungen, die bei Kraftwerksparallelbetrieb in Frage kommen, zu ergänzen sein wird.

Turbostromerzeuger und Maschinen für Wasserturbinenantrieb stellen keine besonderen Bedingungen für den Parallellauf. Hier genügen für

Zahlentafel 14.
Zusammenstellung der Unterlagen für die Angebotseinforderung
auf Drehstrom-Synchronstromerzeuger.

			Neu aufzu- stellen	Vorhanden für Parallelbetrieb		
Elektrische Maschinen	Synchronstromerzeuger	1. Stückzahl				
		2. Lieferer				
		3. Stromart: ein-, zwei- oder drei- phasig				
		4. Drehzahl U/min				
		5. Leistung MVA				
		6. Leistungsfaktor $\cos \varphi$				
		7. Nennklemmenspannung kV				
		Spannungsänderung vH				
		8. Frequenz Per/s				
		9. $\frac{\text{Eigen-}}{\text{Fremd-}}$ Erregung Volt				
		10. Selbsttät. Spannungsregelung mit Schnell-/Eil-/Träg-, Hand-Regler				
		11. Ist die Belastung stark schwan- kend?				
		Stöße nicht größer als . . . MW				
		12. Ist Dämpferwicklung vorhanden?				
	13. Ausführung als Schwungrad- maschine, Schwungmoment tm^2					
	14. Anordnung eines Zusatzschwun- grades, Schwungmoment . . tm^2					
	Synchronmotoren	15. Stückzahl				
		16. Lieferer				
		17. Drehzahl U/min				
		18. Leistung MW				
		19. Leistungsfaktor $\cos \varphi$				
		20. Ist Dämpferwicklung vorhanden?				
21. Schwungmoment tm^2						
22. Zum Antrieb von						
Antriebsmaschinen	Allgemeines	23. Art der Antriebsmaschine				
		24. Lieferer				
		25. Mechanische Leistung MW				
		26. Drehzahl U/min				
		27. Art des Zusammenbaues mit dem Stromerzeuger				
		28. Elastische Kupplung. Art der elastischen Kupplung?				
		29. Riemen- oder Seilantrieb				
		30. Welches Schwungmoment ver- langt der Kraftmaschinenlieferer für einwandfreie Regelung . . tm^2				
	31. Verlangte Geschwindigkeitsstei- gerung (für den Fall des Durch- gehens) vH					
	32. Art des Kraftmaschinenreglers					
	Koben- maschinen	Allgemeines	33. Dem Gesamt-Schwungmoment tm^2			
			34. entspricht der Ungleichförmig- keitsgrad bei Nennlast und bei Leerlauf			
35. Zahl der Zylinder						

Zahlentafel 14 (Fortsetzung).

				Neu aufzu- stellen	Vorhanden für Parallelbetrieb		
Antriebs- maschinen	Kolben- maschinen	Gas- und Ölmaschinen	36. Vier- oder Zweitakt				
			37. Einfach- oder doppeltwirkend .				
			38. Treibmittel: Hoch- oder Koks- ofengas, Sauggas, Gas- oder Teer- öl usw.				
Weitere Unterlagen	Allgemeines		39. Es laufen einwandfrei parallel die Maschinensätze				
			40. Haben sich Schwierigkeiten im Parallelbetrieb ergeben und welche?				
			41. Wird durch die Kraftmaschine außerdem eine größere Gleich- strommaschine oder Wechsel- strom-Bahnmaschine angetrie- ben? Leistung MW				
			42. Sonstige Besonderheiten der An- lage oder des Betriebes				
			43. Guter oder mäßig guter Parallel- betrieb verlangt.				
			44. Leerlauf- und Kurzschlußkenn- linie				
			45. Bei mehreren getrennten Kraft- werken Plan der Leitungsanlage mit Stromverteilung, Querschnitt, Länge, Leiterbaustoff, Anschlüs- sen u. dgl.				

die Beurteilung der Verhältnisse zur Angebotsbearbeitung Angaben über die vorhandenen Kraftwerksmaschinen und über den Aufbau, sowie den Betrieb des zur Kupplung benutzten Netzes.

9. Das Parallelschalten.

Das Parallelschalten bei Wechselstrom von Hand ist nicht gleich einfach wie bei Gleichstrom, weil hier noch die Frequenz, die Lage der Spannungsvektoren d. h. der Bewegungszustand zwischen den Spannungsvektoren der Maschinen und bei großen Schaltern die Eigenschaltzeit des Schalters beachtet werden müssen. Im Band I wurde die Parallelschaltung bereits kurz gestreift. Hier soll ausführlicher auf diese eingegangen werden.

Es war im Band I gesagt worden, daß die zu bereits arbeitenden Maschinen, oder zu einem unter Spannung stehenden Netz zuzuschaltende Maschine aufweisen muß: gleiche Frequenz, gleiche Spannung und gleiche Phase unter der Voraussetzung, daß die Phasenfolge an sich richtig ist. Zu diesen Feststellungen sind wesentlich mehr Meßgeräte als bei Gleichstrom erforderlich.

Wird die Maschine mit richtiger Drehzahl, somit ohne Frequenzfehler, aber mit abweichender Phasenlage der Spannungen eingeschaltet, also mit einem Phasenfehler ϑ' , so zieht die synchronisierende Kraft des

Netzes den Läufer in die richtige Phasenlage. Dabei schwingt der Läufer zunächst über diese Lage hinaus bis zum Betrage von ϑ' , kehrt die Schwingung um und so fort, bis er entsprechend der Dämpfung zur Ruhe kommt. Ist der Phasenfehler sehr groß, schwingt die Maschine über die Kippstellung hinweg und fällt dann sofort wieder aus dem Tritt. Das gleiche gilt, wenn die Maschine bei richtiger Phasenlage, aber falscher Frequenz parallelgeschaltet wird. Das Überspringen des Polrades hat heftige Leistungsschwankungen im Netz zur Folge. Die dabei ausgelöste Stoßbelastung auf die übrigen Maschinen kann mit der Leistungspendelung zusammen auch zum Außertrittfallen der anderen Maschinen führen besonders dann, wenn diese schon mit einem großen Winkel ϑ ihrer synchronen Leistungsbelastung arbeiten, also im Augenblick des Stoßes eine große Vorbelastung haben.

Zur Milderung der Leistungsstöße beim ungenauen Synchronisieren, und auch um die Schnelligkeit des Parallelschaltens zu erhöhen, wird die zuzuschaltende Maschine über eine Drosselspule parallelgeschaltet, durch die die synchronisierende Leistung herabgesetzt wird. Der Stoß auf das Netz kann dadurch stark gemildert werden. Nach dem Synchronisieren wird die Drosselspule kurzgeschlossen und aus dem Stromkreis ausgeschaltet. Man nennt diese Form des Synchronisierens die Grobsynchronisierung. Die Größe der Drosselspule muß besonders bestimmt werden.

Der Vergleich der beiden Spannungen geschieht mit Hilfe eines Doppelspannungsmessers (Abb. 186). Der Vorteil eines derartigen Meßgerätes gegenüber zwei Spannungsmessern liegt in der besseren Beobachtungsgenauigkeit und des geringeren Platzbedarfes.

Zum Vergleich der beiden Frequenzen dienen Doppelfrequenzmesser (Abb. 187). Die Einstellung der Frequenz erfolgt durch die Regelung der Drehzahl der Antriebsmaschine entweder von Hand oder auf elektrischem Wege. Letzteres ist bei großen Antriebsmaschinen und besonders dort zu empfehlen, wo eine Verständigung zwischen Schalt- und Maschinenwärter nur schwer oder unsicher möglich ist. In mittleren und größeren Kraftwerken wird die elektrische Drehzahl-Verstellvorrichtung mit Bedienung von der Schaltbühne oder der Warte stets angewendet, um das Parallelschalten, sowie die Lastverteilung schneller vornehmen zu können.

Diese elektrische Drehzahl-Einstellvorrichtung besteht aus einem Elektromotor, der unter Zwischenschaltung eines Vorgeleges mit



Abb. 186. Doppelspannungsmesser.

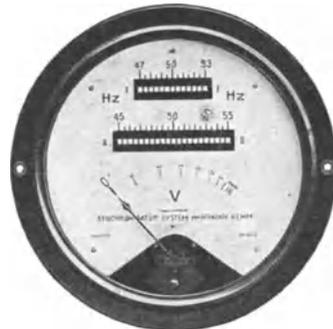


Abb. 187. Doppelfrequenzmesser zusammgebaut mit Nullspannungsmesser.

der Einstellspindel des Kraftmaschinenreglers verbunden ist. An dem Vorgelege müssen Endausschalter angebracht sein, die verhindern, daß die Einstellvorrichtung des Reglers über ihre Endstellungen hinaus bewegt wird. Gesteuert wird der Elektromotor durch einen kleinen Umschalter. Dieser Umschalter muß derart gebaut sein, daß er nach dem Loslassen des Schaltgriffes selbsttätig in die Ausschaltstellung (Mittellage) zurückkehrt.

Zum Vergleich der Phasen benutzt man entweder einen Spannungsmesser in Verbindung mit einer oder zwei Glühlampen, oder ein Synchronoskop. Die Lampen sind, wie schon hier bemerkt, nur als ein Sichtzeichen für den Schaltwärter aufzufassen, da nach ihren Angaben nicht geschaltet werden darf. Schaltet man nach Abb. 188 einen Spannungsmesser zwischen ungleiche Phasen der beiden Maschinen G_I und G_{II} , so schwankt der Zeiger periodisch so lange, bis

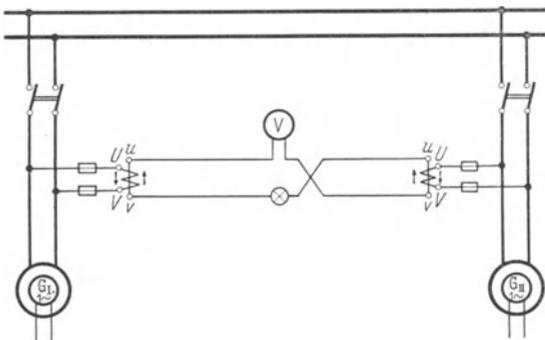


Abb. 188. Schaltbild für Parallelschalteinrichtung mit Spannungsmesser und Lampe in Hellschaltung.

Phasengleichheit vorhanden ist. In diesem Augenblick zeigt das Meßgerät die doppelte Spannungshöhe. Legt man in die Verbindungsleitung der zweiten ungleichnamigen Phase eine Glühlampe, so leuchtet diese entsprechend den Spannungsschwankungen ebenfalls periodisch so lange auf und verlischt, bis Phasengleichheit eingetreten

ist; ist letzteres der Fall, so zeigt die Lampe die Höchstleuchtkraft. Diese Schaltung wird als Hellschaltung bezeichnet. Die Vorteile derselben liegen darin, daß der Spannungsmesser und die Glühlampe die größte Empfindlichkeit besitzen, zumal insbesondere Unterschiede in der Leuchtkraft sehr augenfällig sind. Störungen an der Lampe bzw. bei Verwendung von Spannungswandlern an den Spannungssicherungen sind sofort bemerkbar; es können infolgedessen Fehlschaltungen vermieden werden. Nachteilig bei dieser Schaltung ist aber einmal, daß der Spannungsmesser für den doppelten Meßbereich ausgeführt werden muß, ferner bei Benutzung von Spannungswandlern eine Umschaltung der Niederspannungswicklung eines Meßwandlers erforderlich wird, was zu Umständlichkeiten führt. Schließlich wird in den Vorschriften des VDE verlangt, daß Spannungswandler unterspannungsseitig geerdet werden, was bei dieser Form der Schaltung nicht ohne weiteres möglich ist. Besonders aus diesem Grund wird die Hellschaltung seltener angewendet.

Legt man den Spannungsmesser und die Glühlampe zwischen gleiche Phasen der parallel zu schaltenden Maschinen nach Abb. 189, so treten ebenfalls periodische Schwankungen so lange auf, bis Phasengleichheit

vorhanden ist. Ist letzteres der Fall, dann steht der Zeiger des Meßgerätes auf Null und die Glühlampe leuchtet nicht. Man nennt diese Schaltung die **Dunkelschaltung**. Zunächst liegen die Nachteile derselben darin, daß der Spannungsmesser in der Nähe des Nullpunktes geringere Genauigkeit besitzt und die Glühlampe schon bei etwa 50 vH der Spannung verlischt.

Für die Spannungsmesser wird daher ein besonderer Nullspannungsmesser mit ausreichender Meßgenauigkeit in der Nähe des Nullpunktes erforderlich (Abb. 187). Neuerdings werden die Glühlampen auch fortgelassen. Das Durchbrennen einer Sicherung bei Verwendung von Meßwandlern, das vielleicht zufällig kurz vor der Parallelschaltung eintritt, kann allerdings nicht bemerkt werden, und insofern sind Irrtümer dann nicht ganz ausgeschlossen. Trotz dieser Nachteile wird die Dunkelschaltung heute fast ausschließlich angewendet, weil man

auch die Erdung der Niederspannungswicklung der Spannungswandler vornehmen kann.

Wenn aus den Angaben des Spannungsmessers auch zu erkennen ist, wann Synchronismus vorhanden ist, so gestatten die Zeigerschwankungen aber nicht, festzustellen, ob die zuzuschaltende

Maschine zu schnell oder zu langsam läuft. Um auch dieses an der Schaltstelle beobachten zu können, was für die Schnelligkeit des Parallelschaltens besonders von Bedeutung ist, sind noch eine Anzahl besonderer Meßgeräte in Gebrauch. Ist ein Doppelfrequenzmesser vorhanden, so kann man aus dessen Angaben den Geschwindigkeitsunterschied erkennen. Ein anderes wesentlich einfacher und sicherer zu überblickendes Meßgerät ist das Synchronoskop. Ein Zeiger, der im Mittelpunkt gelagert ist, dreht sich entweder links oder rechts über eine Skala und spielt auf eine Marke ein, sobald Synchronismus vorhanden ist (Abb. 190 u. 191). An Stelle des Nullspannungsmessers wird daher auch das Synchronoskop oft benutzt.

Um die Parallelschaltmeßgeräte aus der übrigen Zahl der Meßgeräte einer Schaltwand hervorzuheben, werden sie zusammengebaut und gestatten so dem Schaltwärter im einfachen Blickfeld alles zu erkennen, was er für das Parallelschalten zu beobachten hat (Abb. 191). Über die Anordnung dieser Meßgeräte in der Schaltanlage wird im 18. Kap. das Erforderliche gesagt.

Die selbsttätige Parallelschaltung. Maschine zu Maschine innerhalb eines Kraftwerkes parallel zu schalten ist bei geübter Bedienung ver-

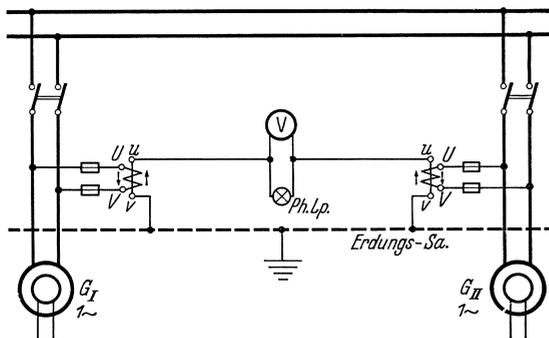


Abb. 189. Schaltbild für Parallelschalteinrichtung mit Spannungsmesser und Lampe in Dunkelschaltung.

hältnismäßig schnell durchzuführen, da die Frequenzbeeinflussung durch die Drehzahlverstellung und auch die Spannungseinregelung leicht möglich sind. Maschinen zum Netz parallel zu schalten, erfordert mehr Zeit und Sicherheit, wenn man von dem Schnell- oder Grobsynchronisieren absieht. Mit dem geringsten Zeitaufwand und in elektrisch bester Weise erfolgt das Parallelschalten selbsttätig. Die heute auf dem Markt befindlichen Schaltgeräte arbeiten vorzüglich und sicher und sind daher



Abb. 190. Synchronoskop.

zu empfehlen. Viele Betriebsleiter vertreten indessen die Ansicht, daß solche selbsttätigen Schaltgeräte nur an ganz besonderen Stellen verwendet werden sollten, während sie in normalen Anlagen entbehrt werden können, um den Schaltwärtern nicht einen Teil ihrer interessantesten und verantwortungsgrößten Handlungen zu nehmen und sie aus solchen Schalthandlungen zu entwöhnen, was dann recht unangenehm werden kann, wenn die selbsttätige Parallelschaltvorrichtung einmal versagt.

Bei Aushilfswerken z. B. Speicherwasserkraftwerken, die plötzlich oder in besonders kurzer Zeit aus dem Stillstand hochgefahren und parallelgeschaltet werden müssen, um Strom zu liefern oder Pumpstrom aufzunehmen, ist die selbsttätige Parallelschaltvorrichtung eher am Platz und auch bereits des öfteren in Verbindung mit einer voll-

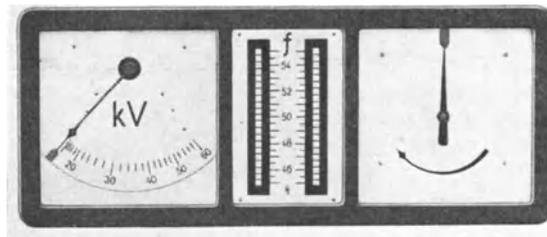


Abb. 191. Parallelschaltmeßgeräte in einem Gehäuse (Doppelspannungsmesser, Doppelfrequenzmesser, Synchronoskop).

ständig selbsttätigen Maschinenanlaß- und -abstellvorrichtung ausgeführt worden. Soweit bekannt, haben sich diese selbsttätigen Einrichtungen gut bewährt. Ihr Hauptvorteil liegt in der kurzen Zeit, in welcher sich der Gesamtvorgang abspielt, und die von der Handbedienung nicht erreichbar ist.

Das selbsttätige Schnellparallelschaltgerät erhöht also die Einsatzbereitschaft der Maschinen, ermöglicht das schnelle Kuppeln von Netzen und führt die Schaltung auch bei unruhigen Netzfrequenzen durch. Abb. 192 bis 194 zeigen einige Oszillogramme. Ein solches Gerät gibt ferner den Schaltbefehl unabhängig vom Frequenzunterschied des parallel zu schaltenden Teiles immer so, daß die Eigenschaltzeit des Schalters vor der Phasengleichheit berücksichtigt ist. Auch beim Absinken der Frequenz des Netzes, zu dem parallelgeschaltet werden soll, ist schnelles

Zuschalten möglich, was bei Handschaltung nur sehr schwierig zu erreichen ist und häufig zu einem Mißerfolg führt, der den ganzen Betrieb gefährden kann.

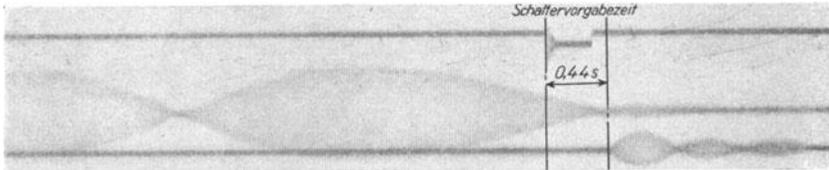


Abb. 192. Schlupfunabhängigkeit: Schaltschlupf $\sim 0,57$ vH, Frequenz 50 Hz, Spannung 10 kV, Fehlwinkel 0° .

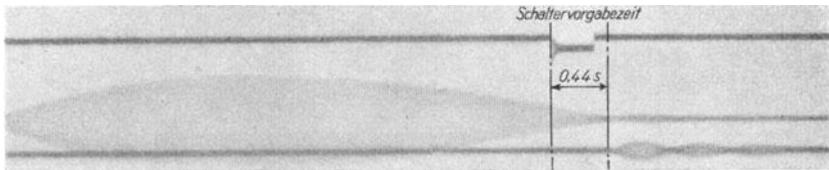


Abb. 193. Frequenzunabhängigkeit: Frequenz 48 Hz, Spannung 10 kV, Schaltschlupf $\sim 0,34$ vH, Fehlwinkel $\sim 2,5^\circ$.

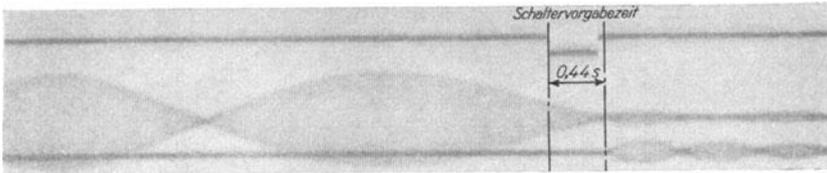


Abb. 194. Spannungsunabhängigkeit: Spannung 10 kV, Frequenz 50 Hz, Schaltschlupf $\sim 0,62$ vH, Fehlwinkel 0° .

Abb. 192 bis 194. Oszillogramme für das Parallelschalten mit selbsttätigem Parallelschaltgerät (Einsatzbereitschaft und Kuppelzeit).

Auf die Beschreibung dieser Schaltgeräte soll nicht näher eingegangen werden, da die Druckschriften der Hersteller ausführliche Angaben enthalten.

10. Der Kraftwerkezusammenschluß (Verbundbetrieb)¹.

Der Zusammenschluß verschiedener Kraftwerke zum Verbundbetrieb muß nach der elektrischen, dann aber auch nach der betriebstechnischen und betriebswirtschaftlichen Seite untersucht und beurteilt werden.

Im folgenden wird zunächst die elektrische Seite dieser heute ganz besonders wichtigen Frage kurz behandelt. Sie umfaßt die Spannungs- und Leistungsregelung der zusammengeschlossenen Kraftwerke und Übertragungsanlagen.

Zur Beurteilung der Spannungs- und Leistungsverhältnisse für den Verbundbetrieb soll von dem einfachsten Fall ausgegangen werden. Das Kraftwerk I ist mit der Leistung N_I in MVA für eigene Zwecke belastet.

¹ Verfasser: Fußnote S. 177.

Bei Belastungsänderungen wird die Leistung und die Maschinenspannung im Werk I geregelt, das also in jeder Beziehung betrieblich selbständig ist. Wird nun das Kraftwerk II über die Fernleitung zur Leistungsdeckung mit herangezogen (Abb. 195), und soll unter der Voraussetzung, daß U_I unverändert bleibt, der Strom I bei einem Leistungs-

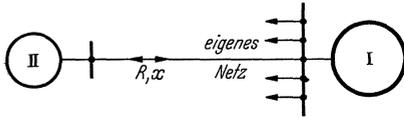


Abb. 195. Zwei Kraftwerke im Verbundbetrieb; eigenes Netz bei Kraftwerk I.

faktor $\cos \varphi_I$ übertragen werden, so ist aus dem Spannungsschaubild Abb. 196 ohne weiteres in der bekannten Weise festzustellen, mit welcher Spannung und welchem Leistungsfaktor Werk II fahren muß, um die gewünschte Leistung an Werk I zu liefern. Die Leitung

soll nur Wirk- und induktiven Blindwiderstand besitzen. Die Kapazität der Kupplungsleitung soll nicht berücksichtigt werden.

Aus Abb. 196 folgt der Spannungsunterschied (Längsspannungsabfall)¹:

$$\begin{aligned} \Delta U &= I \cdot \cos \varphi_I \cdot R_l + I \cdot \sin \varphi_I \cdot x_l \text{ kV} \\ &= I_W \cdot R_l + I_b \cdot x_l \text{ kV,} \end{aligned} \quad (94)$$

der Phasenunterschied (Querspannungsabfall):

$$\begin{aligned} \delta U &= I \cdot \cos \varphi_I \cdot x_l - I \cdot \sin \varphi_I \cdot R_l \text{ kV} \\ &= I_W \cdot x_l - I_b \cdot R_l \text{ kV,} \end{aligned} \quad (95)$$

und die Spannung im Kraftwerk II:

$$U_{II} \simeq U_I + \Delta U \text{ kV.} \quad (96)$$

Beide Spannungen sind um den Winkel ϑ' verschoben, wobei:

$$\begin{aligned} \sin \vartheta' &= \frac{\delta U}{U_{II}} = \frac{\delta U}{U_I + I_W \cdot R_l + I_b \cdot x_l} \\ &= \frac{I_W \cdot x_l - I_b \cdot R_l}{U_I + I_W \cdot R_l + I_b \cdot x_l}. \end{aligned} \quad (97)$$

Der Polradwinkel ϑ ergibt sich durch Hinzunahme des Maschinenstreu- und Ständer-Rückwirkungsspannungsabfalles.

Eine Beeinflussung der Spannung U_{II} kann bei fester Spannung U_I und unveränderter zu übertragender Leistung nur durch Änderung

des Blindstromes I_b vorgenommen werden etwa dadurch, daß das Werk I den an den Sammelschienen vom Netz verlangten Blindstrom selbst erzeugt und das Werk II nur mit Wirkstrom belastet. Dann geht Abb. 196 in Abb. 197 über.

Hat Werk II auch sein eigenes Netz, so kann die für dieses Netz

¹ Die folgenden Rechnungen sind der Einfachheit halber für Einphasenstrom aufgestellt. Bei Drehstrom ist mit $\sqrt{3}$ zu rechnen.

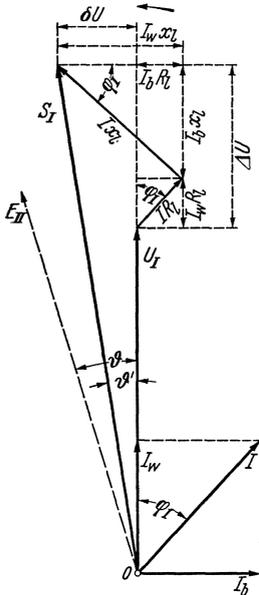


Abb. 196. Strom- und Spannungsschaubild des Synchronstromerzeugers bei nachteiliger Belastung.

verlangte Spannung im Werk II nicht mehr selbständig an den Maschinen eingestellt werden, weil jede Änderung von U_{II} eine entsprechende Änderung des nach I zu übertragenden Blindstromes bedingt. Beide Werke verlieren demnach durch diese einfache Art des Zusammenschlusses ihre selbständige Spannungsregelung und damit auch ihre selbständige Blindlastregelung.

Für den Fall, daß in Werk II an den Sammelschienen die gleiche Spannung herrschen soll wie in Werk I, muß der Spannungsabfall $\Delta U = 0$ werden. Aus Gl. (94) und Abb. 197 ergibt sich dann der zu übertragende Blindstrom zu:

$$I_b = -\frac{R_l}{x_l} \cdot I_W \text{ kA} \quad (98)$$

und der Querspannungsunterschied zu:

$$\delta U = I_W \cdot R_l \cdot \left[1 + \left(\frac{x_l}{R_l} \right)^2 \right] \text{ kV.} \quad (99)$$

Es muß also das Werk II einen negativen Blindstrom d. h. einen voreilenden Blindstrom entsprechend dem Wirkstrom und dem Verhältnis des Wirk- zum Blindwiderstand der Fernleitung mit übertragen. Die übertragbare Wirkleistung ist:

$$N_W = U_I \cdot I_W = \frac{U_I}{x_l} \cdot (\delta U + I_b \cdot R_l) \text{ MW.} \quad (100)$$

Da für das betriebliche Verhalten der verbundenen Stromerzeuger der Winkel ϑ' zwischen den beiden Spannungen U bzw. der Polradwinkel ϑ bestimmend ist, ist die Größe dieses Winkels und seine Abhängigkeit von den Übertragungsverhältnissen auch hier zu untersuchen.

Es ist aus Abb. 196: $\delta U = U_{II} \cdot \sin \vartheta'$,

somit:

$$\begin{aligned} I_W &= \frac{U_{II} \cdot \sin \vartheta'}{x_l} - \left(\frac{R_l}{x_l} \right)^2 \cdot I_W \text{ kA} \\ &= \frac{U_{II} \cdot \sin \vartheta'}{x_l} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_l}{x_l} \right)^2} \text{ kA,} \end{aligned} \quad (101)$$

die zu übertragende Leistung:

$$N_W = \frac{U_I \cdot U_{II}}{x_l} \cdot \sin \vartheta' \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_l}{x_l} \right)^2} \text{ MW,} \quad (102)$$

und wenn:

$$U_{II} = U_I,$$

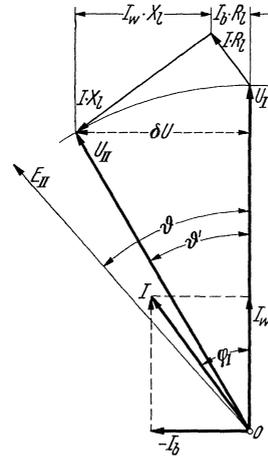


Abb. 197. Spannungsschau bild für den Verbundbetrieb von 2 Kraftwerken ohne besondere Spannungsregelung, gleiche Kraftwerkspannungen (Freileitung).

dann:

$$N_W = \frac{U_i^2}{x_i} \cdot \sin \vartheta' \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_i}{x_i}\right)^2} \text{ MW.} \tag{103}$$

Daraus ergibt sich der Phasenwinkel:

$$\sin \vartheta' = \frac{N_W}{U_i^2} \cdot x_i \cdot \left[1 + \left(\frac{R_i}{x_i}\right)^2\right]. \tag{104}$$

Soll der Winkel ϑ' nur für die Übertragungsanlagen also ohne den Einfluß der Maschinen z. B. 30° betragen und die Sammelschienen-

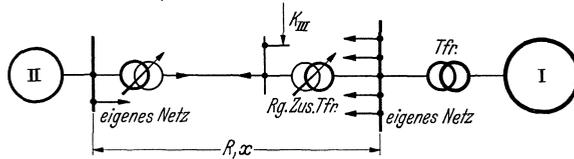


Abb. 198. Drei Kraftwerke im Verbundbetrieb, eigene Netze, besondere Spannungsregelung.

spannung festgelegt sein, so ergibt sich eindeutig die mögliche übertragbare Wirkleistung aus den Festwerten der Leitungsanlagen.

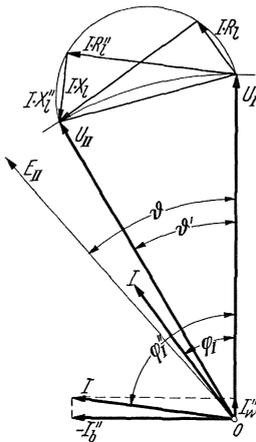


Abb. 199. Spannungsschaubild für den Verbundbetrieb von 2 Kraftwerken mit gleichen Spannungen ohne besondere Spannungsregelung. Vergleich zwischen Kabel- ($I \cdot R_i'$, $I \cdot X_i'$) und Freileitungsverbindung ($I \cdot R_i$, $I \cdot X_i$).

Ein Betrieb in dieser Form ist in den häufigsten Fällen nicht durchführbar. Die Spannungen beider Werke müssen unabhängig voneinander für ihre Abnahmestellen an den Maschinensammelschienen geregelt werden können. Es ist daher erforderlich, daß regelbare Umspanner in die Kuppelleitung eingeschaltet, oder bei vorhandenen Umspannern Zusatzregelumspanner eingebaut werden. Damit werden dann die Maschinensammelschienen Spannungen wieder unabhängig voneinander (Abb. 198).

Für Werke, die nur auf die Kuppelleitung arbeiten, kann demnach die Kurzkupplung „Maschine — Umspanner“ zur Verwendung kommen. Doch ist hier ebenfalls zu untersuchen, ob die Regelung der Maschinenspannung ausreicht, um das Werk II voll auszunützen. Der Phasenwinkel ϑ' ist dabei zu beachten und zu überprüfen. Da der Blindwiderstand der Freileitung hohe Werte aufweisen kann, wird ΔU unter Umständen sehr groß d. h. der Regelumspanner, oder der Zusatzumspanner muß einen sehr großen Regelbereich erhalten.

Bei Kabelleitungen liegen die Verhältnisse des Wirk- und induktiven Blindwiderstandes wesentlich anders. Abb. 199 zeigt den Unterschied für den Fall, daß $U_{II} = U_I$ sein soll.

Ein weiterer besonderer Fall, der häufig anzutreffen ist, liegt vor, wenn eine bestimmte Wirkleistung übertragen werden soll und dabei die

Spannung U_{II} gegeben ist. Dann ist I_b nicht mehr frei wählbar, sondern nach Gl. (98) zu berechnen, und in Werk I ist die Erregung der Maschinen entsprechend so einzustellen, daß I_b auch tatsächlich fließt.

Bezeichnet:

X_g den gesamten Blindwiderstand der Übertragungsanlagen also einschließlich der Umspanner und der Maschinen in Ohm/Phase,

R_g den gesamten Wirkwiderstand in Ohm/Phase,

so geht Gl. (102) über in:

$$N_w' = \frac{U_I \cdot U_{II} \cdot \sin \vartheta'}{X_g \left[1 + \left(\frac{R_g}{X_g} \right)^2 \right]} \text{ MW}, \quad (105)$$

und Gl. (104) für den Kupplungswinkel in:

$$\sin \vartheta' = \frac{N_w}{U_I \cdot U_{II}} \cdot X_g \cdot \left[1 + \left(\frac{R_g}{X_g} \right)^2 \right]. \quad (106)$$

Nach dieser Feststellung über die elektrischen Verhältnisse des Verbundbetriebes, die beim Zusammenschluß mehrerer Werke sehr eingehender Voruntersuchungen bedürfen, wenn eine bestimmte Leistungslieferung jedes Werkes in das Verbundnetz durchgeführt und dabei das Höchstmaß an Wirtschaftlichkeit hinsichtlich Maschinenausnutzung und Energieverwertung erreicht werden soll, soll nunmehr zu den **Betriebsverhältnissen**¹ übergegangen werden.

Vorauszuschicken ist eine Betrachtung des Leistungsverlaufes an einem 24stündigen Betriebstag und seine Deckung aus den verbundenen Kraftwerken, wobei für den Einsatz bestimmend ist: der Energieträger (Kohle, Wasser, Gas, Öl), die Zahl, Größe und die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Maschinenanlagen jedes Kraftwerkes, die Lage der Kraftwerke im Netz mit den Leitungsverhältnissen, Spannungen, Verlusten, die von größeren Abnehmern geforderten Leistungen nach Wirk- und Blindanteil und die zusätzliche Leistungshergabe der einzelnen Werke bei Netzstörungen. Abb. 200 zeigt diesen Lastverlauf z. B. für den Höchstbedarfstag im Winter und Abb. 201 für den Tag der geringsten Last im Sommer.

Zur Deckung des Leistungsbedarfes werden die einzelnen zusammenschließenden Kraftwerke ihrer Wertigkeit entsprechend herangezogen. Kleine Laufwasserkraftwerke ohne Speichermöglichkeit werden in erster Linie zur Deckung der Grundlast voll eingesetzt. Alsdann folgen die weiteren vorhandenen Wasserkraftwerke, wobei die oft sehr schwankende Wasserdarbietung sorgfältige Überlegungen erfordert und in der schnellen Änderung der Lastdeckungsverteilung manche Schwierigkeiten bereiten kann, wenn z. B. durch Gewitterregen oder zur Zeit der Schneeschmelze die Wasserdarbietung von geringem Wert auf die Ausbauleistung der Wasserkraftwerke anwächst oder durch Hochwasser die Wasserkraftwerksleistung plötzlich stark zurückgeht bzw. ausfällt.

¹ Schmolz, Dr.-Ing. A.: Leistungsregelung in großen Hochspannungsnetzen. Elektr.-Wirtsch. 1938 Nr. 36.

Zur Grundlastdeckung (Grundlastmaschinen) werden weiter dann die am wirtschaftlichsten arbeitenden also die neuesten Wärmekraft-

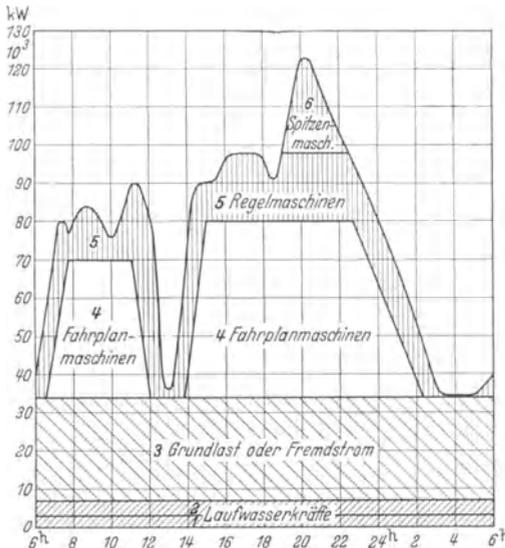


Abb. 200. Netz-Winterlastverlauf und Deckung durch verschiedene Kraftwerke im Verbundbetrieb.

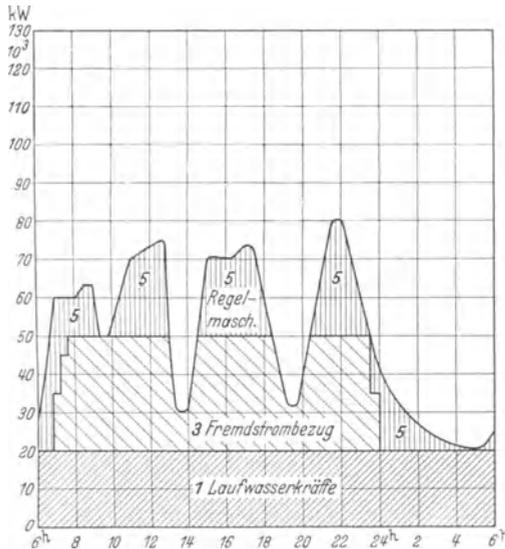


Abb. 201. Netz-Sommerlastverlauf und Deckung durch verschiedene Kraftwerke im Verbundbetrieb.

es wird auch noch die Spitzenlastdeckung einbezogen, wenn hierfür geeignete Maschinen oder Werke nicht zur Verfügung stehen. Ist Fremdstrombezug zu berücksichtigen, so kann dieser je nach den

werke benutzt und nur für den überschießenden Lastverlauf nach den Teilen 4, 5 und 6 der Abb. 200 besondere Maschinen eingesetzt. Dabei ist zu unterscheiden, ob diese Maschinen die gesamte Lastschwankung auszufahren haben, oder ein Teil der Last durch sog. Fahrplanmaschinen übernommen (4) und der Leistungsrest aus anderen Maschinen gedeckt werden soll (6). Abgesehen von der Deckung der Spitzenlast 6 durch Speicherwerke, Rohölmotoren oder alte Dampfanlagen (Spitzenmaschinen) müssen die Maschinen zum Ausfahren für 5 auch den einzelnen plötzlichen Laststößen, die in Abb. 200 nicht eingezeichnet sind, folgen können. Das können sie aber nur dann, wenn sie auf eine starre Frequenz der übrigen oder besonders dafür eingesetzten Maschinen (Frequenzmaschinen) bezogen entsprechende Regler für die Antriebsmaschinen und für die Spannung besitzen. Sie müssen also die Frequenzschwankungen, die mit den Leistungsschwankungen verbunden sind, ausregeln.

Für einfachere Verhältnisse würden z. B. die Grundlastmaschinen entfallen und an ihre Stelle schon die Fahrplanmaschinen treten, oder

Bezugsbedingungen in die Grundlast, den Fahrplan oder nach Abb. 201 in den gesamten Leistungsbedarf eingegliedert werden. Die Leistungsdeckung in den Sommermonaten wird wiederum ganz andere Einsatzmaßnahmen erforderlich machen. Es ist daher jeder Fall des Verbundbetriebes für sich zu betrachten. Feste Regeln mit Ausnahme des Einsatzes nach der Wertigkeit und gegebenenfalls des Fremdstrombezuges nach wirtschaftlich höchster Benutzungszeit können nicht aufgestellt werden.

Noch auf einen Vorteil des Verbundbetriebes ist besonders hinzuweisen. Dieser liegt darin, daß an Aushilfedorhaltung in den einzelnen Werken, die bei getrenntem Betrieb in jedem Werk vorhanden sein muß, gespart werden soll. Das ist aber nur dann tatsächlich möglich, wenn erstlich die Kuppelleitungen und Umspannanlagen für solche Aushilfeliieferung tragbar sind, ohne die normalen Lieferungsverhältnisse zu stören. Ferner muß das Gesamtnetz so zu den speisenden Kraftwerken liegen, daß bei Leitungsstörungen stets zweiseitige Speisung der einzelnen Abnahmestellen vorhanden ist, so daß im ungünstigsten Fall nur eine Spannungsregelung einzusetzen hat, die Leistungslieferung an sich aber nicht unterbrochen wird. Zudem muß der Überstrom- und Erdschlußschutz mit ganz besonderer Überlegung gewählt werden.

Sind die verbundenen Kraftwerke im Eigenbesitz des Stromlieferers, so läßt sich der Verbundbetrieb verhältnismäßig einfach gestalten, und die Aufstellung der täglichen oder wöchentlichen Betriebsfahrpläne für die einzelnen Werke auch nach Wirk- und Blindlast oder nach dem zu haltenden Leistungsfaktor stößt auf keine Schwierigkeiten. Unregelmäßigkeiten in der Durchführung der Fahrpläne oder schnell erforderliche Änderungen bei Störungen sind leicht zu beherrschen.

Wesentlich schwieriger liegen die Verhältnisse, wenn mehrere fremde Stromlieferer zum Verbundbetrieb zusammengeschlossen werden, Industriekraftwerke einzugliedern sind, oder ein eigener Verbundbetrieb bzw. eine eigene Stromerzeugung Zusatzleistung (Fremdstrombezug) aus einem anderen Netz bezieht. Dann sind in der Regel bestimmte Strombezugsverträge abgeschlossen, die nunmehr in wirtschaftlich bester Form ebenfalls ausgenutzt werden sollen. Hier richtet sich der Fahrplan für die eigenen Werke u. U. nach der Ausnutzung der Fremdstromlieferung. Unregelmäßigkeiten oder schnelle Änderungen im eigenen Fahrplan können dann aber Leistungsüberziehungen gegenüber der vertraglich festgelegten Leistung hervorrufen, die wirtschaftlich zusätzliche Ausgaben nach sich ziehen. Als Grundregel gilt in diesem Fall oft, daß sich der Leistungsbezieher auf den Fremdstromlieferer einstellen muß und durch die elektrischen Verhältnisse im Verbundbetrieb gezwungen wird, seine Eigenerzeugung entsprechend einzuregulieren. Das bezieht sich im besonderen auf die Spannungs- und Frequenzregelung, mit ersterer auf den Wirk- und Blindstrombezug, mit letzterer auf den Leistungsbezug. Die Strombezugsverträge sehen oft auch Bestimmungen über den Leistungsfaktor zu gewissen Tageszeiten vor, die sich ebenfalls preislich auswirken. Ferner wird bei einem Leistungstarif der Strompreis günstiger, je höher die Benutzungszeit der Leistung ist. Alles das ist für den Fremdstrombezug oder die fremden Werke im Verbundbetrieb zu

beachten. Auf die Beherrschung von Störungen im eigenen oder fremden Netz durch entsprechende Verteilung des Maschineneinsatzes und die Belastung der Maschinen selbst ist ebenfalls hinzuweisen.

Als zweite Grundregel gilt, daß der Fremdstromlieferer, sofern seine Lieferung einen wirtschaftlich oder betrieblich bestimmenden Einfluß auf die Leistungsdeckung hat, die Frequenz streng hält¹ und damit dem Stromabnehmer die Möglichkeit gibt, seinen Leistungsbezug seinen Wünschen entsprechend zu gestalten. Kann der Stromlieferer die Frequenz nicht starr oder mit nur Abweichungen von etwa 0,05 bis 0,1 Periode im Höchsthfall halten, oder weichen die Grundfrequenzen der zu verbindenden Lieferwerke aus ihren eigenen Netzverhältnissen ab, dann erfordert ein einwandfreier Verbundbetrieb die Zwischenschaltung von Frequenzumformern.

Die Wirk- und Blindstromverhältnisse im Verbundbetrieb sind nach dem eingangs Gesagten nur durch die Spannung zu regeln. Sowohl beim Eigenbetrieb wie beim Fremdstrombezug ist daher zu bestimmen, welche Werke die Blindstromlieferung in der Hauptsache übernehmen sollen, bzw. welcher Leistungsfaktor an der

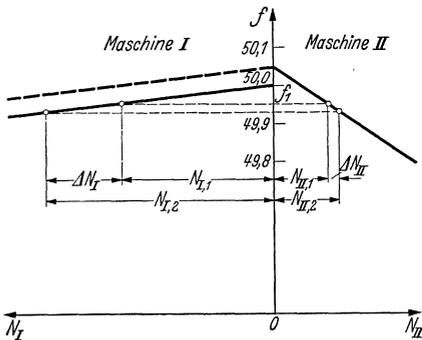


Abb. 202. Reglerkennlinien für zwei Maschinen im Parallelbetrieb.

oder den Einspeisestellen der Fremdstromlieferung herrschen soll. Sind regelbare Umspanner vorhanden, so kann durch diese, wie bereits erwähnt, jede gewünschte Blindstromregelung vorgenommen werden.

Die Leistungsregelung² und die Frequenzregelung für die parallelarbeitenden Kraftwerke sind für einfache Fälle leicht möglich, für große Netze dagegen recht umständlich und bedürfen wiederum von Fall zu Fall sehr eingehender Untersuchungen.

Die Stelleneinrichtungen. Für die Lastverteilung auf die parallelarbeitenden Maschinen ist die Arbeitsweise der Regler der Antriebsmaschinen bestimmend, denn die Leistungsabgabe ist von der Drehzahlregelung abhängig. In Abb. 202 sind die Reglerkennlinien für zwei Maschinen im Parallelbetrieb gekennzeichnet. Der Regler der Maschine I hat einen sehr flachen Drehzahlabfall, der der Maschine II einen wesent-

¹ Wierer, H.: Die Frequenz als zusätzliche Einflußgröße bei der elektrischen Leistungsregelung im Verbundbetrieb von Energieversorgungssystemen. VDE-Fachbericht Bd. 9 (1937) S. 158. Leonpacher, J.: Die Lastverteilung in und zwischen Elektrizitäts-Großversorgungsnetzen. ETZ 1929 Heft 25 S. 887.

² Zur unabhängigen Regelung der Liefer- und Bezugsleistungen beim Zusammenschluß mehrerer Netze und Kraftwerke mit eigenen selbständigen Stromversorgungsgebieten über eine Reihe von Kuppelstellen ist auch auf den Einbau von Querspannern hinzuweisen. Diese zusammen mit Leistungsumspannern gestatten, die Blind- und Wirkleistungen nach bestimmten z. B. durch Verträge festgelegten Gesichtspunkten einzustellen. Boll, G. Dr.-Ing.: Der Quertransformator zur Leistungsregelung in Ringnetzen. BBC-Nachr. 1930 S. 304.

lich stärkeren. Arbeiten beide Maschinen mit der Frequenz 49,92 bei der Netzlast N_1 , so ist an der Lastdeckung Maschine *I* mit dem Anteil $N_{I,1}$ und Maschine *II* mit dem Anteil $N_{II,1}$ beteiligt. Die Frequenz ist dabei f_1 . Steigt die Netzlast um ΔN auf N_2 , so nimmt nach Beendigung des Regelvorganges nunmehr Maschine *I* den Teilbetrag ΔN_I und Maschine *II* den Teilbetrag ΔN_{II} auf. Die Frequenz ist auf f_2 um Δf gefallen. Maschine *I* wird also wesentlich stärker belastet als Maschine *II*, und diese Lastunterschiede richten sich nach dem Verlauf der Drehzahlabfallkennlinien. Wird der Regler der Maschine *II* noch unempfindlicher eingestellt, so beteiligt sich Maschine *II* in noch geringerem Maße an der Deckung der Leistungsschwankung. Liegt eine dritte Maschine im Parallelbetrieb, deren Frequenz sich nicht ändert, so wird diese an der neuen Leistungsaufteilung nicht beteiligt. Ist Fremdstromzuspeisung vorhanden, die anderen Frequenzänderungen unterworfen ist, oder eine starr gehaltene Frequenz besitzt, so bedeutet das im ersten Fall, daß die parallelarbeitenden Maschinen u. U. auch an den Laständerungen im Fremdnetz teilnehmen oder im zweiten Fall, daß die Deckung des Leistungsunterschiedes $\Delta N = N_1 - N_2$ auch aus dem Fremdnetz erfolgen könnte. Hieraus ist zu ersehen, daß es einmal auf die Frequenzregelung und zum anderen auf die Einstellung der Regler für eine gewünschte Lastverteilung im wesentlichen ankommt.

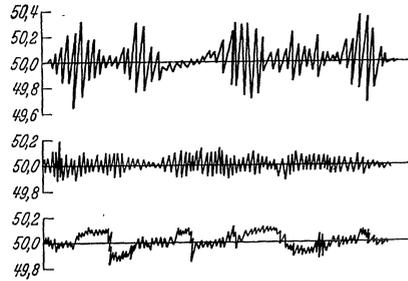


Abb. 203. Kennlinien für Frequenzregelung (Frequenzband).

Es würde zu weit führen, weitere Einzelheiten zu behandeln. Die Empfindlichkeit der Regler zur Frequenzsteuerung muß Gegenstand besonderer Untersuchungen sein. Abb. 203 zeigt 3 Kennlinien für diese Frequenzregelung und läßt das Frequenzband, innerhalb welchem die Regelung liegt, deutlich erkennen. Man bezeichnet:

$$\frac{dN}{dn} = L \text{ als Leistungszahl.}$$

Sie wird in kW/1 vH Drehzahländerung oder in kW/Periode ausgedrückt. Beträgt nach Abb. 202 für Maschine *I* die Leistungszahl L_I und für Maschine *II* — L_{II} , so ist für die Leistungsschwankung ΔN der entsprechende Anteil:

$$\Delta N_I = \Delta N \frac{L_I}{L_I + L_{II}} \quad \text{und} \quad \Delta N_{II} = \Delta N \frac{L_{II}}{L_I + L_{II}}, \quad (107)$$

sowie für die Frequenz:

$$\Delta f = \frac{\Delta N}{L_I + L_{II}}. \quad (108)$$

Die astatistische Regelung ist nicht in allen Fällen geeignet weil dabei die Gefahr der Überregelung besteht, die zu Leistungspendelungen führen kann. Die statische Regelung, bei der die zu regelnde Größe in Be-

ziehung zur Leistung der geregelten Maschine gesetzt wird, vermeidet diese Unsicherheit. Besondere Fälle erfordern die statische Regelung noch mit astatischer Hilfsregelung.

Der einfachste Regelfall liegt vor, wenn die Fremdstromlieferung auf die Sammelschienen des eigenen Kraftwerkes arbeitet. Da eine Handsteuerung heute nur noch selten angewendet wird, weil sie zu ungenau arbeitet, wird die selbsttätige Regelung vorgenommen.

Die für solche Steuerung benutzten Meßeinrichtungen bestehen dem Grunde nach aus einer Stromwage, die mit den auf den Wagearm arbeitenden Meßgeräten für die Leistung einen Verstellmotor für den Regler der Antriebsmaschine in der einen oder anderen Drehrichtung ein- und ausschaltet. Wesentlich für das praktisch gute Arbeiten solcher Steuereinrichtungen ist eine leichte, im Betrieb jederzeit mögliche Verstellung des Ansprechmeßwertes und das Spiel, das um diesen Meßwert auftreten kann. Es ist zu beachten, daß dem theoretischen Verlangen des Umschaltens bei Auftreten des Ansprechmeßwertes praktisch große Schwierigkeiten entgegenstehen, weil der Verlauf der Leistung in der Nähe des Ansprechmeßwertes nicht nach einer einfachen Kennlinie vor sich geht, sondern über eine bestimmte Zeit fortgesetzt Leistungsschwankungen auftreten, die ein ständiges Arbeiten der Meßeinrichtung verursachen würden. Außerdem würde die Eigenmaschine um den Leerlaufpunkt ständig schwanken und könnte dadurch Betriebsstörungen verursachen.

Aus dieser kurzen Schilderung der Arbeitsweise eines solchen Steuer- und Meßgerätes geht hervor, daß das Einhalten bestimmter Werte für Leistung und damit die Frequenzregelung praktisch nur bis zu einem gewissen Grad möglich ist. Die zu steuernden Größen hängen auch unmittelbar zusammen und werden durch die Trägheit der Regelgeräte, das statische und dynamische Verhalten der Regler, die Zeitwerte elektrischer Natur bei den Größenänderungen in den Maschinen, Leitungen und Umspannern, die Arbeitsweise der Antriebsmaschinen und die mechanischen Beeinflussungen durch die Schwungmassen der Stromerzeuger beeinflusst. Es muß daher das bereits genannte Leistungs- und Frequenzband zugrunde gelegt werden.

Die Reglerkennlinien müssen flachen Verlauf für die frequenzhaltenen Maschinen (kleiner dauernder Drehzahlabfall) erhalten, während die nicht gesteuerten Maschinen einen für das Ausfahren der Leistung steilen Anstieg besitzen sollen (großer dauernder Drehzahlabfall). Dann übernehmen letztere die Leistungsschwankungen nur in geringem Ausmaß oder gar nicht, und die Leistungsverteilung erfolgt ruhig. Unter Umständen kann es zweckmäßig sein, aber auch diesen Maschinen eine übergeordnete elektrische Frequenzregelung beizugeben, um sie bei plötzlichen Leistungsänderungen schnell zum Ausregeln mit heranziehen zu können.

Die Frequenz- und die Leistungsregelvorrichtungen müssen ihrerseits im Kennlinienverlauf aufeinander abgestimmt sein, damit kein Überregeln eintreten kann.

Abschließend ist zur Reglerfrage der Antriebsmaschinen zu bemerken, daß es sich empfiehlt, jede größere am Parallelbetrieb beteiligte Maschine mit einem Regler auszustatten.

Die Grundlastmaschinen werden mit Lastbegrenzung am Regler gefahren, sofern sie nach den Leistungsverhältnissen der Maschinen nicht eingreifen müssen, wenn eine Störung im Netz ein Kraftwerk zum Abschalten bringt und eine Überlastung der anderen Werke oder Maschinen nicht eintreten kann. Im anderen Falle muß die Lastbegrenzung unterbleiben. Die nicht regelnden Maschinen fahren den Leistungsfahrplan und werden entsprechend eingestellt.

Für den Fremdstrombezug zu einem Netz mit eigenen zusammengeschlossenen Kraftwerken werden die Meßwerte an der Einspeisestelle heute nicht mehr fernmündlich an die Regelstelle aufgegeben, sondern elektrisch fernübertragen¹. Dafür sind eine Reihe von Meßgeräten und Übertragungsformen, insbesondere Hochfrequenzübertragung über die Betriebsfernsprechanlagen im Gebrauch. Entweder beeinflussen diese Meßwerte die Steuereinrichtungen der Leistung und der Spannung unmittelbar, oder sie werden nur einer Hauptbefehlsstelle angezeigt, die nun von sich aus entsprechende Weisungen an die Steuerkraftwerke gibt bzw. die unmittelbare Beeinflussung der Steuereinrichtungen fernübertragen veranlaßt und überwacht. Diese Hauptlastverteilungsstelle (Lastverteiler) kann, wie der praktische Betrieb erwiesen hat, allen Aufgaben befriedigend gerecht werden und ist im Großbetrieb nicht mehr zu entbehren.

Eine zweite Fernmeßübertragung ist für den Blindstrom notwendig, da nach dem bereits Gesagten die Spannungsregelung im Netz der Eigenanlagen bei einem bestimmten Wirkstrombezug nicht möglich ist, sondern sich der Blindstrom nach dem verlangten Wirkstrom einstellt. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß die Belastung im Eigennetz oft starken Änderungen auch hinsichtlich des Netzleistungsfaktors unterworfen ist. Werden die Spannungen an der Kuppelstelle und in den Eigenkraftwerken gleichgehalten, so ist die Einstellung der zu beziehenden bzw. aus den Eigenwerken zu deckenden Blindleistung durch die Spannungsregelung mit Leistungsumspannern vorzunehmen. Haben die Hauptumspanner keine Regelung, so müssen Zusatzregelumspanner aufgestellt werden, bei deren Größenbestimmung hinsichtlich der Durchgangsleistung aber besondere Vorsicht geboten ist, damit sie nicht überlastet werden, wenn zufällig die Spannung im Eigennetz schwankt. Auf die geringe Kurzschlußfestigkeit solcher Zusatzumspanner ist zu achten.

Sind für den Verbundbetrieb von Großkraftanlagen mit sehr hohen Kurzschlußleistungen zur Begrenzung der Übertragung dieser auf das eine oder andere Netz Zwischenumspanner als sog. Isolierumspanner mit dem Übersetzungsverhältnis 1:1, oder Kurzschlußdrosselpulen mit hoher Kurzschlußspannung vorhanden, dann erfordern diese ebenfalls regelbare Zusatzumspanner und Fernübertragung nach der Steuerstelle.

Für die Spannungsregelung ist weiter zu beachten, daß das Fremdstromlieferwerk, sofern es auch ein eigenes großes Netz zu speisen

¹ Schleicher, M.: Die elektrische Fernüberwachung und Fernbedienung für Starkstromanlagen und Kraftbetriebe. Berlin: Julius Springer 1932. Stäblein, W.: Die Technik der Fernwirkanlagen.

hat, zumeist nach einem bestimmten Tages-Spannungsfahrplan fahren wird. Diesem müssen die Eigenwerke folgen, andernfalls können sich große Ausgleichblindleistungen ergeben, die nach den Lieferbedingungen zu Verrechnungsschwierigkeiten führen. Zur Ausregelung geringer Spannungsschwankungen sind auch die Maschinenschnellregler heranzuziehen, die entsprechend einzurichten sind.

Ganz besonders ist schließlich noch die Erfassung und betriebliche Behandlung einer Störung in der Fremdstromlieferung oder in den Eigenkraftwerken, damit also die bereits erwähnte gegenseitige Aushilfe im Großen zu untersuchen.

11. Der Drehstrom-Asynchronstromerzeuger¹.

Die Arbeitsweise. Wird, wie im Band I bereits gesagt und dort in Abb. 89 dargestellt, ein asynchroner Drehstrommotor durch eine äußere

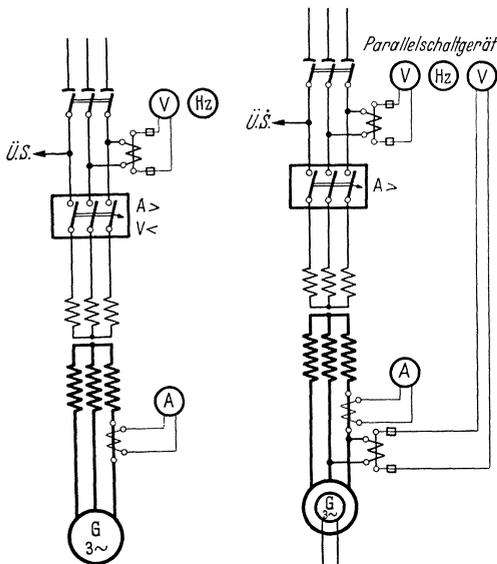


Abb. 204 und 205. Schaltbilder für ein Kraftwerk mit einem Asynchronstromerzeuger bzw. einem Synchronstromerzeuger.

Kraft also eine Antriebsmaschine im Motordrehsinn über seine synchrone Drehzahl angetrieben, so ist er imstande, elektrische Leistung zu liefern, wenn seinem Ständer eine bestimmte gesonderte Spannung aufgedrückt wird. Man nennt dann eine solche Maschine einen Asynchronstromerzeuger. Der zu seiner Erregung notwendige Strom, der ein reiner Blindstrom ist, muß von einem Synchronmotor, einem Synchronstromerzeuger, einem Netz, einer besonderen Erregermaschine oder gesonderten Kondensatoren geliefert werden. Der vom Asynchronstromerzeuger ins Netz gelieferte Strom ist dagegen ein reiner Wirkstrom

und bei gegebener Spannung und Frequenz des Netzes für eine bestimmte Antriebsmaschinenleistung unveränderlich.

Erhält die Asynchronmaschine einen Kurzschlußläufer, so ist ein solcher Asynchronstromerzeuger eine sehr einfache und auch billige Maschine, weil sie keine besondere Gleichstromquelle für die Erregung nötig hat und die Schleifringe mit Anlasser fortfallen. Wie das aus der Gegenüberstellung der Schaltbilder Abb. 204 und 205 ersichtlich ist, wird

¹ Gekürzte Wiedergabe von Kyser: Die Ausrüstung kleiner Wasserkräfte mit Asynchron- oder Synchrongeneratoren im Parallelbetriebe mit großen Dampfwerken. Siemens-Z. 1921 Heft 4 und 5; Elektrotechn. u. Maschinenb. 1922.

auch die Schaltanlage einfach. Es können bis zu einer Leistung von etwa 1000 kW besondere Parallelschaltvorrichtungen fortfallen, weil diese Maschine auf synchrone Drehzahl gebracht bei Verwendung eines Schutzschalters keinen nennenswerten Stromstoß beim Parallelschalten auf das Netz ergibt.

Die Betriebsdrehzahl liegt um den übersynchronen Schlupf höher als die synchrone. Sie wird durch das Spannung liefernde Synchronwerk (Mutterwerk, Hauptwerk) gehalten, so daß, wenn kein selbsttätiger Drehzahlregler an der Antriebsmaschine des Asynchronstromerzeugers vorhanden ist, die Schwankungen in der Belastung und Spannung vom Mutterwerk aufzunehmen und auszuregeln sind. Bei plötzlicher völliger Entlastung und beim Abschalten des Asynchronwerkes unter Last durch Selbstschalter muß dafür gesorgt werden, daß das Durchgehen der Antriebsmaschine verhindert wird. Geschulte Bedienung und ständige Aufsicht, abgesehen von der zeitweisen Reinigung und der Prüfung der Schmierung, der Lager, Auffüllen des Öles

Zahlentafel 15.
Vergleich zwischen Asynchron- und Synchronstromerzeugern.

Maschinengattung	Asynchronmaschine	Synchronmaschine	Asynchronmaschine	Synchronmaschine
Leistung $\left\{ \begin{array}{l} N_w \dots \text{kW} \\ N_n \dots \text{kVA} \end{array} \right.$	100 119	100 119	1000 1180	1000 1180
Leistungsfaktor $\cos \varphi$ bei . . . Belastung $\left\{ \begin{array}{l} 1/1 \\ 3/4 \\ 1/2 \\ 1/4 \end{array} \right.$	0,84 0,81 0,75 0,56	0,84	0,85 0,82 0,74 0,56	0,85
Spannung $U \dots \text{V}$	6000	6300	6000	6300
Frequenz $f \dots \text{Per/s}$	50	50	50	50
Drehzahl $n \dots \text{U/min}$	385 + 80 vH	375 + 80 vH	218 + 80 vH	214 + 80 vH
Schlüpfung s bei $\left\{ \begin{array}{l} 1/1 \\ 3/4 \\ 1/2 \\ 1/4 \end{array} \right.$ Belastung	2,4 vH 1,9 „ 1,5 „ 1,0 „	—	1,4 vH 1,1 „ 0,9 „ 0,6 „	—
Wirkungsgrad η_g bei Belastung $\left\{ \begin{array}{l} 1/1 \\ 3/4 \\ 1/2 \\ 1/4 \end{array} \right.$	91,0 vH 90,0 „ 89,0 „ 84,0 „	bei $\cos \varphi = 0,84$ 90,5 vH 89,5 „ 86,5 „ 79,5 „	94,0 vH 93,0 „ 92,0 „ 88,0 „	bei $\cos \varphi = 0,85$ 93,5 vH 92,5 „ 91,0 „ 86,0 „
Gewicht der vollständigen Maschine etwa kg	3000	5200	20800	24200
Erforderliche Grundfläche etwa . . . m ²	3,2	6,3	14,0	22,3
Bauart	mit Kurzschlußläufer	mit angebauter Erregermaschine	mit Kurzschlußläufer	mit angebauter Erregermaschine
Preisunterschied . . .	1,00	1,26	1,00	1,21

u. dgl. ist nach erfolgtem Parallelschalten für ein Asynchronwerk dieser Art nicht notwendig. Als letzter Vorteil kommt hinzu, daß auch der Preis der Maschine an sich niedriger, das Gewicht und die Grundfläche kleiner und der Wirkungsgrad etwas besser als bei einer Synchronmaschine gleicher Leistung ist. In Zahlentafel 15 sind die hier

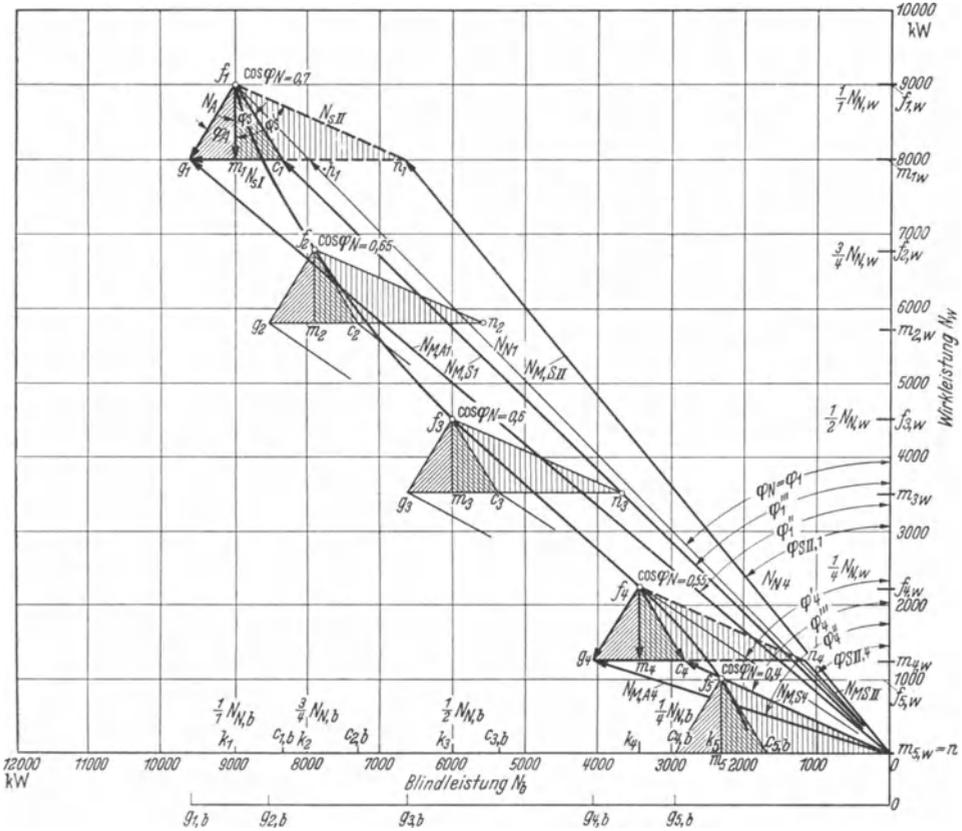


Abb. 206. Vektorschaubild der Leistungen und Leistungsfaktoren für das Mutterwerk beim Mitarbeiten eines Asynchron- und eines Synchronstromerzeugers geregelt nach dem Netzleistungsfaktor bzw. übererregt.

in Betracht kommenden Angaben für eine 100- und eine 1000-kW-Maschine in Ausführung als Asynchron- und Synchronstromerzeuger zusammengestellt.

Soll eine kleine Wasserkraft ausgenutzt werden, so zeigen im ersten Augenblick diese Betrachtungen ein sehr günstiges Bild für die Ausführung des Werkes als Asynchronwerk, so daß man der Ansicht zu- neigen kann, diese Kraftwerksausrüstung müßte bevorzugt werden. Aber die technischen Betriebsverhältnisse an sich zeigen doch, daß Asynchronstromerzeuger nur unter ganz besonderen Bedingungen, die durch die Gesamtanlage der parallel arbei-

tenden Werke gegeben sind und mit großer Vorsicht zur Anwendung kommen können.

Ausschlaggebend für die Wahl von Asynchronstromerzeugern sind:

- die Einwirkung auf das Mutterwerk,
- die Betriebsverhältnisse im Zusatzwerk selbst,
- die Wirtschaftlichkeit,
- die Selbständigkeit des Zusatzwerkes.

Den Betrachtungen soll ein praktisches Beispiel zugrunde gelegt werden. Ein bestehendes Dampfkraftwerk erzeuge 8000 kW bei $\cos \varphi = 0,7$ und 35 kV Netzspannung. Die Erweiterung des Netzes erfordere 1000 kW ebenfalls bei $\cos \varphi = 0,7$. Eine Wasserkraft kann diese 1000 kW hergeben. Ist ein Asynchron- oder ein Synchronstromerzeuger vorteilhafter? Die Verallgemeinerung besonders auf kleine Werke mit 100-kW-Leistung und weniger wird ebenfalls erörtert werden.

Die Einwirkung auf das Mutterwerk. Der Asynchronstromerzeuger hat zur Magnetisierung seines Ständers Blindstrom nötig, den das Mutterwerk liefern muß. Die sich hieraus für das Mutterwerk ergebenden Verhältnisse elektrischer Art sind am einfachsten aus dem Schaubild Abb. 206 zu ersehen. Es stellt dar:

$\overline{Oh_1}$ den Vektor der ursprünglichen Netzleistung $N_{N_1} = 11\,640$ kVA bei $\cos \varphi_N = 0,7$,

$\overline{h_1 f_1}$ den Vektor der Steigerung der Netzleistung = 1440 kVA bei $\cos \varphi_N = 0,7$,

somit:

$\overline{Of_1}$ die gesamte Netzleistung $N_N = 12\,900$ kVA bei $\cos \varphi_N = 0,7$.

Der Asynchronstromerzeuger soll 1000 kW abgeben = $\overline{m_1 f_1}$; die von ihm aufgenommene Blindleistung ist = $\overline{m_1 g_1} = 620$ kVA bei $\cos \varphi_A = 0,85$, somit ist seine Gesamt-kVA-Leistung $N_A = \overline{f_1 g_1} = 1180$ kVA.

Die geometrische Subtraktion $\overline{N_N} - \overline{N_A} = \overline{Of_1} - \overline{f_1 g_1}$ ergibt nach Größe und Richtung den Leistungsvektor für das Mutterwerk $\overline{Og_1} = 12\,500$ kVA bei einem nunmehr vergrößerten $\sphericalangle \varphi$, also schlechter gewordenem Leistungsfaktor.

Bezeichnet:

- N_N die Scheinleistung des Netzes in kVA,
- $N_{M,A}$ die Scheinleistung des Mutterwerkes beim Mitarbeiten eines Asynchronwerkes in kVA,
- $N_{M,S}$ die Scheinleistung des Mutterwerkes beim Mitarbeiten eines Synchronwerkes in kVA,
- N_A die Scheinleistung des Asynchronwerkes in kVA,
- N_S die Scheinleistung des Synchronwerkes in kVA,

und entsprechend mit dem Fußzeiger W die Wirkleistung, mit dem Fußzeiger b die Blindleistung, so ist die Leistung des Mutterwerkes beim

Mitarbeiten eines Asynchronwerkes:

$$N_{M,A} = \sqrt{(N_{N,W} - N_{A,W})^2 + (N_{N,b} + N_{A,b})^2} \text{ kVA}, \quad (109a)$$

und der Leistungsfaktor im Mutterwerk:

$$\cos \varphi_{M,A} = \frac{N_{M,W}}{N_{M,A}}; \quad (109b)$$

beim Mitarbeiten eines Synchronwerkes:

$$N_{M,s} = \sqrt{(N_{N,W} - N_{S,W})^2 + (N_{N,b} - N_{S,b})^2} \text{ kVA}, \quad (110a)$$

und der Leistungsfaktor im Mutterwerk:

$$\cos \varphi_{M,s} = \frac{N_{M,W}}{N_{M,s}}. \quad (110b)$$

Die Wirkleistung des Mutterwerkes ist um die 1000-kW-Zusatzleistung entlastet, die Blindleistung um 620 kVA gestiegen und bleibt stets auf diesem Betrag, so lange der Asynchronmaschine aus der Antriebsmaschine die volle Leistung zur Verfügung steht.

Wesentlich ungünstiger werden die Verhältnisse im Mutterwerk, wenn die Netzlast sinkt. In Abb. 206 sind verschiedene Netzlaststufen hervorgehoben und zwar $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ und 11,2 vH, wobei den praktischen Verhältnissen entsprechend der Netzleistungsfaktor sich auf die Werte 0,65, 0,6, 0,55, 0,4 verschlechtern soll. Das Leistungsdreieck des Asynchronstromerzeugers verschiebt sich mit wechselnder Netzlast mit seiner Spitze f_1 auf der der Änderung des Netzleistungsfaktors entsprechenden Kennlinie $f_1 f_5$, und es ist nun leicht festzustellen, welche Werte für die Blindleistung und den Leistungsfaktor im Mutterwerk entstehen. Bei $\frac{1}{4}$ Last ist $\cos \varphi$ auf 0,29 gesunken und die Blindleistung der Maschinen des Mutterwerkes noch um 620 kVA größer als ohne Asynchronstromerzeuger.

Hier zeigt sich also die erste recht unangenehme Betriebswirkung durch den Asynchronstromerzeuger, weil der Leistungsfaktor im Mutterwerk wesentlich verschlechtert wird. Es ist daher bei den vorhandenen Maschinen des Mutterwerkes festzustellen, ob die jeweils im Betrieb zu haltende Maschine noch mit dem schlechten Leistungsfaktor arbeiten kann, ohne daß eine unzulässige Erwärmung der Wicklungen eintritt. Daraus folgt, daß auch die Größe der einzelnen Maschinen, die entsprechend der Netzbelastung im Mutterwerk laufen müssen, durch das Asynchronwerk mitbestimmt wird.

Sinkt die Netzlast unter $\frac{1}{4}$ ihres Vollastwertes, so werden die Arbeitsbedingungen für das Mutterwerk noch ungünstiger. Im vorliegenden Beispiel dürfte die geringstzulässige Netzlast, wenn der Asynchronstromerzeuger 1000 kW abgibt also die ganze verfügbare Wassermenge verarbeitet, was ja mit Rücksicht auf die Kohlenersparnisse im Mutterwerk wesentlich ist, nur bis auf diese 1000 kW = 11,2 vH fallen, wobei aber das Mutterwerk noch mitlaufen muß, um den Blindstrom zu liefern. Geht die Netzlast weiter zurück, wird also $N_N < N_A$,

so wird nunmehr die überschüssige Leistung des Asynchronwerkes an das Mutterwerk abgegeben, d. h. der noch im Betrieb befindliche Synchronstromerzeuger wird als Motor angetrieben. Ein solcher Betrieb ist natürlich unzulässig. Es fehlt sofort dem Asynchronwerk die taktgebende Frequenz. Hat das Mutterwerk Rückstrommeßwerke, so werden diese ansprechen, die Maschine also abschalten. Dadurch kommt auch sofort das Asynchronwerk zum Stillstand, da ihm nunmehr die Spannung fehlt. Die Stromlieferung wird vollständig unterbrochen; die Antriebsmaschinen in beiden Werken können zum Durchgehen kommen.

Es ist also Bedingung, daß die Gesamtleistung aller mitarbeitenden Asynchronwerke unter allen Umständen kleiner sein muß als die geringste, jemals vom Netz verlangte zu irgendeiner Zeit also z. B. an Sommertagen, in der Nacht und dergleichen. Hierüber werden bestehende Anlagen stets genügende Betriebsaufzeichnungen haben, die bekannt sein müssen, um die Frage hinsichtlich des Aufstellens eines Asynchronstromerzeugers grundsätzlich beantworten zu können. Bei Neuanlagen ist größte Vorsicht geboten.

Wird im Zusatzwerk ein Synchronstromerzeuger aufgestellt, so ist für diesen wiederum der Vektor der Wirkleistung $= \underline{f_1 m_1}$, dagegen der Vektor der Blindleistung $\underline{m_1 c_1}$ bzw. $\underline{m_1 n_1}$ also der Richtung des Vektors der Blindleistung des Asynchronstromerzeugers entgegengesetzt, und der Vektor der scheinbaren Leistung $\underline{f_1 c_1}$ bzw. $\underline{f_1 n_1}$.

Bei der Größenbestimmung der synchronen Zusatzmaschine hinsichtlich der kVA-Leistung ist nun zunächst festzustellen, für welchen Leistungsfaktor die Maschine am vorteilhaftesten bemessen wird. Dabei ist weiter von Bedeutung, ob die Zusatzmaschine, um ständige Bedienung und kostspielige Schaltgeräte zu sparen, mit festeingestellter Erregung arbeiten, oder ob auch das Zusatzwerk an der Regelung der Netzbelastung beteiligt sein soll.

In Abb. 206 ist festeingestellte Erregung des Zusatzstromerzeugers vorausgesetzt und zeichnerisch festgelegt einmal bei $\cos \varphi = 0,85$, um den Vergleich mit der Asynchronmaschine richtig durchführen zu können, zweitens bei $\cos \varphi = 0,4$ entsprechend dem schlechtesten im Netz vorkommenden Leistungsfaktor.

Im ersten Fall tritt eine Entlastung des Mutterwerkes sowohl in der Wirk- als auch in der Blindleistung ein. Da ferner zunächst im Zusatzwerk nichts an der Maschine geändert werden soll, ist z. B. bei $\frac{1}{4}$ Netzbelastung vom Mutterwerk noch eine scheinbare Leistung von 3050 kVA zu liefern. Bei weiterer Abnahme bis auf 1000 kW entsprechend der Leistung des Zusatzwerkes muß das Mutterwerk zur Deckung der Blindlast des Netzes mit 1660 kVA seiner Maschinenleistung im Betrieb gehalten werden. Ersparnisse an Bedienungskosten können daher nicht gemacht werden. Auch der Kohlenverbrauch bei einem Dampfkraftwerk als Mutterwerk wird nicht auf das günstigste Maß beschränkt. Der Leistungsfaktor im Mutterwerk wird günstiger, aber schlechter gegen-

über dem Wert, der entstehen würde, wenn die ganze Netzlast vom Mutterwerk selbst gedeckt werden würde, weil die Zusatzmaschine nur einen Teil der Blindlast des Netzes liefern kann.

Wesentlich vorteilhafter werden die Belastungsverhältnisse für das Mutterwerk, wenn die synchrone Zusatzmaschine untererregt arbeitet, wenn also von vornherein auf einen Leistungsfaktor von z. B. $\cos \varphi = 0,4$ eingestellt wird. Das Leistungsdreieck ist dann in Abb. 206 dargestellt durch das Dreieck $f_1 m_1 n_1$. Wird auch hier der Zusatzstromerzeuger mit festeingestellter Erregung betrieben und im Zusatzwerk nicht geregelt, so ist bei einer Netzbelastung von 1000 kW das Mutterwerk ohne Belastung, kann also stillgesetzt werden. Je nach den Gesamt-Betriebsverhältnissen ergeben sich dadurch unter Umständen wesentliche Ersparnisse an Bedienung durch Fortfall einer Nachtschicht und an Kohlenverbrauch.

Andererseits wird die Ausnutzungsfähigkeit der Maschinen des Mutterwerkes infolge der Übernahme der Blindstromlieferung durch das Zusatzwerk gehoben, der Wirkungsgrad und damit auch der Dampfverbrauch besser.

Die Zahlentafel 16 gibt eine Zusammenstellung der Leistungs- und Leistungsfaktorwerte für das Mutterwerk unter den Voraussetzungen, daß 1. das Kraftwerk selbst die gesamte Netzbelastung deckt, 2. ein Asynchronstromerzeuger, 3. ein Synchronstromerzeuger mit $\cos \varphi = 0,85$ und 4. ein untererregter Synchronstromerzeuger mit $\cos \varphi = 0,4$ im Zusatzwerk mitarbeitet. In allen Belastungsfällen ist die ungünstige Einwirkung der Asynchronmaschine auf das Mutterwerk unverkennbar.

Die Betriebsverhältnisse im Zusatzwerk. Beim Asynchronstromerzeuger muß die Spannung für den Ständer vorhanden sein. Bleibt sie aus irgendeinem Grund fort z. B. infolge eines vorübergehenden Kurzschlusses durch einen Vogel auf der Strecke oder sonstige unbedeutende Ursachen, so arbeitet die Asynchronmaschine nicht auf den Kurzschluß mit, sondern wird stromlos, der Spannungsschalter spricht an, die Turbine wird plötzlich entlastet und geht durch. Die Anlage muß von neuem angelassen und parallelgeschaltet werden. Bei kleinen Anlagen (Mühlen u. dgl.) mit ständiger Bedienung wird das nicht viel ausmachen, bei größeren Anlagen kann der Betrieb bis zur Unzulässigkeit gestört werden.

Wird andererseits die Leistung des Asynchronstromerzeugers infolge der Leistungsabnahme der Antriebsmaschine bei schwankenden Wasserverhältnissen geregelt, so lassen der Kennlinienverlauf der Abb. 89 in Band I und die Werte der Zahlentafel 16 erkennen, daß dann insbesondere der Leistungsfaktor schnell sinkt. Der Betrieb wird ebenfalls kaum durchführbar. Bei schwankenden Wasserverhältnissen auf das Betriebsjahr bezogen tritt das noch besonders scharf in die Erscheinung. Für solche Fälle ist also der Asynchronstromerzeuger praktisch nur selten geeignet.

Befriedigt der Betrieb namentlich für die öffentliche Stromversorgung nicht, so kann davon abgesehen werden, wirtschaftlich beide Arten der Stromerzeuger gegenüberzustellen. Das Ergebnis solcher

Untersuchungen fällt zu-
meist zu ungunsten der Asyn-
chronmaschine aus, wobei
auch der ständige Verlust
durch die zu übertragende
Blindleistung eine nicht zu
unterschätzende Rolle spielt.

Größere Asynchronstrom-
erzeuger sind bisher nicht
zur Ausführung gekommen,
weil die dieser Maschinen-
gattung anhaftenden Nach-
teile doch überwiegenden
Einfluß ausüben. Immerhin

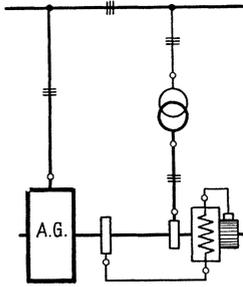


Abb. 207. Kompensierter
Asynchronstromerzeuger
mit Drehstrom-Kommutator-
Hintermaschine.

sind Schaltungen angegeben
worden, die die **Selbst-
erzeugung der** erforder-
lichen **Blindleistung** zum
Gegenstand haben. Zu nen-
nen sind hier in erster Lin-
nie die Kommutator-Erre-
germaschine und der
Kondensator. Abb. 207
zeigt für die Blindstrom-
lieferung aus einer Kommu-
tatormaschine ein einfaches
Schaltbild. Die Asynchron-
maschine *A.G.* liegt am Netz,
aus dem über einen Um-
spanner die Drehstrom-
Kommutatormaschine ge-
speist wird. Letztere ist
mit dem Läufer der Asyn-
chronmaschine verbunden,

Zahlentafel 16. Leistungs- und Leistungsfaktorwerte für das Mutterwerk beim Parallelbetrieb mit Asynchron- oder Synchronstromerzeugern.

Netzlast	Wirklast des Netzes $N_{N, w}$ kW	Netzleistungs- faktor $\cos \varphi_N$	Blindleistung des Netzes $N_{N, b}$ kVA	Scheinlast des Netzes N_N kVA	Wirkleistung des Mutterwerkes			Blindleistung des Mutterwerkes			Scheinleistung des Mutterwerkes			Leistungsfaktor des Mutterwerkes		
					mit A.M. $N_{A, w}$	mit S.M. I $N_{S, w}$	mit S.M. II $N_{S, w}$	mit A.M. $N_{A, b}$	mit S.M. I $N_{S, b}$	mit S.M. II $N_{S, b}$	mit A.M. $N_{A, s}$	mit S.M. I $N_{S, s}$	mit S.M. II $N_{S, s}$	mit A.M. $N_{A, l}$	mit S.M. I $N_{S, l}$	mit S.M. II $N_{S, l}$
$\frac{1}{1}$	9000	0,7	9000	12900	8000	8380	6720	12500	11540	10420	0,64	0,69	0,76			
$\frac{1}{4}$	6750	0,65	7900	10400	5750	8520	5620	10250	9270	8020	0,56	0,62	0,72			
$\frac{1}{2}$	4500	0,60	6000	7500	3500	6620	3720	7500	6420	5100	0,466	0,545	0,685			
$\frac{1}{4}$	2250	0,55	3400	4100	1250	4020	1120	4210	3050	1680	0,297	0,41	0,745			
$\frac{11}{2}$ vH	1000	0,40	2280	2500	0	2900	1660	2900	1660	0	0	0	0			

A.M. = Asynchronmaschine $\cos \varphi_A = 0,85$
 S.M. I = Synchronmaschine $\cos \varphi_S = 0,85$
 S.M. II = Synchronmaschine $\cos \varphi_S = 0,40$

liefert Strom der Läuferfrequenz, beeinflußt Größe und Phase des Läuferstromes und damit den Strom in der Ständerwicklung der Asynchronmaschine. Der zweite Nachteil der Asynchronmaschine, keine selbständige Frequenz- oder Taktschaltung hervorbringen zu können, wird mit einer solchen Drehstrom-Erregermaschine ebenfalls unter bestimmten Voraussetzungen beseitigt, worauf allerdings nicht näher eingegangen werden soll¹. Die Vorteile der Betriebsführung und der geringen Gesamtbeschaffungskosten für den einfachen Asynchronstromerzeuger fallen allerdings fort und damit der Hauptgrund für die Verwendung dieser Bauformen, zumal die Drehstrom-Erregermaschine mit Umspanner und Regeleinrichtungen auch keine wirtschaftlichen Verbesserungen gegenüber dem Synchronstromerzeuger bringen.

¹ Schenkel, Dr.-Ing. M.: Über große asynchrone Blindleistungsmaschinen und selbsterregte asynchrone Generatoren. VDE-Fachberichte 1926 und ETZ 1924 Heft 47 S. 1265.

Dritter Abschnitt.

Die Schalt- und Schutzvorrichtungen.

Grundsätzliches. Jeder Stromkreis muß jederzeit gefahrlos ein- und ausgeschaltet werden können. Er ist außerdem gegen besondere Betriebsvorgänge oder äußere Ursachen z. B. gegen Überlastung, beim Absinken oder Ausbleiben der Spannung, bei falscher Stromrichtung, gegen Überspannungen oder gegen unerwünschte Störübertragungen aus anderen Netzteilen zu schützen. Die Auswahl der dazu erforderlichen Schalt- und Schutzvorrichtungen bedarf besonderer Kenntnisse über die Aufgaben, die sie zu erfüllen haben und die Bedingungen, denen ihre Arbeitsweise entsprechen muß. Die große Mannigfaltigkeit gerade auf diesem Gebiet, die fortgesetzte Entwicklung der Bauformen und ihrer Wirkungsweise, die technischen Verhältnisse elektrischer und mechanischer Art, denen sie genügen müssen, bedingen sorgfältige Prüfung, sonst können Quellen unangenehmer Störungen, ja Gefährdungen der Anlage und der Bedienung geschaffen werden.

Wenn auch der VDE Begriffe, Bauformeneinzelheiten, Abmessungen und Prüfvorschriften¹ festgelegt hat, so ist die praktische Auswahl der Geräte hiervon doch nur bedingt abhängig, da Spannung, Strom, Leistung, Schaltgeschwindigkeit, Einbaustelle in der Gesamtanlage, Bedeutung der Schaltstelle, besondere Aufgaben, Bedienungsart, mechanische Beanspruchungen, Abmessungen und schließlich auch Preis und Gewicht den Ausschlag geben. Das bezieht sich sowohl auf Gleichstrom und Wechselstrom niederer Spannungen als ganz besonders auf Wechselstromhochspannung und Großkraftübertragung.

Es können nur grundsätzliche Formen und die Hauptgesichtspunkte besprochen werden. Aus ihnen wird aber das zu erkennen sein, was wesentlich für die Beurteilung eines Gerätes oder einer Vorrichtung ist, um der zu erfüllenden Aufgabe entsprechen zu können.

Für die Schalter zur Bedienung eines Stromkreises bestimmen Stromart, Spannung und die Bedingung, unter Last die Strombahn zu unterbrechen oder auf einen Kurzschluß einzuschalten, die Bauform und sonstige Ausführung. Die unter bestimmten Verhältnissen zu bewältigende Schaltleistung und die Schaltgeschwindigkeit geben den Ausschlag.

Die Schutzgeräte gegen Überstrom sollen die Stromerzeuger, Umspanner, Leitungen, Motoren usw. vor Strömen schützen, die ihrem

¹ Regeln für Wechselstrom-Hochspannungsgeräte REH 0670/1937.

elektrischen und mechanischen Aufbau gefährlich werden können, die also über dem zulässigen Betriebsstrom (Dauer- oder Nennstrom) liegen. Solche Überströme werden durch Überlastungen, Kurz- und Erdschlüsse hervorgerufen. Sie können vorübergehend auftreten oder von längerer Dauer sein. Unter die vorübergehenden Überlastungen fallen in der Hauptsache solche, die in Motorenanlagen durch Belastungsstöße eintreten. Sie dürfen zumeist kein Ansprechen des Schutzgerätes verursachen, wenn der Motor durch die Überlastung und ihre Dauer nicht gefährdet wird. Von dem Einbezug der Beleuchtungsanlagen soll abgesehen werden. Auch Kurz- und Erdschlüsse können von sehr kurzer Dauer und daher vorübergehender Art sein. Man bezeichnet solche Überlastungen als „Wischer“. Sie treten in Freileitung durch das Zusammenschlagen von Leitern bei heftigem Sturm oder ungleichem Rauhrefabfall, bei Phasenüberbrückung durch einen nur einmal gezündeten und sofort wieder verlöschenden Erdschlußlichtbogen, durch aufschlagende Äste, durchfliegende Vögel u. dgl. auf. Auch hier soll zumeist der Betrieb keine Störung durch das Ausschalten eines Schutzgerätes erleiden. Ist die Überlastung eines Stromkreises, eines Umspanners oder Stromerzeugers aus besonderen Gründen vom Betrieb zugelassen, so müssen die Schutzgeräte entsprechend einstellbar sein. Treten dagegen an irgend welchen Stellen einer Anlage Kurzschluß und Erdschluß durch metallische Berührung oder durch einen Dauerlichtbogen ein, dann wird dadurch eine Dauerüberlastung hervorgerufen. Die Fehlerquelle für diese muß so schnell als möglich abgetrennt werden und zwar so eng örtlich eingegrenzt, daß die übrigen Teile der Anlage nicht in Mitleidenschaft gezogen werden.

Die Schutzgeräte gegen Gefährdungen durch Überspannungen sind wieder besonderer Art. Sie werden hauptsächlich in Anlagen mit ausgedehnten Freileitungen erforderlich.

Zu den ihnen gestellten Aufgaben müssen alle Schalt- und Schutzgeräte noch die folgenden Forderungen erfüllen:

- Zuverlässigkeit,
- Gefahrlosigkeit beim Bedienen oder beim Ansprechen des Gerätes,
- leichte Beaufsichtigung, Untersuchung und Instandsetzung,
- jederzeitige Betriebsbereitschaft auch nach mehrmaligem Bedienen oder Schalten,
- einfache Bauform.

12. Die Schalt- und Schutzgeräte für Gleichstrom und Wechselstrom bis 1000 Volt

umfassen die einfachen Hebelschalter, die Schmelzsicherungen und die Selbstschalter.

a) **Die Hebelschalter** (Abb. 208) dienen zum Ein- und Ausschalten des Stromkreises. Ihre Bauart ist so allgemein bekannt, daß auf sie im einzelnen nicht eingegangen zu werden braucht. Ihre Verwendung richtet sich nach der Schaltleistung, die sie gefahrlos beherrschen können. Diese Schaltleistung ist gleich dem Produkt aus dem zu unter-

brechenden Strom und dem Unterschied der Spannungen vor und hinter dem Schalter unmittelbar nach dem Öffnen der Schaltstücke. Die Schaltvorgänge bei Gleich- und Wechselstrom sind verschieden. Sie müssen als bekannt vorausgesetzt werden. Wesentlich ist die Stärke des bei der Unterbrechung des Stromkreises auftretenden Schaltfeuers und die Gefahr des Nichtverlöschens des Lichtbogens. Bei Gleichstrom setzt Lichtbogenbildung schon bei verhältnismäßig niedriger Spannung ein. Bei Wechselstrom wird das Schaltfeuer durch die Induktivität des auszuschaltenden Stromkreises beeinflusst. Induktionsfreie und kapazitive Belastung vermindern das Schaltfeuer wesentlich.

Zu der Schalteistung kommt weiter die Schaltgeschwindigkeit, die bei den Hebelschaltern trotz ihrer Ausführung als Augenblicksschalter mit Federrückführung der Schaltstücke verhältnismäßig klein ist. Bei Gleichstrom soll schnell ausgeschaltet werden, um das Schaltfeuer zu vermindern. Bei Wechselstrom kann unter Umständen langsameres Ausschalten erwünscht sein, so bei Stromkreisen mit wesentlicher Kapazität¹.

Auch beim Einschalten sind besondere Erscheinungen zu beachten. Bei Gleichstrommotoren wird abgesehen von Kleinmotoren belastungslos eingeschaltet und der Motor durch den Anlasser in Gang gesetzt. Hier sind dann keine unzulässigen Einschaltströme zu erwarten. Bei Wechselstrom dagegen treten selbst bei leeranlaufenden Motoren und

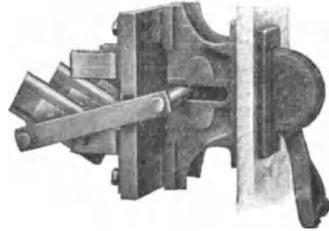


Abb. 208. Dreipoliger Hebelschalter für 350 A, 500 V mit Steigbügelantrieb.

Umspannern unter Umständen sehr erhebliche Stromstöße auf, die ein Vielfaches des Vollaststromes erreichen können. Sie ergeben sich aus dem Magnetisierungsstrom, der zur Erregung des magnetischen Feldes erforderlich ist. Der Endzustand tritt erst nach Ablauf einiger Perioden ein. Das Einschalten soll ferner stets mit großer Geschwindigkeit erfolgen, um den Abbrand der Schaltstücke namentlich an den Kanten zu vermeiden, der bei langsamem Zuschalten starke Beschädigung und stehenden Lichtbogen herbeiführen kann.

Hebelschalter sind nach diesen Erläuterungen nur bedingt verwendungsfähig. Ein Schalten auf Kurzschluß ist nicht zulässig, so daß ihre Benutzung in größeren Netzen für Wechselstrom nur mit besonderer Vorsicht möglich ist. Das Hauptanwendungsgebiet ist der Niederspannungsstromkreis für kleine Motoren und Beleuchtung, sowie die Gleichstromanlage.

b) Die Schmelzsicherung. Zum Schutz des Stromkreises gegen Überstrom ist bei Verwendung eines Hebelschalters in allen Polen oder Phasen eine Schmelzsicherung notwendig. Sie besteht aus leicht schmelzbarem Metall (Blei- oder Silberstreifen), das in geeigneter Bauform in den zu schützenden Stromkreis eingeschaltet wird und bei

¹ VDE 0660/1933 § 84.

einem bestimmten Strom infolge zu starker Erwärmung schmilzt; dadurch wird dann der Stromkreis unterbrochen.

Eine Stromunterbrechung an sich erfolgt stets bei Überschreitung eines bestimmten Stromes, indessen kann bei großer zu unterbrechender Leistung das Ansprechen der Sicherung zerknallartig vor sich gehen und dadurch den Verlust der ganzen Sicherung, unter Umständen sogar größere Beschädigungen der angrenzenden Teile der Schaltanlage und Gefährdung der Bedienung zur Folge haben. Das begrenzt die praktische Ausführung der Sicherung auf eine bestimmte

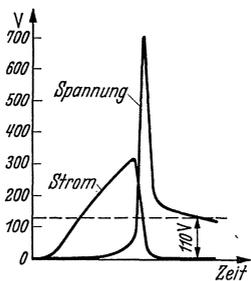


Abb. 209. Kennlinienverlauf für Strom und Spannung bei plötzlicher Stromunterbrechung durch Sicherung im Gleichstromkreis.

höchste Abschaltleistung. Darüber hinaus müssen die Selbstschalter verwendet werden. Bei Gleichstrom geht man nicht gerne über etwa 1000 A und 500 V. Bei Wechselstrom werden heute Abschaltleistungen bis zu 400 MVA bei Spannungen bis 30 kV zugelassen, worauf bei der Hochspannungssicherung noch besonders eingegangen wird. Da die Schmelzsicherungen nur einpolig gebaut und daher einpolig verwendet werden können, arbeiten sie bei allen Stromarten insbesondere bei Drehstrom insofern nicht zuverlässig, als sie bei Überlastung nicht in allen Polen wie erforderlich gleichzeitig ansprechen. Es ist fast stets zu beobachten,

daß, wie bereits im Band I erwähnt, nur eine der Stromkreissicherungen durchschmilzt, was in Gleich- und Wechselstromanlagen bei Erdschlüssen, in Drehstromanlagen durch Überlastung der anderen Phasen zu Beschädigungen der zu schützenden Teile führen kann.

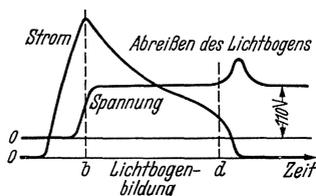


Abb. 210. Kennlinienverlauf für Strom und Spannung bei verzögerter Stromunterbrechung durch Sicherung im Gleichstromkreis.

Bezüglich der Stromart und der Stromunterbrechung durch eine Schmelzsicherung gelten die beim Hebelhalter gemachten Bemerkungen ebenfalls; hinzukommt das Auftreten von Überspannungen beim Ansprechen der Sicherung. Die Höhe der Spannung hängt bei Gleichstrom wesentlich von der Zeit ab , innerhalb welcher die Unterbrechung erfolgt. Abb. 209 und 210 zeigen hierfür Kennlinien. Geht die Unterbrechung

ganz plötzlich und vollständig vor sich (Abb. 209), dann kann die Spannung ungefähr bis zum Sechsfachen des Betriebswertes ansteigen. Da aber die Wicklungen der Maschinen und Geräte für derart hohe Spannungsbeanspruchung, auch wenn sie nur sehr kurze Zeit auftritt, nicht isoliert werden, können Wicklungsverletzungen (Überanstrengung der Isolation), Durchschläge und Überschläge die Folge sein. Verläuft dagegen die Stromunterbrechung verzögert (Abb. 210), so tritt keine nennenswerte Spannungserhöhung auf. Diese letztere Arbeitsweise wird bei der Schmelzsicherung dadurch erfüllt, daß sich bei der Unter-

¹ VDE 0660/1933 § 84.

brechung des Stromes ein Lichtbogen bildet, der mit seinem Verlöschen eine allmähliche Abnahme des Stromes bewirkt. Selbstverständlich muß aber die Sicherung so gebaut sein, daß dieser Lichtbogen nicht stehen bleibt, denn dann wäre naturgemäß jede Schutzwirkung aufgehoben. Um das Verlöschen des Lichtbogens bei hoher Spannung (Gleichstrom 500 V und mehr) sicher zu erreichen, wird das eigentliche Sicherungselement baulich entsprechend gestaltet, worauf weiter unten noch besonders eingegangen wird. Schmelzsicherungen, bei denen die Unterbrechung unter Öl erfolgt, sind in Gleichstromanlagen unzulässig, weil das Öl ein ganz plötzliches Abreißen des Lichtbogens verursacht und durch den Lichtbogen stark oxydiert wird, wodurch es an Isolierfähigkeit und damit an der zuverlässigen Wirkung verliert.

Bei Wechselstrom muß die Unterbrechung des Stromes sofort vollständig und tunlichst im Durchgang des Stromes durch Null erfolgen, weil bei dieser Stromart der Lichtbogen Überspannungen erzeugt und unter Umständen Spannungsresonanz auslösen kann. Nach der oszillographischen Aufnahme (Abb. 211) spricht nun aber die Schmelzsicherung im Höchstwert der Stromkennlinie an. Die Bedingungen für den Ablauf des Ausschaltvorganges, insbesondere die Abschaltzeit, sind also bei Gleichstrom und Wechselstrom entgegengesetzt.

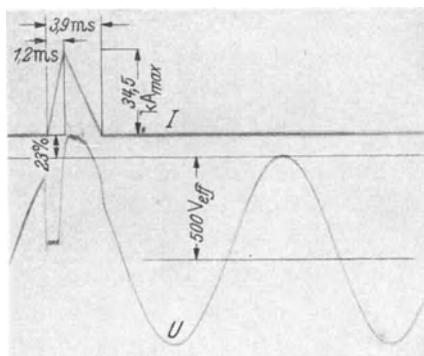


Abb. 211. Oszillographische Aufnahme des Kennlinienverlaufes für Strom und Spannung bei Stromunterbrechung durch Sicherung im Wechselstromkreis.

In Wechselstromanlagen auch bei Niederspannung bedarf die Auswahl der Streifensicherung ferner einer vorherigen Feststellung der Kurzschlußleistung am Ort des Sicherungseinbaues, da eine ungenügende Sicherung eine außerordentliche Gefahrenquelle darstellt. Beim Ansprechen der Sicherung tritt durch Verdampfen des Schmelzleiters ein Metaldampf auf, der seiner hohen Leitfähigkeit wegen von den umliegenden Schaltgeräten unbedingt ferngehalten werden muß. Zu diesem Zweck wird der Schmelzleiter in ein Hartpapierrohr oder in ein Rohr aus keramischem Baustoff eingeschlossen, das dem hohen Innendruck, der beim Verdampfen des Schmelzleiters auftritt, gewachsen und zudem derart ausgebildet sein muß, daß ein Druckausgleich gegen die Umgebung keine Gefährdung verursachen darf. Zur Löschung des Lichtbogens wird die Sicherungspatrone mit einem geeigneten Löschmittel ausgefüllt (Abb. 212). Die Güte einer solchen Sicherung wird bestimmt durch die Abschmelzzeit bei Kurzschluß, nach der sich die sichere Staffelung mehrerer Sicherungen richtet, ferner durch die Löschzeit, wobei Rückzündungen nicht auftreten dürfen, schließlich nach der Art der Unterdrückung von Überspannungen.

Abb. 213 zeigt die Schmelzkennlinie also die Abhängigkeit der Schmelzzeit vom Belastungsstrom, nach der die Streifensicherung im allgemeinen arbeitet. Mit zunehmendem Überstrom wird die Schmelzzeit immer kleiner. Infolgedessen können

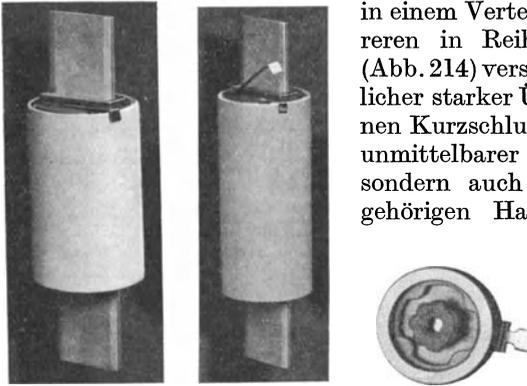


Abb. 212a und b. Niederspannungssicherung mit Kennmarke für Stromunterbrechung und Schnitt durch Sicherungspatrone.

in einem Verteilungsstromkreis mit mehreren in Reihe liegenden Sicherungen (Abb. 214) verschiedener Stärke bei plötzlicher starker Überlastung z. B. durch einen Kurzschluß nicht nur diejenigen in unmittelbarer Nähe der Fehlerstelle, sondern auch Sicherungen in der zugehörigen Hauptverteilungsstelle oder am Stromerzeuger zum Schmelzen kommen und dadurch andere Anlage- teile in Mitleidenschaft ziehen. Das ist betrieblich unzulässig. Es ist daher die zu fordernde Fehlereingrenzung

gewährleisten. Dazu kommt, daß bei großen Betriebsströmen die Sicherungsstreifen sehr starke Querschnitte erhalten müssen. Die Abgleichung der Abschmelzverhältnisse für in Reihe liegende Sicherungen — also die Staffelung — kann dann nicht mit der gewünschten Genauigkeit und

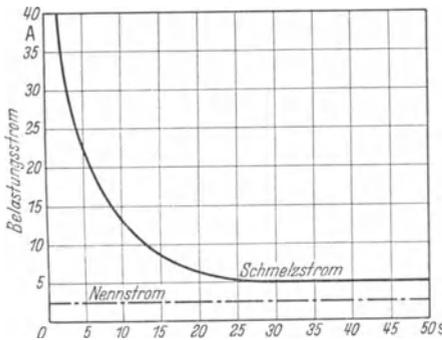


Abb. 213. Strom-Zeit-Kennlinie für eine Streifensicherung (Schmelzkennlinie).

nicht mit Sicherheit zu Zuverlässigkeit vorgenommen werden, weil die Schmelztemperatur auch von dem vorausgegangenen Belastungszustand und der Dauer der Belastung des Schmelzstreifens abhängt. War die Belastung der Sicherung vor Eintritt der Störung gering, blieb also der Schmelzstreifen kalt, so wird das Ansprechen der Sicherung nach längerer Zeit vom Auftreten des Überstromes erfolgen, als wenn vorher der volle Betriebsstrom und damit die vorge-sehene Betriebserwärmung des

Sicherungsstreifens vorhanden war. Dieser Umstand ist besonders für die Schutzwirkung in den Stromerzeugerstromkreisen zu beachten.

Die Forderungen der schnellsten Eingrenzung, der Ansprechstaffelung und der allpoligen Abtrennung nur des fehlerhaften Teiles der Anlage erfüllen demnach die einfachen Schmelzsicherungen nur in sehr beschränktem Maß. Sie sind daher für einen Netzüberstromschutz ungeeignet und nur für Einzelstromkreisschutz zu benutzen.

Die Unzuverlässigkeit hinsichtlich der Staffelung ist bei der neuesten Durchbildung der Sicherungspatronen wesentlich eingeschränkt worden. Abb. 215 zeigt die Kennlinien der Voigt & Haeffner-Sicherungen für verschiedene Arbeitsweisen. Die „flinke“ Sicherung wird für schnellste Kurzschlußabschaltung und zur Begrenzung sehr hoher Kurzschlußströme auf geringe Höchstwerte, sowie als Grobschutz vor Schaltgeräten, die den auftretenden Kurzschlußleistungen nicht gewachsen sind, ver-

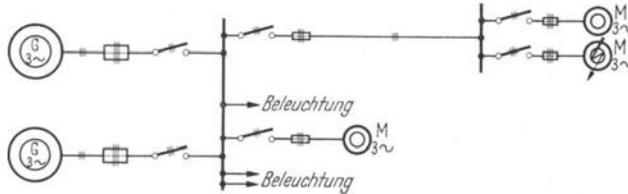


Abb. 214. Kraftwerk und Verteilungsstromkreise mit Schmelzsicherungen.

wendet. Die „träge“ Sicherung soll die nach der Erwärmungsgrenze mögliche Leistungsausnutzung z. B. der Überlastung eines Motors gestatten, aber trotzdem den Schutz gegen Dauerüberlastung gewährleisten. Die „Maschennetz-sicherung“ wird zur Eingrenzung der Fehlerstelle benutzt¹. Das wird durch Lichtbogenzeiten erreicht, die im Verhältnis zur Abschmelzzeit außerordentlich klein sind. Diese Sicherung bietet allerdings keinen Überlastungsschutz und erfüllt auch nicht die Abschmelzbedingungen nach RES.

Schließlich ist auf den betrieblichen Nachteil hinzuweisen, daß die Auswechslung von Schmelzstreifen oder Schmelzpatronen verhältnismäßig umständlich, oft sogar recht zeitraubend und ferner kostspielig ist. Abb. 216 zeigt die neueste Ausführung einer Streifen-sicherung in Patronenform mit Handbügel für die Patrone. Die Bedienung ist hier gefahrlos, die Auswechslung der Patrone jederzeit möglich, auch wenn der Stromkreis unter Spannung steht.

e) **Die Selbstschalter.** Zu den Sicherungen erfordert jeder Stromkreis für das Ein- und Ausschalten noch einen besonderen Schalter. Erscheinen nach der Höhe der Ströme und der betrieblichen Bedeutung des zu schützenden Anlageteiles die Sicherungen ungenügend insbesondere auch, weil die sichere Abschaltung von Kurz- und Erdschlüssen gefordert werden muß, dann werden Sicherung und Schalter in einem Gerät vereinigt und als Selbstschalter in ein-, zwei- oder dreipoliger Ausführung gewählt. Sie werden für Spannungen bis 1000 V als offene Schalter gebaut, beidene die Trennung der Schaltstücke in der freien Luft

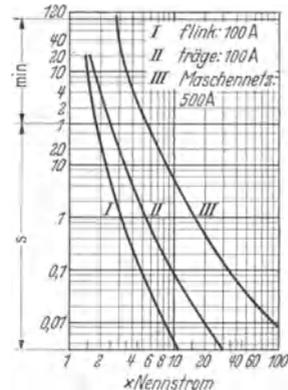


Abb. 215. Strom-Zeit-Kennlinie für flinke und träge Sicherungen, sowie für Maschennetz-sicherungen.

¹ Denzel, P.: Selektiv-, Querschnitts- und Rückstromschutz durch Sicherungen in einsystemig gespeisten Maschennetzen. ETZ 1939 Heft 49.

erfolgt. In Gegenüberstellung zu Abb. 209 und 211 zeigen Abb. 217 und 218 oszillographische Aufnahmen der Unterbrechung eines Gleichstromkurzschlusses durch einen Selbstschalter.

Je nach den zu schaltenden Strömen und der zu unterbrechenden Spannung sind diese Schalter nach folgenden Gesichtspunkten zu beurteilen oder haben sie die dabei erwähnten Bedingungen zu erfüllen. Aus Abb. 219 ist dazu der Aufbau eines dreipoligen Selbstschalters zu ersehen.

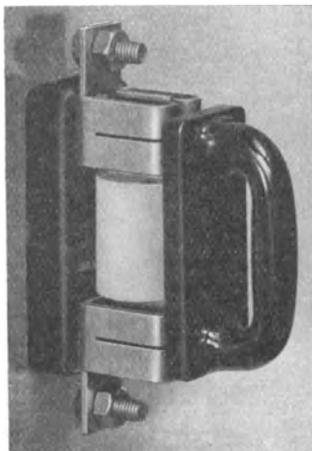


Abb. 216. Schmelzsicherung mit Vorrichtung zum Auswechseln der Patrone (Griffsicherung).

1. Der Schluß und die Trennung der Schaltstücke müssen sicher und schnell erfolgen, beides bei mehrpoligen Schaltern in allen Polen gleichzeitig. Ist das nicht der Fall, so sind ähnliche Rückwirkungen auf die zu schützenden Teile der Anlage zu befürchten wie bei der einpoligen Unterbrechung eines mehrphasigen Stromkreises durch Schmelzsicherungen. Ferner hat ein schlechter Schluß der Schaltstücke Funkenbildung und zusätzliche Erwärmung, eine zu geringe Ausschaltgeschwindigkeit das Stehenbleiben des Lichtbogens zwischen den Schaltstücken zur Folge, die beide bei Wechselstrom ebenfalls zu Überspannungen Veranlassung geben und außerdem eine Beschädigung der Schluß-

flächen (Schmelzperlenbildung) hervorrufen. Letzteres kann Festbrennen oder Klemmen des Schalters und dadurch Verzögerung des Ausschaltens

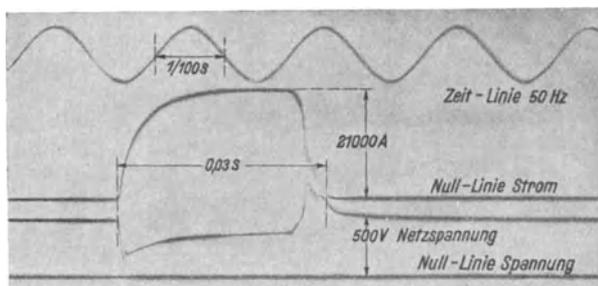


Abb. 217. Oszillographische Aufnahme der Unterbrechung eines Gleichstromkurzschlusses durch Selbstschalter 350 A, 500 V; Kurzschlußstrom 2100 A, Schaltzeit 0,03 s.

verursachen. Große Schalter sollen derart durchgebildet sein, daß die beweglichen Schaltstücke und ihre Einschaltbewegung zusammen durch entsprechende kinematische Übertragung eine Selbstreinigung der Gegenschaltstücke von Oxydation, Lichtbogenverletzungen und Schmelzperlen herbeiführen.

2. Geringste Abnutzung und Beschädigung der Schaltflächen beim

Ansprechen auch bei den größten zu schaltenden Leistungen. Das wird bei größeren Schaltern für das Ausschalten durch Funkenzieher oder magnetische Löschvorrichtungen, für das Einschalten durch Haupt- und Hilfsschaltstücke (Tast- und Hauptbürste) erreicht.

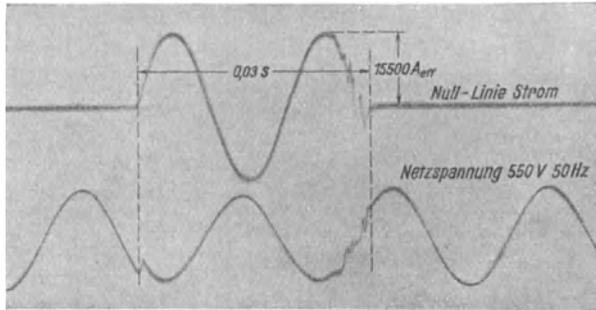


Abb. 218. Oszillographische Aufnahme der Unterbrechung eines Wechselstrom-Kurzschlusses durch Selbstschalter 350 A, 500 V; Kurzschlußstrom $15500 A_{eff}$, Schaltzeit 0,03 s.

3. In engem Zusammenhang mit dieser steht die weitere Forderung, daß der Schalter nach dem Ansprechen sofort wieder betriebsbereit, also ein Neueinschalten in kürzester Zeit möglich sein muß. Hierin liegt einer der besonderen Vorteile des Selbstschalters gegenüber den Schmelzsicherungen.

4. Reichlicher Abstand zwischen den getrennten Schaltstücken und bei mehrpoligen Schaltern zwischen den einzelnen Polen, ersteres, um das Stehenbleiben eines Lichtbogens sicher zu verhüten, letzteres, um das Zusammenschlagen von Lichtbögen benachbarter Pole zu verhindern, was mit einem unmittelbaren Kurzschluß gleichbedeutend wäre. Bei höheren Spannungen wird die zweite dieser Forderungen durch besondere Isoliertrennwände erfüllt (Abb. 220).

5. Schnelle und sichere Einstellung der Ansprech-(Auslöse-) Werte.

6. Große Unempfindlichkeit der Auslösevorrichtungen gegen Stöße und Erschütterungen, die beim Ansprechen des Schalters auftreten, weil sie zumeist nach Abb. 417 in zusammenhängende Schaltgerüste

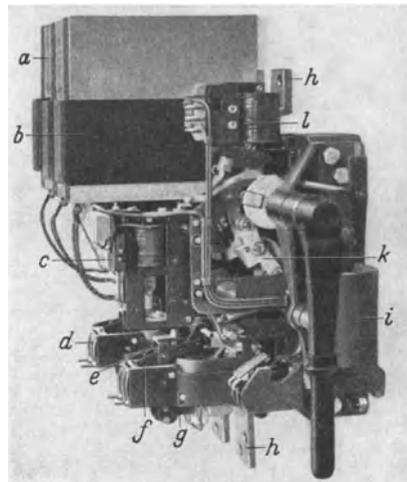


Abb. 219. Dreipoliger Selbstschalter für 1000 A mit Druckluftantrieb.

a Lichtbogenkammer, *b* Blaseisen, *c* Verzögerungseinrichtung, *d* Überstrom-Auslöser, *e* Anker für verzögerte Auslösung, *f* Anker für Schnellauslösung, *g* Hilfsschalter zur Betätigung der Verzögerungseinrichtung, *h* Anschlußstücke, *i* Druckluftantrieb, *k* Schaltschloß, *l* Spannungsrückgangs-Auslöser.

eingebaut werden, also gegenseitig durch die Gerüste mechanisch in Verbindung stehen.

7. Kräftige Bauart und vorzügliche Isolation in allen Teilen.

Schließlich soll jeder Selbstschalter mit Anschlüssen zur Betätigung von Meldevorrichtungen versehen sein, um dem Schaltwärter die Möglichkeit zu geben, jederzeit sofort auch dann, wenn

der Schalter hinter der Schalttafel oder im Zuge der Leitung befestigt ist, auf der Schaltwandvorderseite oder an jeder anderen Stelle zu erkennen, ob derselbe ein- oder ausgeschaltet ist.

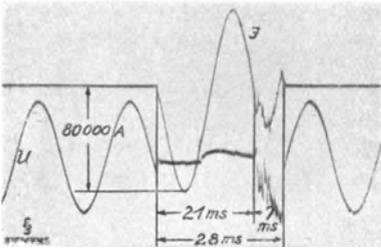
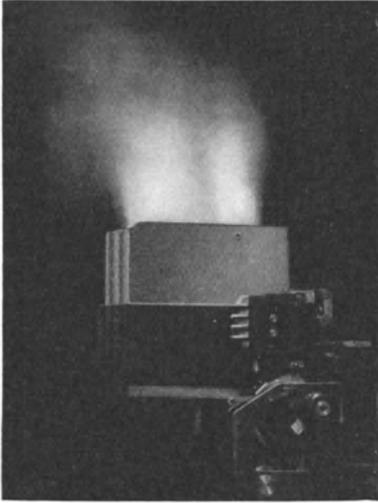


Abb. 220. Selbstschalter mit Isoliertrennwänden zur Verhinderung des Zusammenschlagens von Lichtbögen (Augenblick der Leistungsunterbrechung).

Bei den Selbstschaltern wird die Auslösung stets unmittelbar vom Betriebsstrom oder von der Betriebsspannung beeinflusst. Wandler bei Wechselstrom kommen wegen der hohen Ströme nicht zur Verwendung. Infolgedessen sind die Auslösevorrichtungen unmittelbar mit dem Schalter zusammengebaut.

Das Einschalten wird zumeist von Hand vorgenommen. Nur wenn es sich um sehr große Ströme handelt, oder der Aufbau der Schaltanlage und die Leitungsführung infolge Raummangels oder sonstiger ungünstiger Verhältnisse unständlich werden, wählt man die Ferneinschaltung. Ähnlich wie bei den Hochspannungsschaltern eingehender besprochen werden dazu besondere motorisch, magnetisch oder mit Druckluft arbeitende Schalterantriebe benutzt, deren Steuerung durch Druckknöpfe oder kleine Hebelschalter (Steuerschalter) erfolgt. Die Benutzung

der Ferneinschaltung gewährt zudem den Vorteil, an Baustoffmenge für die Heranführung der Anschlußleitungen (Kupferschienen, Kabel bei großen Strömen) erheblich sparen und über die Unterbringung der Schalter freier verfügen zu können. Abb. 221 zeigt ein Schaltbild für diese Vorrichtung. Die Lampen *S.Lp.* (rot und grün) geben dem Schaltwärter ein Sichtzeichen für die Stellung des Schalters. Zur Schalttafel sind nur Steuerleitungen geringen Querschnittes zu führen.

Die selbsttätige Ausschaltung kann erfolgen:

- bei Überstrom,
- bei Nullstrom,
- bei Spannungsrückgang,
- bei Spannungserhöhung,

wobei auch mehrere dieser Auslösevorrichtungen auf einen Schalter wirksam sein können.

Beim Selbstschalter für Überstromauslösung werden die Schaltmesser in geschlossener Stellung durch Sperrklinken festgehalten. Jede Klinke ist mit dem Anker eines Elektromagneten verbunden, der vom Betriebsstrom unmittelbar erregt wird. Der Anker wird durch Federkraft abgezogen. Steigt der Strom in dem zu schützenden Stromkreis über einen bestimmten Wert, so überwiegt die Zugkraft des Magneten, der Anker wird angezogen, die Klinke ausgelöst und der Schalter durch Federkraft geöffnet. Es tritt dann Schnellauslösung ein. Eine besondere Zeitverzögerung d. h. eine bestimmte einstellbare Dauer der Überlastung bis zum Ansprechen wird bei diesen Schaltern dann angewendet, wenn mehrere Schalter in Reihe liegen. Der Auslösestrom kann in der Regel zwischen dem 1,2- bis 2fachen Wert des Nennstromes eingestellt werden. Hierfür ist die Art des Betriebes und die Einbaustelle maßgebend. Handelt es sich um große Motoren mit hohem Anlaufstrom und größerer Anlaufzeit (etwa 10 bis 30 s), so ist bei der Einstellung der Schalterauslösung hierauf besonders Rücksicht zu nehmen, oder die selbsttätige Auslösevorrichtung elektrisch für die Zeit des Anlaufens zu überbrücken (zu blockieren).

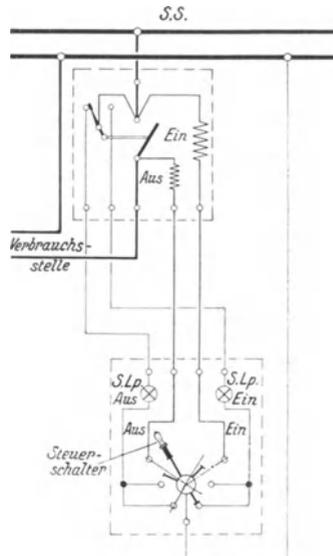


Abb. 221. Schaltbild zur Fernsteuerung eines Selbstschalters.

Die Größenbestimmung des Selbstschalters für Überstromauslösung richtet sich nach dem zulässigen Ausschaltstrom im Augenblick der Unterbrechung. Dieser beträgt je nach der Spannung und der Art der Belastung mit Wirk- oder induktiven Blindwiderständen etwa bei 250 V bis 20000 A, bei 500 V etwa 14000 bis 15000 A. Es muß also der Ausschaltstrom rechnerisch ermittelt werden. Da in diesem Fall der Ausschaltstrom gleichbedeutend mit dem Kurzschlußstrom ist und letzterer von den Wirk- und Blindwiderständen der Kurzschlußbahn abhängt, muß für jeden einzelnen Fall der Kurzschlußstrom I_K festgestellt werden. Die Berechnung von I_K wird im 13. Kap. im einzelnen behandelt. Der Schalterhersteller muß angeben, ob sein Schalter den Anforderungen gewachsen ist. Aus diesem Grund ist eine Schalterauswahl nach den Herstellerpreislisten nicht immer ohne weiteres möglich.

In Motorstromkreisen wird häufiger eine vorübergehende, aber zulässige Überlastung nicht vermeidbar sein. Dann müssen die Überstromschalter entsprechend arbeiten also erst ansprechen, wenn der zulässige Strom überschritten wird, d. h. die höchstzulässige Übertemperatur des zu schützenden Anlageteiles erreicht ist. Bei dieser Arbeitsweise des Überstromschutzes — auch der trägen Sicherung nach S. 241 — kann der Motor wirtschaftlich besser ausgenutzt werden, weil nunmehr nicht die Höhe des Stromes, sondern die Temperatur der Motorwicklungen bestimmend ist. Diesem Grundgedanken wird die Durchbildung neuer Schalterbauformen (Motorschutzschalter) ganz besonders angepaßt, was zu beachten ist.

Der Nullstrom-Ausschalter hat, wie schon aus der Bezeichnung hervorgeht, die entgegengesetzte Aufgabe, d. h. er soll den Stromkreis unterbrechen, sobald der Strom unter einem bestimmten Wert oder auf Null abnimmt. Dabei behält der Strom aber seine ursprüngliche Richtung. Die Baudurchbildung ist zumeist derart, daß der Schalter durch die Zugkraft eines vom Strom durchflossenen Magneten in geschlossener Stellung gehalten wird und durch Feder- oder Gewichtskraft zur Auslösung kommt, sobald der Magnetismus nachläßt.

Der Nullspannungs- oder Spannungsrückgangsschalter ist nach dem gleichen Grundsatz gebaut wie der Nullstromschalter nur mit dem Unterschied, daß hier der Magnet zwischen zwei Leitern angeschlossen und infolgedessen der Höhe der Spannung entsprechend erregt wird. Fällt die Spannung unter einen bestimmten Betrag, so wird der Schalter wiederum durch Feder- oder Gewichtskraft geöffnet.

Der Rückstrom-Ausschalter hat im wesentlichen die ähnliche Aufgabe wie der Nullstromschalter, nur besteht der Unterschied darin, daß die Stromrichtung sich umkehren muß, wenn dieser Schalter zum Ansprechen kommen soll. Die Auslösung wird durch einen Differentialmagneten bewirkt, der von der Netzspannung und vom Strom erregt wird und das Klinkwerk des Schalters freigibt, sobald der Strom seine Richtung ändert. Dann unterstützt die Wirkung der Stromspule diejenige der Spannungsspule.

Sämtliche Selbstschalter arbeiten mit Freiauslösung, d. h. ihre Antriebe z. B. von Hand bleiben in der Einschaltstellung, auch wenn Auslösung erfolgt ist. Infolgedessen müssen die bereits erwähnten Schalterstellungszeichen eingebaut werden. Zum erneuten Einschalten ist ein Zurückholen des Antriebes erforderlich.

Über die Anwendung der einzelnen Schalterauslösevorrichtungen wird erst später im Zusammenhang mit den übrigen Netz- und Maschinenschutzeinrichtungen gesprochen werden, da aus den Ausführungen zu letzteren auch Schlüsse über die Selbstschalter nach ihrer Arbeitsweise gezogen werden können.

Auf die besonderen Schnellschalter ist noch hinzuweisen, die bei Gleichstrom als Schutzschalter für Motoren in stark angestregten Betrieben Verwendung finden. Die Auslösung erfolgt bei diesen Schaltern nicht durch Federkraft, sondern elektrisch durch besondere Ausschaltspulen, die in Reihe mit dem zu schützenden Stromkreis liegen. Abb. 222

zeigt ein Oszillogramm für die Arbeitsweise eines solchen Schalters. Die Abschaltzeit (Abb. 223) ist allerdings kein feststehender Wert, sondern abhängig von der Betriebsspannung, von der Art der Belastung, der Schnelligkeit des Stromanstieges und der AuslösestromEinstellung. Es können sehr kurze Abschaltzeiten von etwa 12 bis 14 ms als Eigenzeit und etwa 35 ms Gesamtschaltzeit (Zeit vom Beginn des Kurzschlusses bis zum Verlöschen des Lichtbogens) erreicht werden.

Der Netzschutz für Spannungen bis 500 V Gleichstrom oder Wechselstrom. Da hier keine größeren Freileitungen vorkommen, ist der Schutz gegen die Störungen aus den Verteilungsanlagen sehr einfach. Die abgehenden Stromkreise erhalten je nach ihrer Wertigkeit Sicherungen und Handschalter oder ebenfalls Selbstschalter mit unabhängiger Zeitauslösung oder auch mit Schnellauslösung. Auslösezeit und Auslösestrom müssen mit der Einstellung der Maschinenschalter in Übereinstimmung gebracht werden.

Das gilt auch für die Abstimmung der Sicherungskennlinien mit den Kennlinien der Maschinenselbstschalter.

In großen Gleichstrom- oder Niederspannungswechselstromnetzen erfolgt die Stromverteilung über Parallel- und Ringleitungen oder über starke Vermaschungen, oft auch aus mehreren Stromeinspeisestellen. Da dann fast ausnahmslos Kabel zur Verlegung kommen, treten Gefährdungen aus Kurzschlüssen und Erdschlüssen stark zurück. Es werden in den ersten Fällen nur Selbstschalter mit Zeitverzögerung in den Leitungsanfang eingebaut, die stromunabhängig oder mit Wärme-Auslösung arbeiten und nach der höchstzulässigen Belastung der zu schützenden Kabelquerschnitte eingestellt werden. Die Zwischenanschlüsse werden entweder nur mit Sicherungen oder ohne jeden Schutz ausgeführt.

Einer besonderen Beurteilung in der Verwendung von Sicherungsgeräten unterliegen die Kabelleitungen in Niederspannungs-

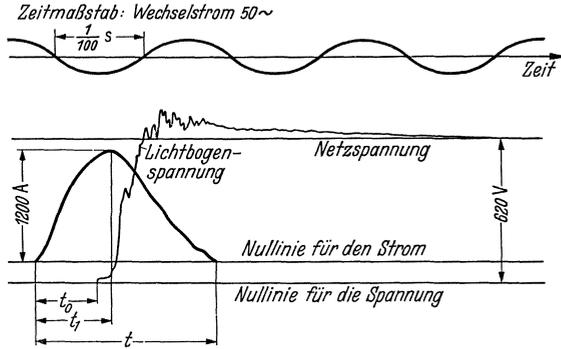


Abb. 222. Oszillographische Aufnahme des Ausschaltvorganges in einem Gleichstromkreis durch Schnellschalter.
 t_0 Eigenzeit, t_1 Schaltzeit vom Beginn des Stromanstieges bis zur Stromspitze, t Gesamtschaltzeit.

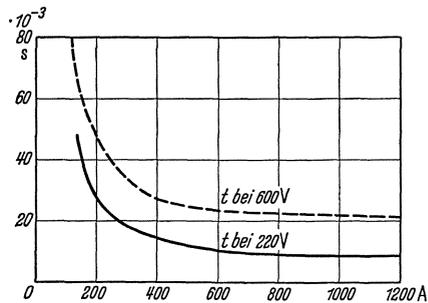


Abb. 223. Strom-Zeit-Kennlinien für einen Gleichstrom-Schnellschalter.

t Gesamtschaltzeit vom Beginn des Stromanstieges bis zum Erlöschen des Lichtbogens.

Maschennetzen¹ großer städtischer Stromverteilungsanlagen. Wenn mit Rücksicht auf die hier stark wechselnden Belastungsverhältnisse der einzelnen Maschen und die verschiedenen Leiterquerschnitte bzw. Kurzschlußwiderstände, sowie den damit verbundenen großen Schwierigkeiten der sicheren Fehlereingrenzung Sicherungsgeräte überhaupt eingebaut werden sollen, so werden neuerdings nur die Maschennetz-sicherungen benutzt, die in die Knotenpunkte des Maschennetzes gelegt werden. Selbstschalter können infolge ihrer Abmessungen in den Kabel-kästen nicht untergebracht werden. Kabelfehler z. B. durch schleichende Erdschlüsse, das sind Erdschlüsse vorübergehender und unvollständiger Art, sind mit diesen Sicherungen nicht zu erfassen. Der Betrieb steht bei Störungsursachen dieser Art oft vor einer unangenehmen Aufgabe hinsichtlich der schnellen Störungsbeseitigung. Die Abschaltung einer Kurzschlußstelle nach den dafür gestellten Bedingungen gelingt mit Sicherungen selten, namentlich wenn es sich um stark vermaschte Netze kleinerer Leistung mit wenigen Knotenpunkten handelt. Da auf das richtige Arbeiten der Sicherungen mit der betrieblich notwendigen Sicherheit also nicht in allen Fällen gerechnet werden kann, wird in großen Netzen schon seit mehreren Jahren auf den Einbau von Sicherungen in die Knotenpunkte ganz verzichtet. Zur Fehlererfassung und schnellsten Beseitigung der Fehlerstelle kommt dann das Verfahren des Selbstausbrennens des Kabelfehlers zur Anwendung, sofern der erforderliche Kurzschlußstrom aus den Maschinenanlagen zur Verfügung steht. Die Zeit für die Zerstörung der Fehlerstelle durch den Kurzschlußstrom muß mit der Auslösezeit der Netzschalter oder Netz-hauptsicherungen abgestimmt sein, damit diese nicht zur Auslösung kommen.

Eingehende Versuche haben ergeben, daß für satten Kurzschluß bei Strömen unter 2 kA nicht in allen Fällen mit einem einwandfreien Ausbrennen des Fehlers zu rechnen ist. Für 380 V Betriebsspannung liegt die obere Grenze bei etwa 18 kA Scheitelwert, während in Netzen mit 220 V praktisch alle Fehlerströme über 2 kA ein einwandfreies Ausbrennen gewährleisten. Die Bauform der Kabel ist ebenfalls bestimmend. Gürtelkabel mit Cu- und Al-Leitern erwiesen sich als praktisch gleichwertig. Einleiterkabel oder Dreibleimantelkabel eignen sich für das Ausbrennen besser, sind aber wesentlich teurer. Es müssen also Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit gemeinsam die Entscheidung treffen, welche Kabel für die Maschen zu wählen sind.

Gefahren für die Umgebung der im Erdboden liegenden Kabel sind nicht zu fürchten. Für im Freien liegende Kabelstrecken dagegen sind zum Schutz der Bedienung besondere Vorkehrungen erforderlich. Bei der Einführung in Gußkästen müssen die Kabel über die ganze offen-

¹ Besold, H., und Otto Müller: Neuerungen für den Betrieb von Drehstrom-Niederspannungs-Maschennetzen. ETZ 1930 Heft 27 S. 953.

Krohne, E. Dr.-Ing.: Betriebs- und Versuchsergebnisse mit den neuen Niederspannungs-Maschennetzen des Berliner Städtischen Elektrizitätswerks AG (Bewag). ETZ 1932 Heft 27 S. 645. v. Mangoldt, W., Dr.-Ing.: Das Ausbrennen von Fehlern in Netzen mit Aluminiumkabeln. VDE-Fachberichte 1937.

liegende Strecke durch Trennwände gegen den Bedienungsgang oder den Bedienungsraum abgedeckt werden, da Lichtbögen mit Längen von 1 bis 2 m auftreten können. Auch in den Gußkästen selbst müssen den Betriebsverhältnissen entsprechend Schutzvorrichtungen getroffen werden.

13. Die Beanspruchung der Anlageteile durch die Kurzschlußströme¹.

a) **Gleichstrom.** Kurzschluß in einer Gleichstromanlage hat wie bereits kurz erwähnt an den Stromerzeugern mit Selbsterregung ein so starkes Bürstenfeuer zur Folge, daß sie sofort abgeschaltet werden müssen, um der Gefahr zu begegnen, daß der Stromwender verbrennt und damit weiter Wicklungsschluß herbeigeführt wird. Unter ungünstigen Verhältnissen tritt auch Rundfeuer am Stromwender auf, das gleichbedeutend mit Maschinenkurzschluß ist und ebenfalls starke Zerstörungen an der Maschine verursachen kann. Infolgedessen ist äußerer Kurzschluß auch in Gleichstromnetzen unbedingt sofort abzuschalten. Das geschieht durch das Ansprechen der Sicherungen oder der Selbstschalter in kürzester Zeit. Letztere werden daher fast ausnahmslos sowohl für die Stromerzeuger als auch in den abgehenden Stromkreisen mit Schnellauslösung versehen.

Da die selbsterregte Nebenschlußmaschine im Kurzschluß ihre Spannung verliert, sind keine wesentlichen Wirkungen auf die Schaltanlagenteile, die Leitungen und Kabel zu befürchten. Die fremderregte Gleichstrommaschine dagegen muß vor jedem Kurzschluß ganz besonders durch Schnellschalter geschützt werden, sonst wird sie sofort zerstört.

Kurzschlußströme in Glasgleichrichteranlagen. Die hinsichtlich des Rückstrom-, Überstrom- und Kurzschlußschutzes in Glasgleichrichteranlagen zu treffenden Maßnahmen sind im Bd. I bereits eingehend erläutert. Für ungesteuerte Gleichrichter ist ein Rückstrom-Schnellschalter mit gemischt verzögerter Auslöseeigenschaft auf der Gleichstromseite vorzusehen, der bei bereits verhältnismäßig niedrigem Rückstrom den Gleichrichter vom Gleichstromnetz abschaltet; bei Lieferung ins Gleichstromnetz geschieht die Abschaltung erst bei hohem Überlast- bzw. Kurzschlußstrom. In Anlagen mit gittergesteuerten Gleichrichtern wird häufig die Gittersteuerung selbst zur unmittelbaren Löschung des Gleichrichters verwendet. Mittels eines vom Kurzschlußstrom gleich- oder drehstromseitig über Wandler beeinflussten, schnell ansprechenden Meßwerkes werden die Gitter gegenüber der Kathode negativ aufgeladen, so daß ein Neuzünden zwischen Kathode und den stromlosen Anoden verhindert ist, während die stromführende Anode lediglich bis zu ihrem natürlichen Erlöschen, d. h. bis zum Spannungs-Nulldurchgang weiterbrennt.

In beiden Fällen, Schutz durch Rückstrom-Schnellschalter und Schutz durch Beeinflussung der Gittersteuerung, beträgt die Zeit vom

¹ Besonders bearbeitet von Dipl.-Ing. Karl Heinz Kyser.

Eintritt des Kurzschlusses bis zum Abschalten bzw. Löschen des Gleichrichters etwa 10 bis 20 ms; der Kurzschlußstrom wird bereits während des Anstieges unterbrochen, so daß schädliche Überlastungen der Gleichrichtergefäße verhindert werden. Durch entsprechende Umgestaltung kann die Anordnung zur Löschung des Gleichrichters mittels Gittersteuerung auch für eine ein- oder mehrmalige, selbsttätige Wiedereinschaltung des Gleichrichters mit nachfolgender, selbsttätiger Wiederabschaltung bei Weiterbestehen des Kurzschlusses auf der Gleichstromseite verwendet werden.

Bei unmittelbarem Kurzschluß zwischen Kathoden- und Umspanner-Nullpunktsableitung ist die Größe des Kurzschlußstromes durch die Streublindwiderstände des Gleichrichterumspanners, den Lichtbogenwiderstand und u. U. die Blindwiderstände zwischengeschalteter Kathodendrosseln bestimmt. Auf die Änderungen, die gegenüber Nennbetrieb hinsichtlich Stromführungsdauer, Zündspannung und Anodenstromverlauf im Kurzschlußfall eintreten, kann an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden¹.

Die Berechnung der Kurzschlußströme in Glasgleichrichteranlagen wird in dem folgenden Beispiel für 2 Schaltungen des Gleichrichterumspanners erläutert.

10. Beispiel: Ein Gleichstromnetz wird von einem Sechshephasenglasgleichrichter mit 350 A und 750 V gespeist. Der Gleichrichterumspanner ist in Dreieck-Doppelstern geschaltet; die Kurzschlußspannung (für drei um einen Phasenwinkel von 120° versetzte unterspannungsseitige Wicklungen) beträgt 6,18 vH. Es ist der Kurzschlußstrom bei unmittelbarem Kurzschluß hinter dem Gleichrichter anzugeben.

Bei der gewählten Schaltung ergeben sich für die Strom- und Spannungsverhältnisse auf der Gleich- bzw. Wechselstromseite folgende Bezeichnungen (Bd. I S. 215):

$$\begin{aligned} \frac{i_e}{I_m} &= 0,409; & i_e &= 0,409 \cdot I_m \text{ A,} \\ \frac{u_e}{U_m} &= 0,740; & u_e &= 0,740 \cdot U_m \text{ V,} \\ u &= u_e \cdot \sqrt{2} \text{ V.} \end{aligned}$$

Es bedeuten:

i_e effektiver Mittelwert des Anodenstromes in A,

I_m arithmetischer Gleichstrom-Mittelwert in A,

u_e Effektivwert der Phasenspannung auf der Wechselstromseite in V,

u Höchstwert der Anodenspannung in V.

U_m arithmetischer Mittelwert der Spannung auf der Gleichstromseite in V.

Da in diesem Fall nur jeweils die Anode Strom führt, deren Spannung gegenüber dem Sternpunkt höher ist als die der anderen Phasen, ergibt sich der Blindwiderstand des Umspanners zu:

$$x_{Tfr} = \frac{e_k}{100} \cdot \frac{u_e}{i_e} = \frac{6,18}{100} \cdot \frac{750 \cdot 0,740}{350 \cdot 0,409} = 0,235 \text{ Ohm/Phase.}$$

Wird mit p die Phasenzahl bezeichnet, so wird der Kurzschlußstrom auf der Gleichstromseite $I_{K,gl}$ den Wert erreichen:

$$I_{K,gl} = p \cdot \frac{u_e \cdot \sqrt{2}}{x_{Tfr}} = 6 \cdot \frac{750 \cdot 0,740 \cdot \sqrt{2}}{0,235} \approx 20000 \text{ A.}$$

¹ Schilling, W., Dr.-Ing.: Die Gleichrichterschaltungen, ihre Berechnung und Arbeitsweise. München: Oldenburg 1938 und Berechnung von Kurzschlußströmen in Gleichrichterschaltungen. Elektrotechn. u. Maschinenb. 1938 Heft 49.

Der Lichtbogenwiderstand und der Wirkwiderstand des Umspanners sind dabei nicht berücksichtigt. Infolge dieser Widerstände kann im allgemeinen mit einer Verminderung des Kurzschlußstromes um etwa 5 vH gerechnet werden, so daß:

$$I_{K, \sigma t} = 20000 \cdot 0,95 = 19000 \text{ A.}$$

11. Beispiel: Für die gleichen Verhältnisse wie im 10. Beispiel angegeben ist der Kurzschlußstrom zu ermitteln, wenn ein Umspanner in Stern-Doppelsternschaltung mit Saugdrossel vorgesehen wird.

Durch die Saugdrossel wird der sechsphasige Stern in zwei dreiphasige Sterne aufgelöst; im Nennbetrieb führen stets zwei Anoden gleichzeitig Strom. In Abänderung zum 10. Beispiel gelten dann folgende Beziehungen:

$$\frac{i_e}{I_m} = 0,578; \quad i_e = 0,578 \cdot 350 = 202 \text{ A.}$$

Dieser Strom verteilt sich gleichmäßig auf zwei Anoden, so daß über eine Anode nur 101 A fließen. Es wird also:

$$\frac{i_e}{I_m} = \frac{0,578}{2} = 0,289$$

$$i_e = 0,289 \cdot 350 = 101 \text{ A;}$$

Entsprechend wird:

$$\frac{u_e}{U_m} = 0,855; \quad u_e = 0,855 \cdot 750 = 642 \text{ V}$$

und:

$$u = u_e \cdot \sqrt{2} = 642 \cdot \sqrt{2} = 908 \text{ V}$$

Der Blindwiderstand einer Wicklungshälfte beträgt:

$$x_{Tfr I} = \frac{6,18}{100} \cdot \frac{642}{101} = 0,397 \text{ Ohm/Phase.}$$

Infolge der Parallelschaltung beider Wicklungshälften geht der Widerstand herunter auf:

$$x_{Tfr} = 0,1985 \text{ Ohm/Phase.}$$

Für den Kurzschlußstrom ergibt sich:

$$I_{K, \sigma t} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{u_e \cdot \sqrt{2}}{x_{Tfr}} = \frac{3 \cdot 642 \cdot \sqrt{2}}{0,1985} \cdot 0,95 \cong 13000 \text{ A.}$$

b) Wechselstrom. Hier liegen die Verhältnisse wesentlich anders. Die Synchronmaschinen (Stromerzeuger und Motoren) und alle Maschinen gleicher Eigenart mit besonderer Gleichstromerregung behalten im Kurzschlußfall ihre volle Erregung, wenn vorausgesetzt wird, daß besondere Mittel zur Beeinflussung der Erregung im Kurzschlußfall nicht in Wirksamkeit treten sollen. Wie sich die Asynchronmaschinen verhalten, wird später erläutert werden.

Jeder Kurzschluß in einem von einer Synchronmaschine gespeisten Stromkreis bedeutet eine plötzliche Änderung des vor seinem Eintritt in der Maschine herrschenden elektromagnetischen Zustandes, die Ausgleichvorgänge zur Folge hat, bis ein neuer Endzustand eingetreten ist. Die aus diesen Ausgleichvorgängen bedingten Ströme überlagern sich dem Betriebsstrom. Der Verlauf des Ausgleichvorganges und die Höhe der Ausgleichströme sind von den Widerständen der Kurzschlußbahn, der Art des Kurzschlusses, dem elektrischen Aufbau des Stromerzeugers und der Dauer der Kurzschlußbelastung abhängig.

Wird an irgendeiner Stelle einer Anlage eine praktisch widerstandslose Verbindung zwischen zwei oder allen Phasen eines Stromkreises hergestellt, so wird die Anlage über diese Verbindung kurzgeschlossen und die Spannung bricht bis auf einen Restwert zusammen (Abb. 224 a). Sind die Stromerzeuger mit Schaltern versehen, deren

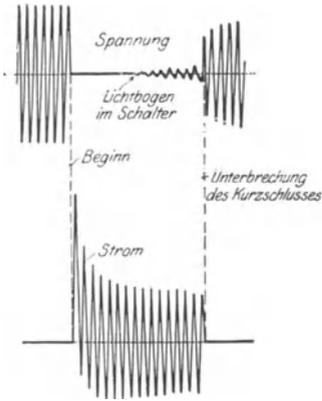


Abb. 224 a. Verlauf von Strom und Spannung bei einem Synchronstromerzeuger im Augenblick des Kurzschlusses.

Meßwerke verzögerte Auslösung haben, oder die trotz Schnellauslösung große Eigenschaltzeit besitzen (etwa 2 bis 3 s), dann fließt im Kurzschlußstromkreis nach Abklingen des Anfangs- oder Stoßkurzschlußstromes (Abb. 224 b) der Dauerkurzschlußstrom, der infolge der zusammengebrochenen Spannung den Betrieb der Anlage in den meisten Fällen teilweise oder ganz unmöglich macht, und der weiter unter Umständen eine so starke Erwärmung der Maschinen-, Umspanner- und Gerätewicklungen, der Leiter, Kabel usw. zur Folge hat, daß diese zerstört werden. Es müssen also

einerseits die Geräte wenigstens vorübergehend d. h. bis zum Unter-

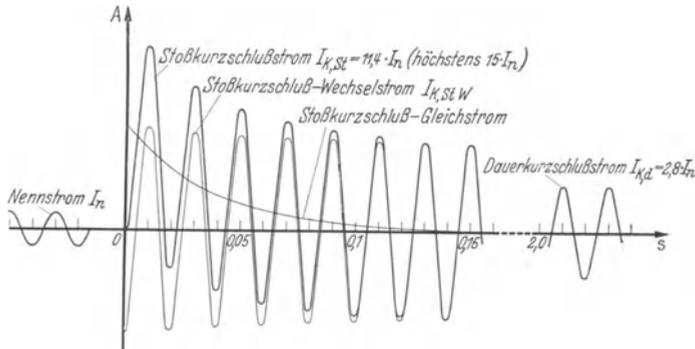


Abb. 224 b. Zeitlicher Verlauf des Stoßkurzschlußstromes.

brechen des Kurzschlusses z. B. durch den Schalter im Kraftwerk den Kurzschlußstrom aushalten können, andererseits die Leistungsschalter imstande sein, den Kurzschluß nicht nur zu unterbrechen, sondern beim erneuten Einschalten auf noch bestehenden Kurzschluß sicher und gefahrlos zu arbeiten, schließlich die Schaltanlage den Wärmebeanspruchungen, sowie den magnetischen Anziehungs- bzw. Abstößungskräften kurzschlußstromführender Leiter (Sammelschienen, Verbindungsleitungen) sicher standhalten. Solchen Beanspruchungen sind ferner unterworfen alle Stromwandler, Trennschalter, Kabelendverschlüsse. Diese Bedingungen gelten nicht nur für neu zu erbauende Kraftwerke, sondern sie müssen unbedingt

auch bei der Erweiterung bestehender Anlagen erfüllt sein und zwar nicht allein für die neuen Einrichtungen, sondern auch für die bereits vorhandenen. Wird namentlich letzteres nicht scharf beachtet, so kann der Fall eintreten, daß die alten Schaltgeräte infolge des durch die gesteigerte Kraftwerksleistung wesentlich erhöhten Kurzschlußstromes bei Störungen im alten Teil der Anlage nicht imstande sind, der neuen Kurzschlußstrombeanspruchung zu widerstehen. Außerordentliche Gefährdungen der gesamten Schaltanlage durch Schalterzerknall, Verbrennen von Wandlern, Bruch von Isolatoren, erneuter Kurzschluß und weiter Gefährdung der Stromerzeuger — auch der Bedienung — Abschmoren von Kabeln und ähnliches sind die Folge (Abb. 469).

Soll der Parallelbetrieb mehrerer Werke untereinander aufgenommen werden, so sind die Untersuchungen über die Kurzschlußströme ebenfalls vorher anzustellen insbesondere für kleine Werke, wenn letztere stromliefernd an große Netze angeschlossen werden. Das gleiche gilt für alle Umspanner- und Umformeranlagen.

Ganz besonders ist darauf hinzuweisen, daß die Kurzschlußströme, die bei Schwachlastbetrieb der Anlagen (Nacht und Feiertag) auftreten, ebenfalls errechnet werden, da wie später bei der Besprechung der Meßwerke der Leistungsschalter besonders behandelt diese Meßwerke unter Umständen ihre Anregung im Kurzschlußfall verlieren und versagen, so daß eine Auslösung der Schalter unterbleibt¹.

Bei einem metallischen Kurzschluß bricht die Spannung an der Kurzschlußstelle bis auf den Wert Null zusammen (satter Kurzschluß, Abb. 224 a). Erfolgt der Kurzschluß über einem stehenbleibenden Lichtbogen (Lichtbogenkurzschluß), so ist die Spannungshöhe durch den Lichtbogenwiderstand gegeben.

Wenn oben gesagt wurde, daß von den Schaltern der Dauerkurzschlußstrom zu unterbrechen ist, so trifft das heute für große vermaschte Hochspannungsnetze mit mehrfacher Speisung im Verbundbetrieb nicht mehr an allen Stellen zu. Wie schon mehrfach darauf hingewiesen muß eine Fehlerstelle, zu der in erster Linie eine Kurzschlußstelle gehört, allerschnellstens abgeschaltet werden, um den übrigen Netzbetrieb so wenig als möglich zu stören. Da beim Eintritt des Kurzschlusses alle Stromerzeuger sofort auf diese widerstandslose Stelle des Netzes arbeiten und in ihren Spannungsverhältnissen nur durch die Widerstände der Kurzschlußbahnen bestimmt sind, können an der Abschaltung mehrere Schalter beteiligt sein. Diese Hauptnetzschalter, über deren Arbeiten im 15. Kap. gesprochen wird, sind heute mit Meßwerken ausgestattet, die einschließlich der Eigenschaltzeit und der Löszeit der Schalter selbst eine Ansprechzeit von etwa 0,3 bis 0,5 s und darunter erreichen. Nach Abb. 224 b klingt der Stoßkurzschlußstrom eines Drehstromerzeugers nach etwa 0,1 s auf den Stoßkurzschluß-Wechselstrom ab. Der Schalter hat also den allerdings bereits abgesunkenen Stoßkurzschlußstrom zu unterbrechen, worauf noch eingegangen werden wird.

¹ Schleicher, Dr.-Ing. M.: Die moderne Selektivschutztechnik und die Methoden zur Fehlerfeststellung in Hochspannungsanlagen. Berlin: Julius Springer 1936.

Je nachdem der Isolationsdurchbruch zwischen zwei oder drei Phasen eines Stromkreises erfolgt, unterscheidet man zwischen zwei- und dreiphasigen Kurzschlüssen (Abb. 225). Ist der Sternpunkt unmittelbar oder über Blindwiderstände geringer Ohmzahl geerdet, so führt der einfache Erdschluß zum einpoligen Kurzschluß. Da derartige Netze in Deutschland nur von geringer Bedeutung sind, wird diese Kurzschlußart nicht näher behandelt.

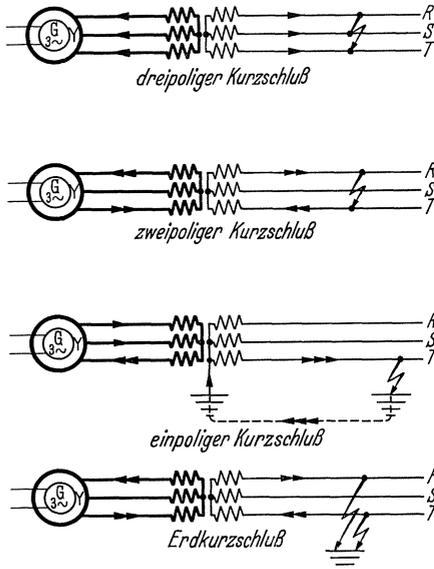


Abb. 225. Die verschiedenen Kurzschlußarten.

schluß im Scheitelpunkt der Spannung eintritt.

Das Abklingen des Stoßkurzschluß-Wechselstromes nimmt je nach der Maschinen- und Kurzschlußart etwa 1 bis 3 s in Anspruch. In dieser Zeit verringert sich das ursprünglich bestehende magnetische Feld der Maschine derart, daß nach Beendigung des Ausgleichvorganges im Ständer der Synchronmaschine der Dauerkurzschlußstrom fließt, während die Asynchronmaschine stromlos geworden ist². Hierbei hängt die Ge-

¹ Durch den Ausgleichstrom in der Ständerwicklung der Synchronmaschine bzw. durch dessen Feld wird im Ständer ein in wenigen Halbwellen abklingender Gleichstrom (Gleichstromglied) erzeugt; letzterer hat zur Folge, daß der Ständer-Stoßkurzschlußstrom zu Beginn des Kurzschlusses unsymmetrisch zur Stromnullinie verläuft. Im Läufer wird ein Wechselstrom hervorgerufen.

Durch den Ausgleichstrom in der Erregerwicklung bzw. dessen Feld wird im Ständer ein Wechselstrom erzeugt (Stoßkurzschluß-Wechselstrom). Im Läufer selbst tritt ein gleichstromartig verlöschender Überstrom auf.

² Biermanns, J.: Überströme in Hochspannungsanlagen. Berlin: Julius Springer 1926. Jacottet, P., u. Ollendorff: Praktische Berechnungsmethoden für den Stoßkurzschlußstrom von Drehfeldmaschinen. ETZ 1929. Koch, W.: Die Berechnung des Stoßkurzschlußstromes in Netzen mit Leitungswiderstand. Siemens-Z. 1936 Heft 1.

Nach den VDE-Bestimmungen ist:

Stoßkurzschlußstrom der höchste Augenblickswert des Stromes nach Eintritt des Kurzschlusses. Er besteht aus dem Stoßkurzschluß-Wechselstrom und dem Stoßkurzschluß-Gleichstrom und wird als Scheitelwert angegeben (Abb. 224 b).

Stoßkurzschluß-Wechselstrom ist der Wechselstromanteil des Stoßkurzschlußstromes; er wird als Effektivwert angegeben.

Dauerkurzschlußstrom ist der Wechselstrom, der nach Abklingen des Stoßkurzschlußstromes und nach Beendigung des Regelvorganges der Stromerzeuger bestehen bleibt. Er wird als Effektivwert angegeben¹.

Die Größe des Gleichstromgliedes hängt vom Schalt Augenblick ab. Am größten wird der Wert, wenn der Kurzschluß im Augenblick des Durchganges der Spannung durch den Nullpunkt erfolgt und Null, wenn der Kurz-

schwindigkeit, mit der der Stoßkurzschluß-Wechselstrom abklingt, hauptsächlich von dem Zeitfestwert der mit dem magnetischen Feld verketteten Erregerwicklung ab, während für die Dauer des Stoßkurzschluß-Gleichstromes, etwa $\frac{1}{10}$ s, vornehmlich der Zeitfestwert der Ständerwicklung maßgebend ist. Das Gleichstromglied kann zwar die Größe des Wechselstromgliedes erreichen, erhöht dieses aber praktisch nur um etwa 80 vH, was auf die zeitliche Dämpfung der durch das Wechselstromglied gegebenen

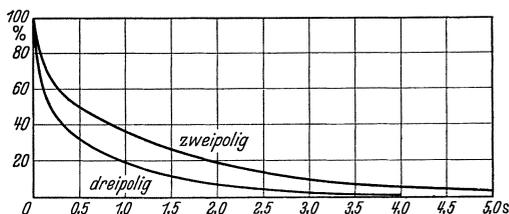


Abb. 226. Verlauf des Scheitelwertes des Stoßkurzschluß-Wechselstromes bei großen Turbokstromerzeugern.

Stromstärke zurückzuführen ist. Halten sich die vom noch verbleibenden magnetischen Feld in der Ständerwicklung induzierte Spannung und der durch die Scheinwiderstände des Kurzschlußstromkreises hervorgerufene Spannungsabfall das

Gleichgewicht, ist der Ausgleichvorgang beendet. Der dann noch fließende Dauerkurzschlußstrom bleibt so lange bestehen, bis die Leistungsschalter abschalten. Die Zeit, die der Stoßkurzschluß-Wechselstrom benötigt, um vollständig in den Dauerkurzschlußstrom überzugehen, ist beim zweipoligen Kurzschluß infolge der kleineren Anker rückwirkung größer als beim dreipoligen Kurzschluß. Abb. 226 und 227 zeigen

die mittleren Abklingkennlinien nach REH für drei- und zweipoligen Klemmenkurzschluß bei großen Turbokstromerzeugern und Schenkelpolmaschinen. Der Stoßkurzschluß-Wechselstrom nimmt infolge des Einflusses der Wirbelströme im Läufer anfangs schneller als exponential ab.

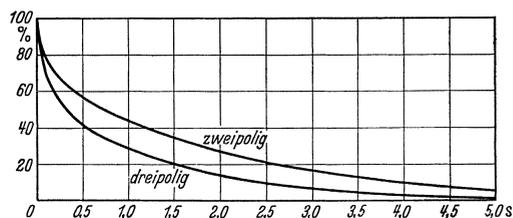


Abb. 227. Verlauf des Scheitelwertes des Stoßkurzschluß-Wechselstromes bei großen Schenkelpolstromerzeugern.

Zur Ermittlung des an irgendeiner Stelle eines Netzes auftretenden Kurzschlußstromes sind als speisende Maschinen anzusehen:

1. für den Stoßkurzschlußstrom:
 - alle Synchronstromerzeuger und Synchronmotoren,
 - alle Einankerumformer
 - und Asynchronmotoren.

Im Fall eines Klemmenkurzschlusses oder bei unmittelbarer Speisung einer Kurzschlußstelle in der Nähe der Kraftwerksammelschienen nimmt bei voll erregten neuzeitlichen Turbo- und Schenkelpolmaschinen der Stoßkurzschlußstrom etwa den 15fachen Wert des Scheitelwertes bzw. das 21fache des Effektivwertes des Nennstromes an, sofern die Ständerstreuspannung 12 vH der Nennspannung beträgt. Bei Maschinen, deren Ständerstreuung größer ist, fällt der Stoßkurzschlußstrom

kleiner aus. Sind alte Maschinen in der Anlage aufgestellt, so liegt die Ständerstreuspannung dieser oftmals wesentlich unter 12 vH. Bei diesen harten Maschinen kann der Stoßkurzschlußstrom bis zum 40fachen des Nennstromscheidenwertes ansteigen.

2. für den Dauerkurzschlußstrom:

alle Synchronstromerzeuger,

Synchronmotoren und Einankerumformer nur, wenn sie weiter angetrieben werden.

Die Frage, welche Motoren bei Berechnung des Stoßkurzschlußstromes als Stromerzeuger anzusehen sind, ist in den REH wie folgt festgelegt:

... Nur bei Abnehmeranlagen, in denen eine Belastung durch Motoren mit einer Einzelleistung in der Größenordnung der Durchgangsleistung der speisenden Umspanner vorhanden ist, sind diese Motoren für die Berechnung der Stoßkurzschlußströme wie Stromerzeuger zu behandeln.

c) Die Berechnung des Abschalt- und des Stoßkurzschlußstromes an der Kurzschlußstelle (Überschlagsrechnung)¹. Die Ermittlung der Kurzschlußströme wird mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes durchgeführt. Für die Kurzschlußbeanspruchung ist je nach den Verhältnissen der Stoßkurzschlußstrom, der Kurzschlußabschaltstrom oder der Dauerkurzschlußstrom zu beachten. Der Stoßkurzschlußstrom ist für die dynamische Beanspruchung, der Dauerkurzschlußstrom für die thermische Beanspruchung der Schaltanlageile von ausschlaggebender Bedeutung. Der Kurzschlußabschaltstrom dient zur Feststellung der erforderlichen Abschaltleistung.

In Abb. 228 ist der einfache Fall gezeichnet, in welchem das Netz *A* von den Stromerzeugern *G*₁ und *G*₂ über die Umspanner *T*/*r*₁, *T*/*r*₂ und die Fernleitung *l* gespeist wird. In der mit einer Strombegrenzungsdrosselspule *D**r* geschützten Leitung dieses Netzes soll ein dreipoliger oder zweipoliger Kurzschluß auftreten. Vorausgesetzt wird feste Spannung des Kraftwerkes, also Aufrechterhaltung der vollen Betriebserregung oder praktisch unendlich große Leistung. Der genauere Rechnungsgang wird auf S. 268ff. behandelt.

Ganz allgemein gilt dann:

für den dreipoligen Kurzschluß:

$$I_{K_3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_g^2 + X_g^2}} \text{ kA}, \quad (111 \text{ a})$$

für den zweipoligen Kurzschluß:

$$I_{K_2} = \frac{U}{2 \cdot \sqrt{R_g^2 + X_g^2}} \text{ kA}, \quad (111 \text{ b})$$

worin:

U die Betriebsspannung = Nennspannung des Netzes in kV,

*R*_g den gesamten Wirkwiderstand der Kurzschlußbahn in Ohm/Phase,

*X*_g den gesamten induktiven Blindwiderstand der Kurzschlußbahn in Ohm/Phase

bezeichnet.

¹ Kyser, K. H.: Die Berechnung der Kurzschlußabschaltleistung und des Einschaltstromes mit Hilfe der prozentualen Spannungsabfälle. Siemens-Zeitschrift 1939 Heft 11.

Für Abb. 228 ist:

$$R_g = r_G + r_{Tfr_1} + r_l + r_{Tfr_2} + r_{Dr} \text{ Ohm/Phase,} \quad (112)$$

$$X_g = x_G + x_{Tfr_1} + x_l + x_{Tfr_2} + x_{Dr} \text{ Ohm/Phase.} \quad (113)$$

Da bei Vollast die Maschinenspannung zumeist um etwa 10 vH höher liegt als die Nennspannung des Netzes, wird entsprechend den REH

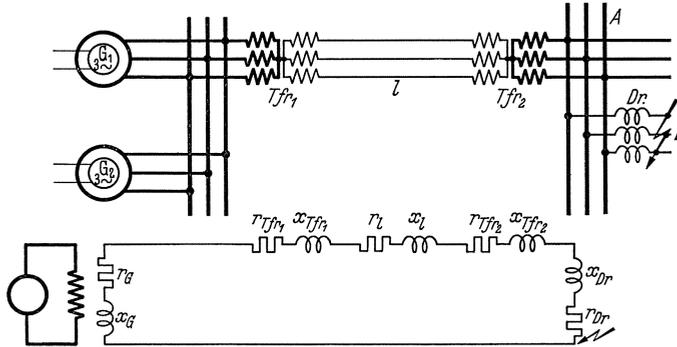


Abb. 228. Netzschaltbild und widerstandsgetreues Ersatzschaltbild für eine Kurzschlußberechnung.

mit der 1,05fachen Nennspannung des Stromerzeugers U_n gerechnet, also mit $1,10 \cdot$ Netzspannung, so daß die Gl. (111a) und (111 b) übergehen in:

$$I_{K_3} \cong I_{K,a} \cong I_{K,stW} = \frac{1,05 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_g^2 + X_g^2}} = \frac{1,1 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_g^2 + X_g^2}} \text{ kA,} \quad (114a)$$

$$I_{K_2} \cong I_{K,a} \cong I_{K,stW} = \frac{1,05 \cdot U_n}{2 \cdot \sqrt{R_g^2 + X_g^2}} = \frac{1,1 \cdot U}{2 \cdot \sqrt{R_g^2 + X_g^2}} \text{ kA,} \quad (114b)$$

worin: U_n die Nennspannung des Stromerzeugers ($= 1,05 \cdot U$) kV,

$I_{K,a}$ Kurzschlußabschaltstrom in kA,

$I_{K,stW}$ Stoßkurzschluß-Wechselstrom in kA bedeuten.

Tritt der Kurzschluß unmittelbar hinter dem Umspanner auf dessen Unterspannungsseite, oder hinter einer Drosselspule ein, so kann für den dreipoligen Kurzschluß bei überschlägigen Berechnungen unter Voraussetzung starrer Spannung $I_{K,a}$ wiederum ungefähr gleich $I_{K,stW}$ gesetzt werden.

Es ist dann:

$$I_{K_3} \cong I_{K,a} \cong I_{K,stW} \cong \frac{100 \cdot I_{n_2}}{e_k} \text{ kA} \quad (114c)$$

bzw.
$$I_{K_3} \cong I_{K,a} \cong I_{K,stW} = \frac{100 \cdot I_{Dr}}{e_{Dr}} \text{ kA.} \quad (114d)$$

e_k Kurzschlußspannung des Umspanners in vH der Nennspannung,
 e_{Dr} induktiver Spannungsabfall der Drosselspule in vH der Nennspannung,

I_{n_2} Nennstrom des Umspanners auf der Unterspannungsseite in kA,

I_{Dr} Nennstrom der Drosselspule in kA.

Aus den Gl. (111) bis (114) folgt, daß bei diesen Verhältnissen der dreipolige Kurzschlußstrom um etwa 16,5 vH größer als der Kurzschlußstrom beim zweipoligen Kurzschluß ist. Das ist darauf zurückzuführen, daß Ankerrückwirkung und Maschinenerregung unberücksichtigt bleiben. In Netzen mit nicht starrer Spannung tritt zumeist der umgekehrte Fall ein (17. Beispiel).

Den höchstmöglichen Kurzschlußstrom, den Stoßkurzschlußstrom, erhält man für solche überschlägigen Rechnungen aus:

$$I_{K,St} = 2,5 \cdot I_{K,StW} \text{ kA.} \quad (114e)$$

Arbeiten mehrere Stromerzeuger im Kraftwerk auf den Kurzschluß, so werden diese Maschinen durch eine Ersatzmaschine ersetzt, die die Summenleistung aller Einzelmaschinen besitzt. Es ist dann für die gesamten Widerstände z. B. für den gesamten induktiven Blindwiderstand x_G der entsprechende Wert parallelgeschalteter Widerstände zu setzen, der für zwei Maschinen beträgt:

$$x_G'' = \frac{x_{G_1} \cdot x_{G_2}}{x_{G_1} + x_{G_2}} \text{ Ohm/Phase.} \quad (115)$$

Über die Berechnung zusammengesetzter Widerstände werden später Angaben gemacht.

Bevor zur genaueren Berechnung dieser Kurzschlußströme übergegangen wird, sollen zunächst die Widerstände der Kurzschlußbahn festgestellt werden.

d) Die Widerstände der Maschinen und Leitungsanlagen. Der Wirkwiderstand r_G der Stromerzeugerwicklung kann bei Ermittlung des Dauerkurzschlußstromes zumeist vernachlässigt werden, da er gegenüber dem Blindwiderstand sehr klein ist. Nur bei Berechnung des Stoßkurzschlußstromes wird r_G berücksichtigt und beträgt dann:

etwa $r_G = 0,07 \cdot x_s$ Ohm/Phase für Schenkelpolmaschinen ohne Dämpferwicklung,

und $= 0,07 \cdot x_{s-b}$ Ohm/Phase für Turbostromerzeuger und Schenkelpolmaschinen mit Dämpferwicklung.

Der induktive Blindwiderstand der Maschine x_G setzt sich, je nachdem ob der Stoßkurzschluß-Wechselstrom oder der Dauerkurzschlußstrom errechnet werden soll, wobei auch die Maschinenspannung selbst zu berücksichtigen ist, aus folgenden Werten zusammen:

a) Turbostromerzeugern und Schenkelpolmaschinen mit Dämpferwicklung:

$$I_{K,StW} \dots x_G = x_{s-b} \text{ Ohm/Phase,}$$

$$I_{K,d} \dots x_G = x_s + x_a \text{ Ohm/Phase.}$$

b) Schenkelpolmaschinen ohne Dämpferwicklung:

$$I_{K,StW} \dots x_G = x_s \text{ Ohm/Phase,}$$

$$I_{K,d} \dots x_G = x_s + x_a \text{ Ohm/Phase.}$$

Hierin bedeuten:

- x_a Ständer-Rückwirkungsblindwiderstand in Ohm/Phase,
- x_s Ständer-Streublindwiderstand bei eingefahrenem Läufer in Ohm/Phase,
- x_{s-b} Ständer-Streublindwiderstand bei ausgefahrenem Läufer d. h. ausschließlich Bohrungs-Streublindwiderstand (Stoßstreublindwiderstand) in Ohm/Phase.

Bei Ermittlung des Stoßkurzschlußstromes wird die Ständer-Rückwirkung nicht berücksichtigt, da der abschwächende Einfluß des Ständerfeldes infolge der magnetischen Trägheit auf das Erregerfeld nicht schnell genug zur Auswirkung kommt.

Es ist:

$$x_s = \frac{E_s \cdot U_n}{I_n \cdot \sqrt{3}} = \frac{E_s \cdot U_n^2}{100 \cdot N_n} \text{ Ohm/Phase,} \quad (116)$$

$$x_{s-b} = \frac{(E_s - E_b) \cdot U_n^2}{100 \cdot N_n} \text{ Ohm/Phase} \quad (117)$$

und $x_G = x_a + x_s = X_s = \frac{1}{I_{K, d_0}/I_n} \cdot \frac{U_n^2}{N_n} \text{ Ohm/Phase,} \quad (118)$

worin:

- U_n die Nennspannung der Maschine in kV,
- E_s die gesamte Streuspannung oder den induktiven Spannungsabfall in vH der Maschinenspannung,
- E_b die Bohrungsstreuungspannung in vH der Maschinenspannung,
- $E_s - E_b$ die Ständerstreuungspannung (Stoßstreuungspannung) in vH der Maschinenspannung in kV,
- N_n die Nennleistung in MVA,
- I_n den Nennstrom in kA,
- I_{K, d_0} den Dauerkurzschlußstrom bei Leerläuferregung in kA

bezeichnet.

Sind die genauen Werte für die Streuungen der Maschinen nicht gegeben, so können (S. 181) mit hinreichender Genauigkeit für neuzeitige Stromerzeuger angenommen werden:

- $E_s = 20$ bis 24 vH,
- $E_s - E_b = 12$ bis 15 vH,
- $I_{K, d_0}/I_n = m_0$ für Turbostromerzeuger = $0,7$,
- $I_{K, d_0}/I_n = m_0$ für Schenkelpolmaschinen = $0,8$,
- m_0 Kurzschlußverhältnis bei Leerlauf.

Bei Ermittlung der Widerstände eines Drehstromumspanners geht man von der Kurzschlußspannung aus. Es ist:

$$e_k = \sqrt{e_r^2 + e_s^2} \text{ vH} \quad (119)$$

- e_r Wirkspannungsabfall in vH der Nennspannung (Wicklungsverluste),
- e_s Streuspannung in vH der Nennspannung (induktiver Spannungsabfall).

Da bei großen Umspannern der Wirkspannungsabfall wiederum vernachlässigbar klein ist, wird der induktive Blindwiderstand unmittelbar aus der Kurzschlußspannung errechnet nach der Gl. (120):

$$x_{Tfr} = \frac{e_k \cdot U_n^2}{100 \cdot N_{Tfr}} = \frac{e_k \cdot U_n}{100 \cdot I_n \cdot \sqrt{3}} \text{ Ohm/Phase,} \quad (120)$$

N_{Tfr} Nennleistung des Umspanners in MVA.

Aus Abb. 229 sind die Werte für x_{Tfr} zu ersehen.

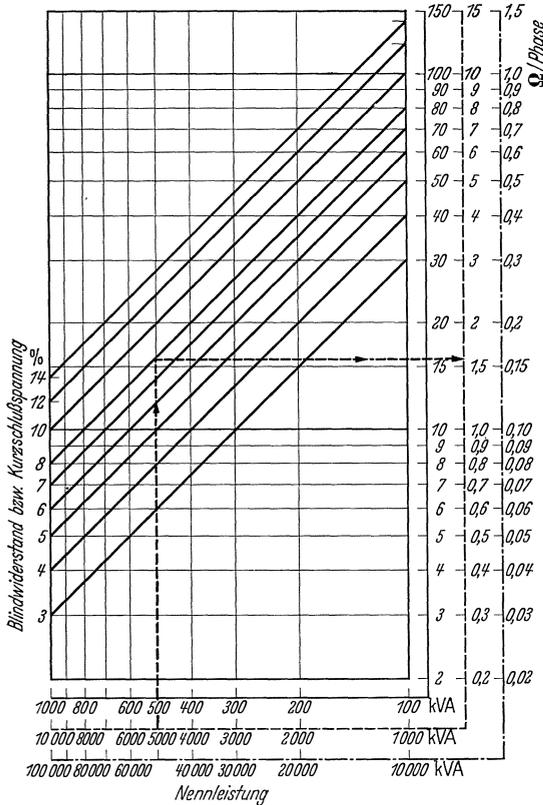


Abb. 229. Blindwiderstände x_2 (Ohm/Phase) von Umspannern und Drosselpulen bezogen auf 10 kV (U_{n2}). Für höhere Spannungen (U_{n1}) gilt:

$$x_1 = x_2 \frac{U_{n1}}{100} \text{ Ohm/Phase,}$$

$$(1 \text{ kVA} = \frac{1}{1000} \text{ MVA}).$$

Ist die Kurzschlußspannung nicht gegeben, so können bei neuzeitlichen Umspannern folgende Richtwerte für überschlägige Berechnungen gewählt werden:

Zahlentafel 17. Kurzschlußspannung in vH für Drehstromumspanner.

Nennspannung kV	Kurzschlußspannung vH
10 ÷ 30	4 ÷ 7
45 ÷ 60	6 ÷ 8
60 ÷ 100	8 ÷ 10
100 ÷ 200	11 ÷ 13

Die unteren Grenzwerte gelten für mittlere Leistungen, die oberen Grenzwerte für große Leistungen.

Der Wirkwiderstand eines Umspanners wird aus folgender Beziehung bestimmt:

$$r_{Tfr} = \frac{e_r \cdot U_n^2}{100 \cdot N_{Tfr}}$$

$$= \frac{e_r \cdot U_n}{100 \cdot I_n \cdot \sqrt{3}} \text{ Ohm/Phase.} \quad (121)$$

Sind die Wicklungsverluste V_{Cu} in kW gegeben, so ist e_r :

$$e_r = \frac{V_{Cu} \cdot 100}{N_{Tfr} \cdot 10^3} \text{ vH.} \quad (122)$$

Für e_r gelten allgemein folgende Richtwerte (Zahlentafel 18):

Sind die Umspanner mit Regeleinrichtung versehen, so ist bei Bestimmung von e_k die Stufenstellung zu beachten, da je nach den Verhältnissen die tatsächlich auftretende Kurzschlußspannung kleiner oder größer als bei Nennbetrieb sein kann.

Kommen Zusatzregler in Sparschaltung zur Aufstellung, so läßt sich deren e_k falls nicht angegeben näherungsweise ermitteln. Man setzt die Eigenleistung des Umspanners in Sparschaltung gleich der Leistung eines gewöhnlichen Umspanners, wählt dessen e_k nach den angegebenen Richtwerten und vervielfältigt letztere mit dem Verhältnis: Eigen- zu Durchgangsleistung des Sparumspanners. Man erhält so $e_{k,sp}$ in vH, da:

$$e_{k,sp} = e_k \cdot \frac{N_{E,sp}}{N_{DI,sp}} = e_k \cdot \frac{U_{n_2} \cdot [I_{n_2} - I_{n_1}]}{U_{n_2} \cdot I_{n_2}} \text{ vH}, \quad (123)$$

U_{n_2} Nennspannung auf der Unterspannungsseite in kV,

I_{n_1}, I_{n_2} Ströme auf der Ober- bzw. Unterspannungsseite in kA,

$U_{n_2} \cdot (I_{n_2} - I_{n_1}) \cdot \sqrt{3} = N_{E,sp}$ Eigenleistung des Sparumspanners in MVA,

$U_{n_2} \cdot I_{n_2} \cdot \sqrt{3} = N_{DI,sp}$ Durchgangsleistung des Sparumspanners in MVA.

12. Beispiel: Gegeben sei ein Zusatzregler mit folgenden Daten:

Durchgangsleistung $N_{DI,sp}$: 100 MVA,
Nennspannung U_{n_1} : 110 kV \pm 11 vH.

Gesucht: Kurzschlußspannung $e_{k,sp}$ bei dem Übersetzungsverhältnis 122 zu 110 kV (Abb. 230).

Es beträgt:

$$I_{n_1} = \frac{N_{DI,sp}}{U_{n_1} \cdot \sqrt{3}} = \frac{100}{122 \cdot \sqrt{3}} = 0,474 \text{ kA},$$

$$I_{n_2} = \frac{N_{DI,sp}}{U_{n_2} \cdot \sqrt{3}} = \frac{100}{110 \cdot \sqrt{3}} = 0,5255 \text{ kA}.$$

Somit ergibt sich die in Abb. 230 eingezeichnete Stromverteilung. Es ist ferner:

$$e_{k,sp} = e_k \cdot \frac{U_{n_2} [I_{n_2} - I_{n_1}]}{U_{n_2} \cdot I_{n_2}} \text{ vH}.$$

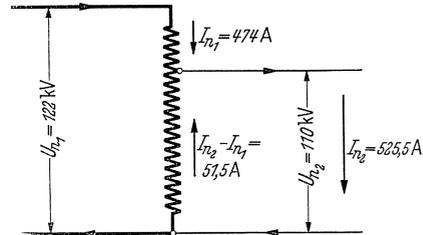


Abb. 230. Stromverteilung beim Sparumspanner (in Amp. eingetragen).

e_k wird entsprechend den Richtwerten zu 10 vH gewählt, somit:

$$e_{k,sp} = 10 \cdot \frac{110 \cdot 0,0515}{110 \cdot 0,05255} = 10 \cdot 0,0985 = 0,985 \text{ vH}.$$

Der induktive Blindwiderstand beträgt:

$$\begin{aligned} x_{Tr,sp} &= \frac{e_{k,sp} \cdot U_{n_2}^2}{100 \cdot N_{DI,sp}} \text{ Ohm/Phase} \\ &= \frac{0,985 \cdot 110^2}{10000} = 1,19 \text{ Ohm/Phase.} \end{aligned}$$

Vielfach werden auch Dreiwicklungsumspanner zu berücksichtigen sein. Je nach der Wicklungsanordnung kann eine wesentliche Begrenzung der Kurzschlußströme infolge hoher Drosselwirkung zwischen der am Kern liegenden und der äußersten Wicklung erreicht werden. Bei der in Abb. 231 gewählten Spulenordnung — speisende Wicklung

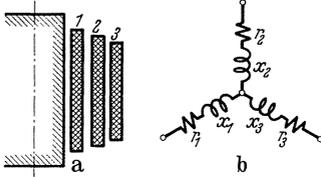


Abb. 231. Dreiwicklungsumspanner. a Spulenordnung, b Ersatzschaltung durch Widerstandsstern.

in der Mitte — kann die Streuung zwischen den Spulen 1 und 3 im günstigsten Fall die Summe der Streuungen 1 bis 2 plus 2 bis 3 betragen, gleiche Bezugsleistung vorausgesetzt.

Es läßt sich für den Dreiwicklungsumspanner eine Ersatzschaltung ableiten, bei der die drei Wicklungen durch drei in einem Sternpunkt zusammengefaßte Scheinwiderstände dargestellt werden¹. Dieser Widerstandsstern ist dann in das zu berechnende

Netz einzuführen, wobei wie bisher die Annahme gemacht wird, daß e_r vernachlässigbar klein ist, so daß x_{Tfr} aus der Kurzschlußspannung zu errechnen ist. Allgemein gelten folgende Beziehungen:

$$\left. \begin{aligned} x_{Tfr, 1} &= \frac{x_{Tfr 12} + x_{Tfr 13} - x_{Tfr 23}}{2} \text{ Ohm/Phase,} \\ x_{Tfr, 2} &= \frac{x_{Tfr 12} + x_{Tfr 23} - x_{Tfr 13}}{2} \text{ Ohm/Phase,} \\ x_{Tfr, 3} &= \frac{x_{Tfr 23} + x_{Tfr 13} - x_{Tfr 12}}{2} \text{ Ohm/Phase,} \end{aligned} \right\} \quad (124)$$

und:

$$\left. \begin{aligned} x_{Tfr, 12} &= \frac{e_{k 12} \cdot U_n^2}{100 \cdot N_{Tfr}} \text{ Ohm/Phase,} \\ x_{Tfr, 13} &= \frac{e_{k 13} \cdot U_n^2}{100 \cdot N_{Tfr}} \text{ Ohm/Phase,} \\ x_{Tfr, 23} &= \frac{e_{k 23} \cdot U_n^2}{100 \cdot N_{Tfr}} \text{ Ohm/Phase.} \end{aligned} \right\} \quad (125)$$

13. Beispiel: Gegeben ein Dreiwicklungsumspanner mit folgenden Werten
 Übersetzungsverhältnis: 220/110/10 kV
 Schaltung: Stern/Stern/Dreieck

Übersetzung	Leistung	Kurzschlußspannung
kV	MVA	vH
220/110	100	12,5
220/10	33	6,9
110/10	33	10,8

Spulenordnung nach Abb. 231, d. h.:

- 10 kV Wicklung (1) am Kern,
- 220 kV „ (2) in der Mitte als speisende Wicklung,
- 110 kV „ (3) außen.

¹ Petersen, W.: Ersatzschaltbilder für Transformatoren. Forschung u. Technik 1930. Richter: Elektrische Maschinen III. Berlin: Julius Springer 1932.

Gleiche Bezugsleistung vorausgesetzt (100 MVA) ergibt sich für:

$$e_{k\ 23} + e_{k\ 12} \cdot \frac{100}{33} \cong e_{k\ 13} \cdot \frac{100}{33} \text{ vH,}$$

$$12,5 + 6,9 \cdot \frac{100}{33} \cong 10,8 \cdot \frac{100}{33} \text{ vH,}$$

$$33,5 \cong 32,7 \text{ vH.}$$

Ferner wird für 220 kV Nennspannung:

$$x_{T/r, 12} = \frac{6,9}{100} \cdot \frac{220^2}{33} = 101,2 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$x_{T/r, 13} = \frac{10,8}{100} \cdot \frac{220^2}{33} = 157,9 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$x_{T/r, 23} = \frac{12,5}{100} \cdot \frac{220^2}{100} = 60,5 \text{ Ohm/Phase,}$$

somit die induktiven Blindwiderstände für den Widerstandstern zu:

$$x_{T/r, 1} = \frac{101,2 + 157,9 - 60,5}{2} = 99,3 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$x_{T/r, 2} = \frac{101,2 + 60,5 - 157,9}{2} = 1,9 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$x_{T/r, 3} = \frac{60,5 + 157,9 - 101,2}{2} = 58,8 \text{ Ohm/Phase.}$$

Die Berechnung des induktiven Blindwiderstandes einer eisenlosen Strombegrenzungsdrosselspule erfolgt in ähnlicher Weise. Es ist:

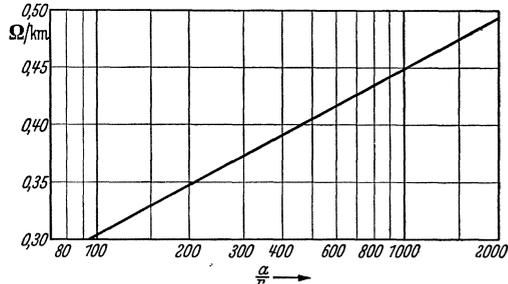
$$x_{Dr} = \frac{e_{Dr} \cdot U_n^2}{100 \cdot N_{Dr}} = \frac{e_{Dr} \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{Dr}^*} \text{ Ohm/Phase,} \quad (126)$$

x_{Dr} induktiver Blindwiderstand der Drosselspule in Ohm/Phase,
 N_{Dr} Nennleistung der Drosselspule in MVA.

Die Werte für x_{Dr} können aus Abb. 229 ersehen werden.

In vielen Fällen rechnet man auch mit der Induktivität der Drosselspule. Man erhält sie aus der Gl. (126):

$$L_{Dr} = \frac{x_{Dr}}{2 \pi \cdot f} \text{ Henry.} \quad (127)$$

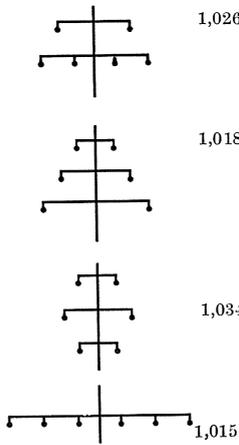


Die Widerstände der Leitungsanlage sind in Band II bereits ausführlich besprochen und berechnet worden, so daß hier nicht im einzelnen auf diese eingegangen werden kann. Für überschlägige Rechnungen kann der induktive Blindwiderstand einer im gleichseitigen Dreieck angeordneten Freileitung mit $x_l = 0,3$ bis

Abb. 232. Blindwiderstand je Phase in Ohm/km für eine im gleichseitigen Dreieck angeordnete Dreiphasenleitung.

0,5 Ohm/km und Phase angenommen werden. In Abb. 232 ist die Kennlinie für den induktiven Blindwiderstand je Phase für verschiedene Leiterabstände a in cm und Leiterhalbmesser r in cm zusammengestellt. Für Doppelleitungen ergeben sich als Umrechnungsziffern für einen Stromkreis die in Zahlentafel 19 angegebenen Werte.

Zahlentafel 19.
Umrechnungsziffern des Blindwiderstandes für einen Stromkreis mit Doppelleitungen.



Für Kabel kann, wenn keine genaueren Rechnungen angestellt werden sollen, der induktive Blindwiderstand mit $x_{Kab} = 0,08$ bis 0,1 Ohm/km und Phase zugrunde gelegt werden.

Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen. Häufig ist der Gesamtwiderstand eines Kurzschlußstromkreises aus Reihen- oder Parallelschaltungen mehrerer einzelner Widerstände festzustellen. Hierbei hat man wie folgt vorzugehen:

Summenbildung bei Reihenschaltung:

Gesamtwirkwiderstand:

$$\sum R = R_g = r_1 + r_2 + r_3 + \dots \text{ Ohm, (128)}$$

Gesamtblindwiderstand:

$$\sum X = X_g = x_1 + x_2 + x_3 + \dots \text{ Ohm, (129)}$$

Summenbildung bei Parallelschaltung:

Gesamtwirkwiderstand:

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots \text{ Ohm, (130)}$$

oder:
$$R_g = \frac{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}{r_1 \cdot r_2 + r_2 \cdot r_3 + r_1 \cdot r_3} \text{ Ohm. (131)}$$

Gesamtblindwiderstand:

$$\frac{1}{X_g} = \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_3} + \dots \text{ Ohm, (132)}$$

oder:
$$X_g = \frac{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3}{x_1 \cdot x_2 + x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_3} \text{ Ohm. (133)}$$

Reihenschaltung von Scheinwiderständen: Man ermittelt R_g und X_g und erhält Z_g aus:

$$Z_g = \sqrt{R_g^2 + X_g^2} \text{ Ohm. (134)}$$

Abb. 233. Reihenschaltung von Wirk- und induktiven Blindwiderständen.

14. Beispiel: Abb. 233:

$$R_g = 0,116 + 0,114 = 0,230 \text{ Ohm,}$$

$$X_g = j \cdot 0,813 + j \cdot 0,0746 = j \cdot 0,8876 \text{ Ohm,}$$

$$Z_g = \sqrt{0,230^2 + (j \cdot 0,8876)^2} = 0,916 \text{ Ohm.}$$

Parallelschaltung von Scheinwiderständen. Hierbei ist folgendes zu beachten: Sind die Phasenwinkel $\frac{r_1}{x_1} \cong \frac{r_2}{x_2}$, dann kann zur

Ermittlung von R_g und X_g nach der Summenbildung bei Parallelschaltung gerechnet werden. Man faßt r_1 und r_2 , ebenso x_1 und x_2 zusammen und ermittelt daraus Z_g .

Sind die Phasenwinkel nicht gleich, so muß komplex gerechnet werden ganz allgemein nach der Beziehung:

$$a + jb = c \cdot e^{j\varphi},$$

$$e = \text{Basis der natürlichen Logarithmen} = 2,718.$$

15. Beispiel: Für die in Abb. 234 angegebenen Zahlenwerte der einzelnen Widerstände soll Z_g ermittelt werden. Der Ersatzwiderstand der Parallelschaltung ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} \frac{[r_1 + jx_1] \cdot [r_2 + jx_2]}{r_1 + jx_1 + r_2 + jx_2} &= \frac{[0,164 + j \cdot 1,2335] \cdot [0,394 + j \cdot 2,349]}{0,164 + j \cdot 1,2335 + 0,394 + j \cdot 2,349} \\ &= \frac{-2,8354 + j \cdot 0,8732}{0,558 + j \cdot 3,5825}. \end{aligned}$$

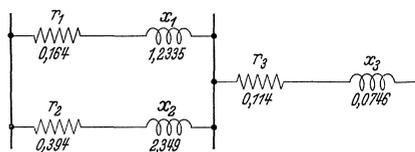


Abb. 234. Parallel- und Reihenschaltung von Wirk- und induktiven Blindwiderständen.

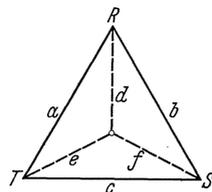


Abb. 235. Netzumwandlung von Dreieck in Stern.

Der imaginäre Teil im Nenner wird durch Vervielfachung des gesamten Bruches mit $[0,558 - j \cdot 3,5825]$ beseitigt. Man erhält:

$$\frac{[-2,8354 + j \cdot 0,8732] \cdot [0,558 - j \cdot 3,5825]}{[0,558 + j \cdot 3,5825] \cdot [0,558 - j \cdot 3,5825]} = 0,117 + j \cdot 0,809.$$

Nunmehr ergibt sich aus der Reihenschaltung Z_g :

$$R_g \text{ Summe der Wirkwiderstände: } = 0,117 + 0,114 = 0,231 \text{ Ohm,}$$

$$X_g \text{ Summe der Blindwiderstände: } = j \cdot 0,809 + j \cdot 0,0746 = j \cdot 0,8836 \text{ Ohm,}$$

$$Z_g = \sqrt{0,231^2 + j \cdot 0,8836^2} = 0,916 \text{ Ohm.}$$

In vermaschten Netzen ist gegebenenfalls die Umbildung von dreieckigen Netzmaschen in widerstandsgetreue Leitersterne erforderlich, wobei man wie folgt vorgeht:

Das in Abb. 235 gegebene Dreieck ist in einen widerstandsgetreuen Leiterstern mit den Seiten d, e, f umzubilden.

Es gelten die Beziehungen:

$$d = \frac{a \cdot b}{a + b + c}; \quad e = \frac{a \cdot c}{a + b + c}; \quad f = \frac{b \cdot c}{a + b + c}. \quad (135)$$

Auch hier ist auf das Verhältnis der Phasenwinkel $\frac{r_a}{x_a}$, $\frac{r_b}{x_b}$ und $\frac{r_c}{x_c}$ zu achten. Nimmt dieses in allen drei Leitern nahezu den gleichen Wert

an, so kann vereinfacht gerechnet werden z. B.:

$$r_d = \frac{r_a \cdot r_b}{r_a + r_b + r_c}; \quad x_d = \frac{x_a \cdot x_b}{x_a + x_b + x_c} \text{ Ohm.}$$

Andernfalls ist mit komplexen Größen zu rechnen.

Für die Rückbildung des Leitersternes in ein Netzdreieck ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned} \frac{1}{a} &= \frac{\frac{1}{e} \cdot \frac{1}{d}}{\frac{1}{e} + \frac{1}{f} + \frac{1}{d}}; & a &= \frac{e \cdot d + e \cdot f + f \cdot d}{f}; \\ \frac{1}{b} &= \frac{\frac{1}{d} \cdot \frac{1}{f}}{\frac{1}{d} + \frac{1}{e} + \frac{1}{f}}; & b &= \frac{e \cdot d + e \cdot f + f \cdot d}{e}; \\ \frac{1}{c} &= \frac{\frac{1}{e} \cdot \frac{1}{f}}{\frac{1}{d} + \frac{1}{e} + \frac{1}{f}}; & c &= \frac{e \cdot d + e \cdot f + f \cdot d}{d}. \end{aligned} \quad (136)$$

Hinsichtlich des Phasenwinkels gilt auch hier das oben Gesagte.

Umrechnung von Widerständen auf eine bestimmte Bezugsspannung. Ist in einem Netz mit verschiedenen Spannungen zu rechnen, so wählt man eine Bezugsspannung und bildet alle Widerstandswerte auf diese um. Ganz allgemein gilt hierbei:

$$R_{g,1} = R_{g,2} \cdot \left[\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \right]^2 \text{ Ohm,}$$

$$X_{g,i1} = X_{g,i2} \cdot \left[\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \right]^2 \text{ Ohm.}$$

Hierin bedeuten:

U_{n1} die höhere Spannung (Oberspannung) in kV,

U_{n2} die niedrigere Spannung (Unterspannung) in kV,

R_{g1}, R_{g2} den Wirkwiderstand bei U_{n1} bzw. U_{n2} in Ohm/Phase,

X_{g1}, X_{g2} den induktiven Blindwiderstand bei U_{n1} bzw. U_{n2} Ohm/Phase.

Bei der Kurzschlußstromberechnung sind sämtliche Widerstände auf die im Regelbetrieb im gestörten Netzteil herrschende Spannung zu beziehen.

In Zahlentafel 20 ist ein Beispiel durchgerechnet.

e) **Der Kurzschlußphasenwinkel φ_k** ¹. Der Kurzschlußstrom eilt der wirksamen Spannung stets um den Winkel φ_k nach, wobei für den zwei-poligen Kurzschluß die verkettete Spannung, beim dreipoligen Kurzschluß die Phasenspannung maßgebend ist. Abb. 236 und 237 zeigen

¹ Kaufmann, W.: Die Kurzschluß-Phasenverschiebung, ihre Bedeutung für den Abschaltvorgang und ihre Messung. ETZ 1935 Heft 40 S. 1091.

Zahlentafel 20. Beispiel zur Umrechnung von Widerständen auf verschiedene Bezugsspannungen.

	Widerstands- werte allgemein Ohm/Phase	Auf Bezugsspannung umgerechnete Widerstandswerte in Ohm/Phase	
		10 kV	für 6 kV
	$x_G=0,36$	$x_G=0,36 \cdot \left(\frac{10}{6}\right)^2 = 1$	$x_G=0,36$
	$r_G=0,025$	$r_G=0,025 \cdot \left(\frac{10}{6}\right)^2 = 0,07$	$r_G=0,025$
	$x_i=0,4 \cdot 3 = 1,2$	$x_i=1,2 \cdot \left(\frac{10}{6}\right)^2 = 3,33$	$x_i=1,2$
	$r_i=0$		
	$x_{Tfr}=2$	$x_{Tfr}=2$	$x_{Tfr}=2 \cdot \left(\frac{6}{10}\right)^2 = 0,72$
	$r_{Tfr}=0,4$	$r_{Tfr}=0,4$	$r_{Tfr}=0,4 \cdot \left(\frac{6}{10}\right)^2 = 0,144$
	$x_i=0,4$	$x_i=0,4$	$x_i=0,4 \cdot \left(\frac{6}{10}\right)^2 = 0,144$
	$r_i=0$		
	$x_i=0,2$	$x_i=0,2$	$x_i=0,2 \cdot \left(\frac{6}{10}\right)^2 = 0,072$
	$r_i=0$		
	$x_{Tfr}=2,0$	$x_{Tfr}=2,0$	$x_{Tfr}=2,0 \cdot \left(\frac{6}{10}\right)^2 = 0,72$
	$r_{Tfr}=0,4$	$r_{Tfr}=0,4$	$r_{Tfr}=0,4 \cdot \left(\frac{6}{10}\right)^2 = 0,144$
$x_{Kab}=0,1 \cdot 2,5 = 0,25$	$x_{Kab}=0,25 \cdot \left(\frac{10}{1}\right)^2 = 25$	$x_{Kab}=25 \cdot \left(\frac{6}{10}\right)^2 = 9,0$	
$r_{Kab}=0,18 \cdot 2,5 = 0,45$	$r_{Kab}=0,45 \cdot \left(\frac{10}{1}\right)^2 = 45$	$r_{Kab}=45 \cdot \left(\frac{6}{10}\right)^2 = 16,2$	

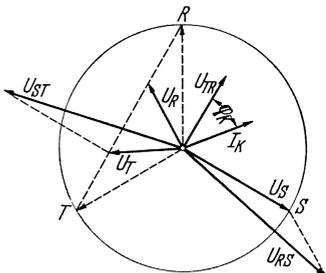


Abb. 236. Vektorschaubild für Strom und Spannung beim zweipoligen Kurzschluß (Phase R und T).

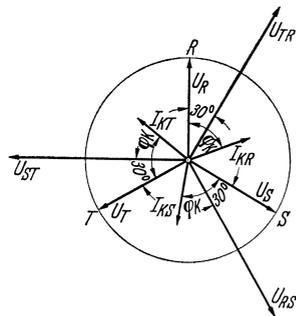


Abb. 237. Vektorschaubild für Strom und Spannung beim dreipoligen Kurzschluß.

die Vektorschaubilder für beide Fälle. Beim dreipoligen Kurzschluß schließen verkettete Spannung und Phasenspannung einen stets gleichbleibenden Winkel von 30° miteinander ein. Der Kurzschlußstrom ist

durch den Quotienten von induktivem Blind- und Wirkwiderstand in seiner Phasenlage gegenüber der wirksamen Spannung bestimmt. Beim zweipoligen Kurzschluß ändern sich die Verhältnisse dahingehend, daß die Lage von I_K in bezug auf die verketteten Spannungen U_{RS} und U_{ST} nicht allein vom Verhältnis der gesamten Netzwidestände X_g/R_g abhängt, sondern auch durch die tatsächliche Größe dieser Widerstände beeinflusst wird. Die beiden kurzgeschlossenen Phasen können je nach der Größe von X_g und R_g an der Kurzschlußstelle einen Winkel von 0° bis 120° miteinander einschließen, weshalb auch die Winkellage zwischen I_K und U_{RS} bzw. U_{ST} Schwankungen unterworfen ist. Geht man von U_{TR} aus, so können die verketteten Spannungen zwischen den nicht kurzgeschlossenen Phasen U_{RS} und U_{ST} ihre Winkellage gegenüber U_{TR} um $\pm 30^\circ$ ändern. Diese Abhängigkeiten und der Kurzschlußphasenwinkel selbst spielen bei der richtigen Einstellung einiger Netzschutzmeßwerke oft eine nicht unwesentliche Rolle. Allgemein gilt für φ_k :

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{X_g}{R_g}.$$

Bei Freileitungen nimmt φ_k durchweg einen wesentlich höheren Wert als bei Kabeln an gleichen Querschnitt und gleichen Leiterbaustoff vorausgesetzt, da die Selbstinduktion bei Freileitungen infolge des größeren Leiterabstandes zunimmt. Berücksichtigt man, daß Kurzschlüsse meist über Lichtbögen also reine Wirkwiderstände entstehen, so kann φ_k in Freileitungsnetzen oft wesentlich vermindert werden. Auch die bei Erdkurzschluß und Doppelerdschluß in Erscheinung tretenden Wirkwiderstände, Erd- und Erdübergangswiderstand, verkleinern φ_k unter Umständen beträchtlich. Bei Strombegrenzungsdrosseln beträgt φ_k nahezu 90° .

f) Die Berechnung des Stoßkurzschlußstromes¹. Wie bereits gesagt ist der Stoßkurzschlußstrom $I_{K,St}$ der größte Scheitelwert des Kurzschlußstromes. Er ist beim zwei- und dreipoligen Kurzschluß praktisch gleich groß. Zu berücksichtigen ist beim Stoßkurzschlußstrom der Anteil des Gleichstromgliedes. Das geschieht durch Einführung der Stoßziffer \varkappa , die vom Verhältnis des Wirk- zum induktiven Blindwiderstand der gesamten Kurzschlußbahn also einschließlich des Widerstandes der Stromerzeuger abhängig ist. In Abb. 238 ist die Kennlinie für \varkappa gezeichnet. Für einen Klemmenkurzschluß am Stromerzeuger ist $\varkappa = 1,8$, da hierfür $\frac{R_g}{X_g} = 0,07$ angenommen werden kann. Können die Wirkwiderstände der Kurzschlußbahn als sehr klein vernachlässigt werden, so kann \varkappa mit 1,8 auch für alle andere Lagen der Kurzschlußstelle in der Stoßkurzschlußstromberechnung Berücksichtigung finden, so daß:

$$I_{K,St} = \frac{1,05 \cdot \sqrt{2} \cdot \varkappa \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_g} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K,StW} \text{ kA}, \quad (137 a)$$

Müssen genauere Rechnungen durchgeführt werden, so ist $\frac{R_g}{X_g}$ be-

¹ Siehe Fußnote S. 254.

sonders festzustellen und der entsprechende Wert für \varkappa aus der Kennlinie der Abb. 238 zu ermitteln. Gl. (137a) geht dann über in:

$$I_{K, st} = \frac{\varkappa \cdot \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_g^2 + X_g^2}} = \frac{\varkappa \cdot \sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_g} \text{ kA.} \quad (137b)$$

$$= \varkappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K, stW} \text{ kA.}$$

Im Gesamtwiderstand Z_g der Gl. (137) ist der Widerstandsanteil der Maschinen x_G enthalten. Dieser beträgt für den Stoßkurzschlußstrom nach den Angaben auf S. 258:

bei Turbostromerzeugern und Schenkelpolmaschinen mit Dämpferwicklung:

$$x_G = x_{s-b},$$

bei Maschinen ohne Dämpferwicklung:

$$x_G = x_s$$

für jede Maschine bzw. bei mehreren parallelgeschalteten Maschinen entsprechend der Umrechnung für parallele Widerstände oder den Angaben auf S. 258 für die Ersatzmaschine.

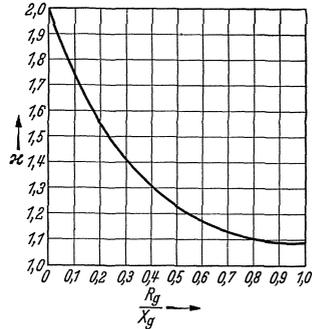


Abb. 238. Kennlinie für die Stoßziffer \varkappa in Abhängigkeit vom Verhältnis: $\frac{R_g}{X_g}$. (VDE 0670/1937, REH.)

g) Die Berechnung des Kurzschlußausschaltstromes. Das Abschalten des Kurzschlusses durch einen Leistungsschalter wird nach den REH als gleichzeitig in allen Phasen vorausgesetzt und der Stromverlauf als symmetrisch angenommen. Das Gleichstromglied wird dabei nicht mehr berücksichtigt. Über die Kurzschlußausschaltleistung wird bei den Leistungsschaltern gesprochen. Nur mit Berücksichtigung des Stoßkurzschlußwechselstrom $I_{K, stW}$ ist der Kurzschlußausschaltstrom:

$$I_{K, a} = \mu \cdot I_{K, stW} = \mu \cdot \frac{I_{K, st}}{\sqrt{2} \cdot \varkappa} = \mu \cdot \frac{1,05 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_g} = \mu \cdot \frac{1,1 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_g} \text{ kA}^1. \quad (138)$$

Für die Abklingziffer μ ist in Abb. 239 eine Kennlinie angegeben. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis des Stoßkurzschlußwechselstromanteiles jedes auf den Kurzschluß speisenden Kraftwerkes zu dessen Nennstrom. Der gesamte Kurzschlußausschaltstrom entspricht dann der Summe der mit dem zugehörigen μ -Wert vervielfachten Stromanteile.

Der in Z_g enthaltene Anteil des Maschinenwiderstandes x_G entspricht den Werten beim Stoßkurzschlußstrom nach obigen Angaben.

h) Die Berechnung des Dauerkurzschlußstromes². Für diese geht man von der ungesättigten Maschine d. h. von dem geradlinigen Verlauf der Leerlaufkennlinie aus. Aus Rechnung und Versuch wurde diese für eine größere Anzahl von Turbo- und Schenkelpolstromerzeugern ermittelt und aus den gefundenen Werten die Einheitsleerlaufkennlinie für beide Stromerzeugergattungen aufgestellt. Zur Berücksichtigung der Sätti-

¹ Die Kurzschlußabschaltleistung N_a beträgt dann:

$$N_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{k, a} \text{ MVA.}$$

² Ollendorf, F.: Praktische Methode zur Berechnung des Dauerkurzschlußstromes einfach gespeister Netze. ETZ 1930 Heft 6.

gung des vorbelasteten Stromerzeugers dient die Kurzschlußsättigungsziffer, die abhängig von der Erregung und der numerischen Kurzschlußentfernung in die Rechnung eingeführt wird.

Im Gegensatz zum Stoßkurzschlußstrom nehmen die Stromhöchstwerte beim zwei- und dreipoligem Kurzschluß nicht die gleiche Größe an, was durch die Verschiedenheit der Ankerrückwirkung bedingt ist.

Bei Asynchronmaschinen bricht im Fall eines dreipoligen Kurzschlusses das Feld völlig zusammen, da sie keine innere Eigenerrregung haben. Sie liefern daher beim dreipoligen Kurzschluß keinen Strom. Beim zweipoligen Kurzschluß erhält der nicht gestörte Leiter vom Stromerzeuger weiterhin Strom, so daß das Feld nicht völlig verschwindet. Legt man der Rechnung einen Mittelwert von 20 vH für die Gesamtstreuung zugrunde, so ergibt sich für den zweipoligen Dauerkurzschlußstrom etwa das 2,5fache des Maschinenennstromes.

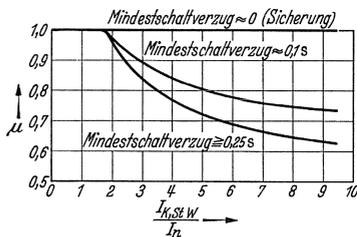


Abb. 239. Kennlinie für die Abklingziffer μ in Abhängigkeit vom Verhältnis: $\frac{I_{K, st W}}{I_n}$. (VDE 0670/1937, REH.).

Kaskadenumformer sind wie gleich große Asynchronmaschinen zu behandeln. Bricht im Kurzschlußfall die Gleichspannung zusammen, können sie ebenfalls nur einen zweipoligen Dauerkurzschlußstrom liefern. Tritt dieser Zustand nicht ein, so sind sie in ihrem Verhalten dem gleich großer Synchronmaschinen gleichzusetzen.

Für Einankerumformer gilt das gleiche wie für Kaskadenumformer. Bei überschlägigen Berechnungen sind für die Gesamtstreuung einschließlich des vorgeschalteten Umspanners etwa 15 vH einzusetzen.

Für den dreipoligen Dauerkurzschlußstrom bei belasteter Maschine gilt allgemein:

$$I_{K, d_3} = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (x_a + x_s + X_n)} \cdot k_3 \text{ kA.} \quad (139)$$

Für den zweipoligen Dauerkurzschlußstrom erhält man unter Berücksichtigung des geringeren Ständer-Rückwirkungsblindwiderstandes:

$$I_{K, d_2} = \frac{1,05 \cdot U}{x_a + 2 \cdot (x_s + X_n)} \cdot k_2 = \frac{1,05 \cdot U}{2 \cdot \left(\frac{x_a}{2} + x_s + X_n\right)} \cdot k_2 \text{ kA.} \quad (140)$$

Hierin bedeutet:

X_n gesamter Blindwiderstand des Kurzschlußstromkreises ausschließlich Maschinenwiderstände in Ohm/Phase,

k_3 die Kurzschlußsättigungsziffer bei dreipoligem Kurzschluß,

k_2 die Kurzschlußsättigungsziffer bei zweipoligem Kurzschluß.

Für die ungesättigte Maschine ergibt sich im Leerlauf bei Klemmenkurzschluß:

$$I_{K, d_{03}} = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (x_a + x_s)} \text{ kA}, \quad (141)$$

$$I_{K, d_{02}} = \frac{1,05 \cdot U}{2 \cdot \left(\frac{x_a}{2} + x_s\right)} \text{ kA}. \quad (142)$$

Der Ständer-Rückwirkungsblindwiderstand x_a ist je nach Kurzschlußart; Größe des Kurzschlußstromes, Bauart der Maschine und den Widerständen im Kurzschlußstromkreis verschieden groß. Schenkelpolstromerzeuger haben kleineren Ständer-Rückwirkungsblindwiderstand als Turbostromerzeuger; sie brauchen daher nicht so hoch erregt zu werden. Meistens ist x_a bedeutend größer als der gesamte Streublindwiderstand, so daß die bei Wahl von x_s etwa gemachten Ungenauigkeiten nicht sehr ins Gewicht fallen. Für den Ständer-Rückwirkungsblindwiderstand gilt die Beziehung:

$$x_a = x_G - x_s = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot m_0 \cdot I_n} - x_s \text{ Ohm/Phase}. \quad (143)$$

Mit der Kurzschlußsättigungsziffer k_3 bzw. k_2 , die in Abhängigkeit von der numerischen Kurzschlußentfernung:

$$a_2 = a_3 = \frac{x_s + X_n}{x_s} \quad (144)$$

und dem Erregungsverhältnis:

$$v = \frac{i_e}{i_{e_0}} = 1,08 + \left(4,45 \cdot E_s + \frac{1}{m_0} - 0,43\right) \cdot F(\cos \varphi) \quad (145)$$

i_e tatsächlicher Erregerstrom A,
 i_{e_0} Leerlauferregerstrom A

bestimmbar ist, wird die magnetische Sättigung, die der tatsächlichen Erregung des vorbelasteten Stromerzeugers entspricht, berücksichtigt. Durch die Berichtigungsziffer $F(\cos \varphi)$ ist der Einfluß des Leistungsfaktors der Vorbelastung ausgeglichen. Sie wurde aus zahlreichen Messungen und Rechnungen ermittelt und auf Grund vielfacher Versuche bestätigt.

Bei Klemmenkurzschluß ist a_3 bzw. $a_2 = 1$, da $X_n = 0$; für Leerlauf-erregung erhält man $v = 1$.

Für $F(\cos \varphi)$, v und k_3 bzw. k_2 sind in Zahlentafel 21 und 22 die entsprechenden Werte zusammengestellt.

Sprechen im Kurzschlußfall die Schnellregler der Maschinen an, die beim Absinken der Maschinenspannung die Erregung verstärken, sind für v folgende Richtwerte einzusetzen:

bei Turbostromerzeugern: $v = 3,5$,
bei Schenkelpolstromerzeugern: $v = 3,0$.

Unter ungünstigen Verhältnissen kann das Erregungsverhältnis erheblich höhere Werte bis etwa $v = 5,0$ annehmen.

Während des Nacht- oder Feiertagsbetriebes, wo nur mit geringem Maschineneinsatz gefahren wird, liegt v zwischen 0,93 und 1. Auch hier

muß auf das etwaige Ansprechen der Schnellregler Rücksicht genommen werden.

Zahlentafel 21. Berichtigungsziffer und Erregungsverhältnis in Abhängigkeit vom Leistungsfaktor der Vorbelastung für Turbo- und Schenkelpolstromerzeuger.

cos φ	0,0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
<i>F</i> (cos φ)	1,0	0,91	0,86	0,80	0,72	0,60	0,30
<i>v</i> : Turbostromerzeuger	3,2	3,0	2,9	2,8	2,6	2,35	1,7
<i>v</i> : Schenkelpolstromerzeuger	2,8	2,65	2,6	2,5	2,3	2,1	1,6

Zahlentafel 22. Kurzschlußsättigungsziffer *k*₃ bzw. *k*₂ in Abhängigkeit von der numerischen Kurzschlußentfernung *a*₃ bzw. *a*₂ und dem Erregungsverhältnis *v* für Turbo- und Schenkelpolstromerzeuger.

Numerische Kurzschlußentfernung	<i>a</i> ₃	1	2	4	8	16	32	∞
	<i>a</i> ₂	—	1	2	4	8	16	∞
<i>v</i> = 1		1,03	1,06	1,08	1,07	1,06	1,03	1,00
1,5		1,55	1,58	1,57	1,52	1,42	1,31	1,21
2		2,07	2,08	2,04	1,83	1,61	1,47	1,33
2,5		2,58	2,55	2,38	1,98	1,73	1,57	1,41
3		3,09	3,02	2,63	2,15	1,82	1,64	1,46
3,5		3,50	3,49	2,94	2,35	1,94	1,73	1,51

Sind mehrere Stromerzeuger eines Kraftwerkes zu einer Ersatzmaschine zusammenzufassen, ist zu unterscheiden, ob diese unmittelbar bzw. über die zugehörigen Maschinenumspanner auf die Sammelschiene arbeiten, oder ob sie zur Herabsetzung der Kurzschlußströme durch Drosseln, Isolier- oder Dreiwicklungsumspanner voneinander getrennt sind (Abb. 240). Bei kurzgekuppelten Maschinen, also im ersteren Fall, können die verschiedenen Stromerzeuger eines Kraftwerkes ohne weiteres zu einem einzigen Ersatzstromerzeuger zusammengezogen werden. Das Kurzschlußverhältnis des Ersatzstromerzeugers und dessen Streuspannung erhält man mit Hilfe des Leistungsgewichtes *g* aus folgenden Beziehungen:

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= \frac{N_1}{N_1 + N_2 + N_3 + \dots} \\ g_2 &= \frac{N_2}{N_1 + N_2 + N_3 + \dots} \end{aligned} \right\} \quad (146)$$

$$\frac{1}{E_s} = g_1 \cdot \frac{1}{E_{s1}} + g_2 \cdot \frac{1}{E_{s2}} + g_3 \cdot \frac{1}{E_{s3}} + \dots, \quad (147)$$

wobei gegebenenfalls für *E*_s, *E*_s − *E*_v einzusetzen ist.

Das Kurzschlußverhältnis des Ersatzstromerzeugers *m*_{*E*0} beträgt:

$$\left. \begin{aligned} m_{E_0} &= \frac{I_{K, d_0 E}}{I_{n, E}} = g_1 \cdot \frac{I_{K, d_0 1}}{I_{n_1}} + g_2 \cdot \frac{I_{K, d_0 2}}{I_{n_2}} + \dots \\ &= g_1 \cdot m_{01} + g_2 \cdot m_{02} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (148)$$

Das zur Ermittlung von Dauerkurzschlußströmen angegebene Verfahren ist vornehmlich für die Anwendung in einfach gespeisten und induktiven Stromkreisen bestimmt. Auch auf Netze mit erheblichem Wirkwiderstandsanteil ist es übertragbar, sofern veränderte Kurzschlußentfernung und Sättigungsziffer berücksichtigt werden. Wird $\sin \varphi_k \geq 0,8$, kann mit folgenden Werten gerechnet werden:

$$a_3'' = \frac{a_3}{\sin^2 \varphi_k} \quad \text{bzw.} \quad a_2'' = \frac{a_2}{\sin^2 \varphi_k}. \quad (149)$$

Somit wird:

$$I_{K, a_3} = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (x_a + a_3'' \cdot x_s)} \cdot \frac{k_3}{\sin \varphi_k} = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot \left(x_a + \frac{x_s + X_n}{\sin^2 \varphi_k}\right)} \cdot \frac{k_3}{\sin \varphi_k} \text{ kA} \quad (150)$$

und:

$$I_{K, a_2} = \frac{1,05 \cdot U}{2 \cdot \left(\frac{x_a}{2} + a_2'' \cdot x_s\right)} \cdot \frac{k_2}{\sin \varphi_k} = \frac{1,05 \cdot U}{2 \cdot \left(\frac{x_a}{2} + \frac{x_s + X_n}{\sin^2 \varphi_k}\right)} \cdot \frac{k_2}{\sin \varphi_k} \text{ kA}, \quad (151)$$

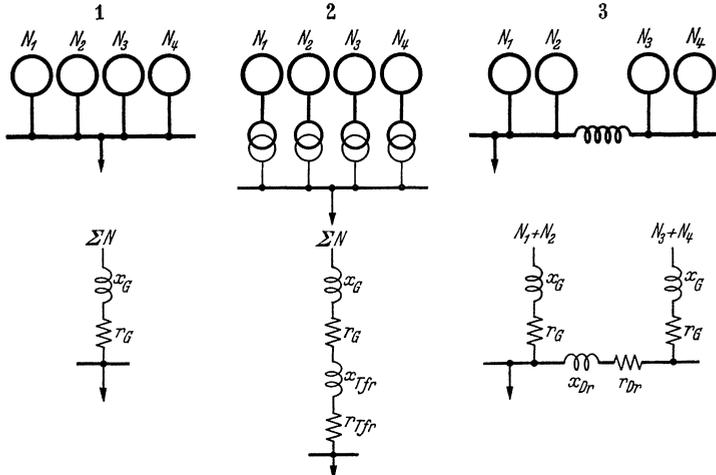


Abb. 240. Kraftwerksschaltungen und deren widerstandsgetreue Ersatzschaltbilder für die Kurzschlußberechnung.

worin $\sin \varphi_k = \frac{X_g}{Z_g}$ und a'' die berichtigte numerische Kurzschlußentfernung sind.

Vorbelastungen können bei überschlägigen Berechnungen und auch dann, wenn sie durch den Kurzschluß selbst vom Stromerzeuger abgetrennt werden, unberücksichtigt bleiben¹. In vermaschten und mehrfach gespeisten Netzen findet aber nur in den seltensten Fällen eine derartige Trennung statt, so daß hier die Vorbelastung durch Parallelschalten von Ersatzwiderständen zum Kurzschlußstromkreis in

¹ v. Timascheff: Zur Berechnung der Dauerkurzschlußströme in vorbelasteten einfach und mehrfach gespeisten Netzen. ETZ 1936 Heft 38. Grünwald: Die Berechnung dreipoliger Dauerkurzschlußströme in verbundgespeisten Netzen bei Berücksichtigung der Vorbelastung. ETZ 1935 Heft 2.

der Rechnung zu berücksichtigen ist. Andernfalls ermittelt man zu hohe Kurzschlußströme. Nach dem REH gilt:

„Die Vorbelastung des Netzes braucht bei der angenäherten Berechnung der Stoßkurzschlußströme nicht berücksichtigt zu werden. Nur bei Abnehmeranlagen, in denen eine Belastung durch Motoren mit einer Einzelleistung in der Größenordnung der Durchgangsleistung der speisenden Umspanner vorhanden ist, sind diese Motoren für die Berechnung der Stoßkurzschlußströme wie Stromerzeuger zu behandeln.“

Im 17. Beispiel sind die Kurzschlußströme in einem einfach gespeisten Netz errechnet.

i) Maßnahmen zur Verminderung oder örtlichen Begrenzung der Kurzschlußströme und ihrer Folgen. Bereits heute treten in den Anlagen Kurzschlußströme in Erscheinung, die infolge ihrer außerordentlichen Höhe schwere Gefahren für Maschinen und Geräte mit sich bringen. (Stoßkurzschlußströme bis zu 180 kA wurden bereits festgestellt.) Neben ausreichender mechanischer und thermischer Bemessung der Schaltanlagenteile (S. 297) sind u. U. besondere Mittel und Schaltungen anzuwenden, um die Größe des Kurzschlußstromes für bestimmte Anlagepunkte oder für die Gesamtanlage zu begrenzen. Da die Beanspruchung der Geräte usw. quadratisch mit dem Strom wächst, ist bei Anlagen für hohe Stoßkurzschlußströme ein ganz erheblicher Mehraufwand an Raum und Baustoffen, somit auch an Kosten bedingt, was beim Vergleich mit früheren Anlagen stets berücksichtigt werden muß.

Als Mittel zur Verminderung bzw. örtlichen Begrenzung der Kurzschlußströme und ihrer Folgen kommen in Frage:

1. der besondere elektrische Aufbau der Stromerzeuger und Umspanner,
2. die Beeinflussung der Erregung,
3. die Erhöhung der Betriebsspannung,
4. die Unterteilung der Gesamtanlage in vollständig getrennte Betriebsgruppen und entsprechende Netzgestaltung,
5. die Strombegrenzungsdrosselspule,
6. der kurzschlußsichere Aufbau der Schaltanlage selbst,
7. die Hochspannungssicherungen,
8. die Kurzschlußfortschaltung.

In welcher Weise durch den elektrischen Aufbau der Stromerzeuger der Kurzschlußstrom derselben vermindert werden kann, ist bereits ausführlich erörtert worden (Umspanner siehe Band I).

Diese Form kommt daher nur bei neuen Maschinen in Frage, und zwar sollte darauf bei dem Entwurf neuerer größerer Kraftwerke bzw. bei der Auswahl eines neu aufzustellenden Stromerzeugers oder Umspanners unbedingt geachtet werden. Es ist das einfachste, billigste und hinsichtlich der Raumersparnis beste Mittel, zumal dadurch auch die Gesamtverluste nicht geändert werden. Weichen die Blindwiderstände der parallel arbeitenden Maschinen bzw. Umspanner stark voneinander ab, können allerdings Schwierigkeiten in der Spannungsregelung eintreten.

Auf die Meßwerke zum Schutz der Stromerzeuger gegen innere und äußere Kurzschlüsse wird im 15. Kap. näher eingegangen. Schutzzei-

richtungen, die selbsttätig eine Schwächung der Erregung in Abhängigkeit vom Maschinenkurzschlußstrom durch Zuschalten eines Widerstandes in den Erregerkreis herbeiführen sollen, haben Ansprechzeiten von etwa 0,3 bis 0,5 s. Die Ausbildung des Stoßkurzschlußstromes wird also nicht verhindert. Da aber durch die Schwächung der Erregung ein Absinken der Betriebsspannung und damit die Gefährdung der Netzstabilität die Folge ist, sind derartige Schutzvorrichtungen nur mit Vorsicht anzuwenden.

Kurz erwähnt sei, daß man je nach den gegebenen Verhältnissen bei Kurzschlußströmen im Netz mit Rücksicht auf die Stabilität parallelarbeitender Maschinen und Kraftwerke vereinzelt dazu übergeht, durch außerordentlich schnelles Auferregen (Stoßerregung, Schnellerregung)

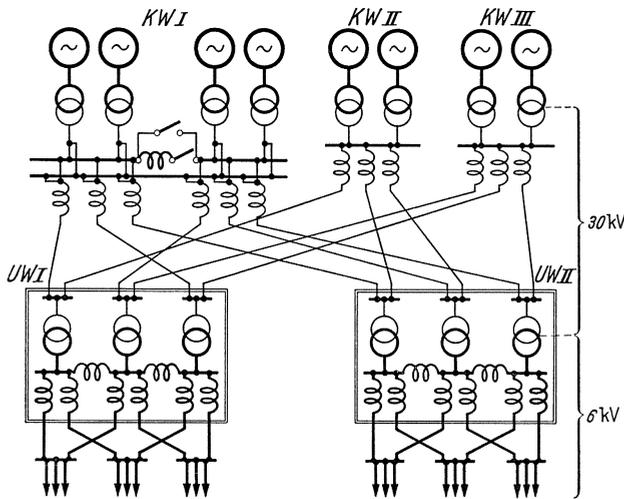


Abb. 241. Unterteilung der Kraftwerke in getrennte Betriebsgruppen durch Kurzschlußdrosselspulen.

die Klemmenspannung der Stromerzeuger bis zur Abschaltung des Kurzschlusses möglichst hoch zu halten¹. Das Abklingen der Felder wird während der Kurzschlußdauer durch zusätzliche Geräte und besondere Schaltungen verhindert, so daß die synchronisierenden Kräfte erhalten bleiben. Unter diesen Umständen muß allerdings eine erhöhte Beanspruchung der Anlagenteile in Kauf genommen werden, womit die Grenzen für den Anwendungsbereich derartiger Hilfsmaßnahmen, die auch wesentliche Mehrkosten verursachen, von selbst gegeben sind.

Zum Schutz gegen innere Kurzschlüsse im Stromerzeuger selbst wird die sofortige Entregung durch Auslösen der verschiedenen Meßwerke stets zu empfehlen sein.

Zur Verminderung der Kurzschlußströme dient weiterhin die Erhöhung der Betriebsspannung z. B. durch die Kurzkupplung

¹ Harz, H.: Schnell- und Stoßerregung von Synchronmaschinen über Gleichrichter in Stromtransformatorschaltung. ETZ 1935 Heft 30.

Stromerzeuger-Zwei- bzw. Dreiwicklungsumspanner wie in Abb. 73 und 74 gezeigt.

In größeren Kraftwerken mit mehreren Maschinen oder auch in größeren Anschluß- und Verteilungsanlagen ist eine möglichst weitgehende Unterteilung der Gesamtanlage in vollständig getrennte Betriebsgruppen — gegebenenfalls durch Einbau von Strombegrenzungsdrosselspulen oder

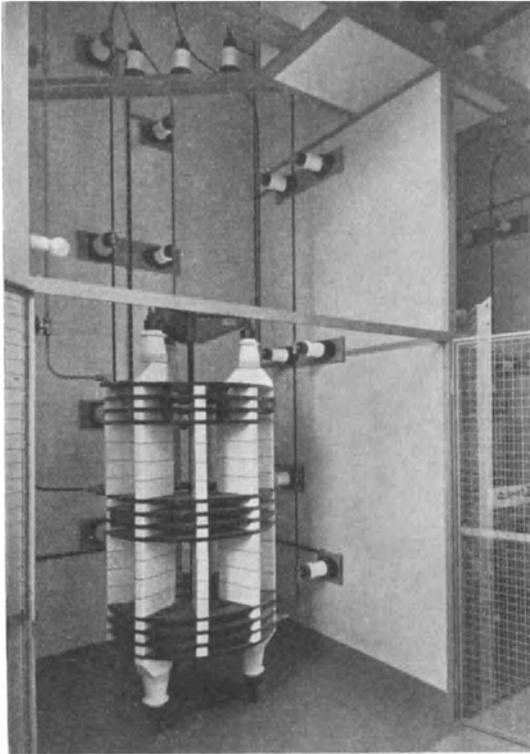


Abb. 242. Dreiphasen-Kurzschlußdrosselspule mit Leitungsanschlüssen.

Isolierumspannern vorzunehmen (Abb. 241). Aber auch in diesem Falle ist, sofern zahlreiche Maschinen großer Leistung in einem Kraftwerk aufgestellt sind, zu untersuchen, ob durch Einbau derartiger Drosseln die Kurzschlußströme in genügendem Maß an der Sammelschiene herabgesetzt werden. Gegebenenfalls ist die Sammelschiene im Regelbetrieb durch einen oder mehrere Längskuppelschalter in verschiedene Abschnitte zu unterteilen, wobei die Synchronisierung über das angeschlossene, entsprechend durchzubildende Netz vorzunehmen ist. Für den Schutz kleiner Kraftwerke im Parallelbetrieb mit größeren Werken sind ebenfalls an besonders zu bestimm-

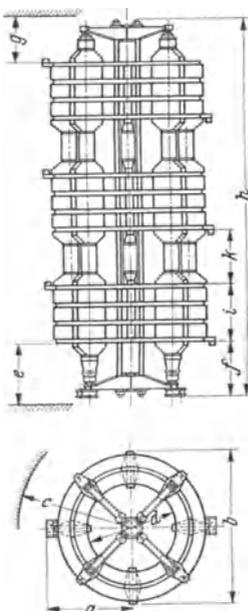
menden Stellen Strombegrenzungsdrosselspulen einzubauen.

Nach Gl. (111 a und b) ist der an einem bestimmten Punkt des Netzes auftretende Kurzschlußstrom abhängig von dem Wirk- und Blindwiderstand des Kurzschlußstromkreises festzustellen. Da mit Rücksicht auf die Wirkverluste der Wirkwiderstand möglichst klein gehalten werden muß, gibt nur die Änderung des induktiven Blindwiderstandes ein Mittel zur Herabsetzung des Kurzschlußstromes. Zu beachten ist ferner, daß durch den Einbau von Kurzschlußdrosselspulen in den einzelnen Sammelschienen-Abzweigen die Spannung an der Sammelschiene bei Kurzschluß im Netz nicht völlig zusammenbricht. Somit ist durch Einbau derartiger Drosselspulen die Gefahr des Spannungszusammenbruches und damit

die Gefahr des Außertrittfallens der Stromerzeuger wesentlich vermindert, was sich vor allen Dingen bei Nahkurzschlüssen auswirkt.

Diese künstliche Vergrößerung der Induktivität erfolgt durch die wiederholt erwähnten eisenlosen Drosselspulen (Abb. 242), deren Blindwiderstand bei allen Stromstärken unverändert bleibt. Eine ähnliche Wirkung besitzen alle Umspanner allerdings begrenzt infolge des im Stromkreis vorhandenen Eisens und dessen Sättigung, wodurch bei höheren Strömen der Blindwiderstand vermindert wird.

Eine solche Drosselspule besteht aus Flachkupper- oder Flachaluminiumwicklungen, die mit Asbest oder Glimmer isoliert und unter



Zahlentafel 23.
Abmessungen von Kurzschluß-Drosselspulen (SSW).

Netzspannung U_n , kV	Nennstrom I_{Dr} , A	Blindspannungsabfall e_{Dr} , V/H	Maße in mm									
			a	b	c^1	d	e^1	f	g^1	h	i	k
5	60	7	340	560	540	254	270	255	270	1767	264	240
5	850	7,5	690	1225	1200	742	600	436	600	2686	290	500
6	350	5	510	915	893	404	447	456	447	2225	200	360
6	1000	10	880	1575	1538	948	770	541	770	3135	350	600
15	100	3,5	510	900	876	424	438	433	438	2070	246	270
25	250	5	625	1210	1180	496	590	436	590	2780	354	410
30	300	6,35	680	1330	1200	500	507	537	467	3694	530	550

¹ Abstandsmaße gegen größere eiserne Bauteile.

starkem Zug zu Scheiben aufgewickelt sind. Diese Scheiben werden übereinander durch isolierende Porzellanstücke getrennt in einem geraden Gestell zusammengebaut. Die Eingangs- und Ausgangswindungen werden verstärkt isoliert. Der Aufbau muß genügende Sicherheit gegen die bei Kurzschluß auftretenden starken mechanischen Kräfte bieten. Die Stromzu- und -abführung liegt außen. Über die Abmessungen siehe Zahlentafel 23.

Die Drosselspule soll den Stoßkurzschlußstrom bzw. den zwei- oder dreipoligen Dauerkurzschlußstrom auf eine bestimmte Höhe begrenzen, für die die dynamische bzw. thermische Festigkeit der verschiedenen zu schützenden Schaltanlagenteile maßgebend ist (S. 297). Will man auch bei der Wahl der auf der geschützten Seite der Anlage liegenden Leistungs- und Trennschalter, Leitungen, Kabel mit kleinem Querschnitt für Anschlüsse geringer Leistung, aber besonderer betrieblicher

Bedeutung z. B. Kondensationsmotoren u. dgl. sicher gehen, so ist dringend zu empfehlen, den Stoßkurzschlußstrom der Beurteilung der Verhältnisse zugrunde zu legen und auch die Drossel entsprechend zu bemessen.

Die Größenbestimmung einer Kurzschlußdrosselspule hat nach den folgenden Gesichtspunkten zu geschehen. Nach Gl. (126) ist der Drosselwiderstand:

$$x_{Dr} = \frac{e_{Dr} \cdot U_n^2}{100 \cdot N_{Dr}} \text{ Ohm/Phase.}$$

Es ist also in Gl. (113) für x_{Dr} ein bestimmter Wert aus dem in der Drosselspule unterzubringenden Blindspannungsabfall e_{Dr} einzusetzen, daraus X_D zu ermitteln und dann $I_{K, st}$ bzw. $I_{K, a}$ an der zu schützenden Stelle zu errechnen.

Mit dem Einschalten einer Strombegrenzungsdrosselspule als induktiven Blindwiderstand ist neben dem Spannungsabfall eine Verschlechterung

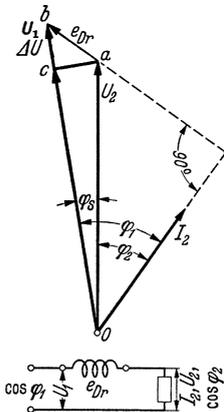


Abb. 243. Vektorschaubild für eine Kurzschlußdrosselspule.

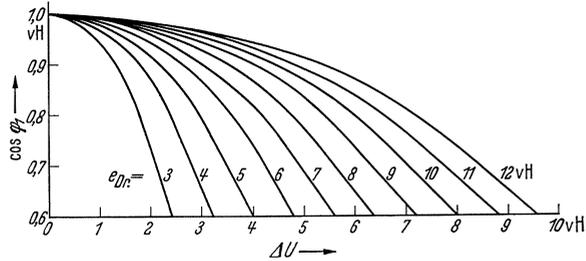


Abb. 244. Zusätzlicher Netzspannungsabfall ΔU durch Einbau einer Drosselspule bei verschiedenen Blindspannungsabfällen und veränderlichem Leistungsfaktor.

zung des Leistungsfaktors die Folge. Wird der geringe Wirkspannungsabfall der Drossel unberücksichtigt gelassen, so zeigt Abb. 243 das Spannungsbild; entsprechend den bisherigen Schaubildern bezeichnet wiederum U_2 die Spannung an der Verbrauchsstelle also hinter der Drossel, $\cos \varphi_2$ den hier vorhandenen Phasenverschiebungswinkel und die Werte mit dem Fußzeichen 1 die Verhältnisse vor der Drossel.

Aus Abb. 243 folgt:

$$U_1^2 = (U_2 \cdot \cos \varphi_2)^2 + (U_2 \cdot \sin \varphi_2 + e_{Dr})^2;$$

$$U_1 = \sqrt{U_2^2 + e_{Dr}^2 + 2 \cdot U_2 \cdot e_{Dr} \cdot \sin \varphi_2}, \quad (152a)$$

$$\Delta U = e_{Dr} \cdot \sin \varphi_1, \quad (152b)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{U_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1}, \quad (153a)$$

$$\cos \varphi_s = \frac{U_1 - e_{Dr} \cdot \sin \varphi_1}{U_2}. \quad (153b)$$

Aus Abb. 244 sind die Spannungsabfälle in vH in Abhängigkeit vom Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ und vom Blindspannungsabfall e_{Dr} in vH zu ersehen.

Je nach dem Einbauort der Drossel wird e_{Dr} für Sammelschienen zwischen 6 bis 12 vH, für Abzweigleitungen zwischen 3 bis 6 vH zu wählen sein. In jedem Fall ist jedoch festzustellen, inwieweit durch den Einbau derartiger Drosseln die Spannungsregelung für die geschützten und ungeschützten Netzteile beeinflusst wird. Wie bereits angedeutet verhalten sich Umspanner ähnlich wie Drosseln. Es ist daher ein Umspanner mit $e_k = 6$ vH gleichzusetzen einer Drossel mit demselben Spannungsabfall. Für kleinere Abzweige von größeren Anlagen ist aus diesem Grund auch der Fall rechnerisch durchzuprüfen, ob nicht durch entsprechende Verteilung der Umspanner der Einbau von Schutzdrosseln unterbleiben kann.

Bei dem Vergleich der verschiedenen Bauarten, von hängender oder stehender, ein- oder dreiphasiger Ausführung abgesehen ist neben der mechanischen auch die thermische Festigkeit zu beachten; d. h. es ist die Belastungsdauer zu ermitteln, über die eine Spule mit dem Dauerkurzschlußstrom beansprucht werden darf, ohne daß die zulässige Temperatur überschritten wird. In den VDE-Vorschriften ist hierzu festgelegt:

Kurzschlußdrosselspulen müssen ohne Verlagerung der Wicklung einen Stoßkurzschlußstrom aushalten, dessen Höchstwert nicht mehr als das $20 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2}$ fache des Nennstromes beträgt. Kurzschlußdrosselspulen müssen den ihrer Nennspannung in vH entsprechenden Dauerkurzschlußstrom, jedoch höchstens den 20fachen Nennstrom während 6 s aushalten.

Die Erwärmung bei Kurzschluß unmittelbar hinter der Spule darf 180°C über Umgebungstemperatur nicht überschreiten. Die Messung dieser Erwärmung ist nicht unmittelbar möglich. Sie wird in folgender Weise aus der Widerstandszunahme bestimmt:

$$\vartheta_a = \vartheta_D + a \cdot j_a^2 \cdot t \text{ } ^\circ\text{C},$$

- ϑ_a Grenzerwärmung in $^\circ\text{C}$,
- ϑ_D Erwärmung im Dauerbetrieb in $^\circ\text{C}$,
- a Beiwert für Kupfer = 0,008,
- a Beiwert für Aluminium = 0,0118,
- j_a Stromdichte bei Dauerkurzschlußstrom in A/mm^2 ,
- t Dauer des Kurzschlußstromes in s.

Dabei ist:

$$\vartheta_D = (235 + t_u) \cdot \frac{R_W}{R_u} - 235 \text{ für Kupfer } ^\circ\text{C},$$

$$\vartheta_D = (245 + t_u) \cdot \frac{R_W}{R_u} - 245 \text{ für Aluminium } ^\circ\text{C},$$

- t_u Umgebungstemperatur in $^\circ\text{C}$,
- R_u Widerstand bei Umgebungstemperatur Ohm/Phase,
- R_W Widerstand bei Dauerbetrieb Ohm/Phase.

16. Beispiel: Es ist eine dreiphasige Strombegrenzungsdrosselspule einzubauen, die für folgende Werte ausgelegt wurde:

Durchgangsleistung: 3 MVA

Nennspannung: 6,3 kV	Blindspannungsabfall e_{Dr} : 6,5 vH
$R_u = 0,0202$ Ohm/Phase	$R_W = 0,0255$ Ohm/Phase
Baustoff: Kupfer	$j_a = 48$ A/mm ²

Wie groß sind: der Stoßkurzschlußwechselstrom, der der Nennspannung in vH entspricht, der höchstzulässige Dauerkurzschlußstrom, der höchstzulässige Stoßkurzschlußstrom, die Dauer- und Grenzerwärmung. $t_u = 20^\circ$.

Nennstrom:

$$I_{Dr} = \frac{N_{Dr}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{3}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 275 \text{ A},$$

Stoßkurzschlußwechselstrom, der e_{Dr} entspricht:

$$I_{K, stw} = I_{Dr} \cdot \frac{1}{e_{Dr}} = \frac{0,275}{6,5} \cdot 100 = 4,24 \text{ kA},$$

Höchstzulässiger $I_{K, a}$ während 6 s:

$$I_{K, a \text{ zul.}} = I_{Dr} \cdot 20 = 5,5 \text{ kA},$$

Höchstzulässiger Stoßkurzschlußstrom:

$$I_{K, st} = I_{Dr} \cdot 20 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} \cong 14 \text{ kA},$$

Erwärmung bei Dauerbetrieb:

$$\vartheta_D = (235 + 20) \cdot \frac{0,0255}{0,0202} - 235 = 322 - 235 = 87 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Grenzerwärmung:

$$\vartheta_G = \vartheta_D + 0,008 \cdot 48^2 \cdot 6 = 87 + 110,4 = 197,4 \text{ }^\circ\text{C},$$

Erwärmung über Umgebungstemperatur $t_u = 20^\circ\text{C}$:

$$197,4 - 20 = 177,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Bei der Aufstellung von Drosselspulen ist darauf zu achten, daß sich in deren Nähe keine in sich geschlossenen Eisenteile befinden (Schutzgitter, Rahmen für Stützerbefestigungen), da diese durch die Streuflüsse stark erwärmt werden. Die Zuleitungen sind möglichst grade heranzuführen und dicht vor dem Anschluß durch Stützer zu halten. Für ausreichende Belüftung der Drosselzellen gegebenenfalls unter Anwendung künstlicher Belüftung ist zu sorgen. In gewissen Zeitabständen sind die Drosseln von Staub zu reinigen.

Mitentscheidend für die Aufstellung von Drosselspulen ist die Gesamtkostenfrage. Es ist zu untersuchen, ob die Anlage ohne Drossel mit kurzschlußsicheren Schaltgeräten teurer oder billiger ausfällt als eine geschützte und wie weit der Schutzwert festzusetzen ist, um billigere Leistungsschalter, Schaltanlagen usw. zu erreichen. Die Raumbeanspruchung und die zusätzlichen Verluste dürfen bei derartigen Vergleichen nicht außer acht gelassen werden. Bei Erweiterungen oder Zusammenschlüssen wird oftmals kein anderer Ausweg zu finden sein als die Benutzung von Strombegrenzungsdrosselspulen, sofern auch die Auswechslung der Schaltgeräte infolge Raummangels nicht möglich ist.

Abb. 245 zeigt in einem Schaltbild zusammengefaßt, an welchen Stellen einer Anlage Schutzspulen u. U. erforderlich bzw. erwünscht sind. In der nachfolgenden Zusammenstellung sind die einzelnen Einbaustellen einer kritischen Begutachtung unterworfen, die durch rechnerische und preisliche Vergleiche für die Entschlußfassung zu ergänzen ist.

Punkt 1. *Dr.* begrenzen den Kurzschlußstrom jedes Stromerzeugers sowohl nach den Sammelschienen hin als auch nach einem selbst gestörten Stromerzeuger; Bemessung für den vollen Betriebsstrom; Einbau teuer; Raumbedarf groß; Spannungsregelung an den Sammelschienen wird beeinflußt; Anwendung selten, nur beim Parallelbetrieb kleiner mit sehr großen Maschinen zum Schutz ersterer.

Punkt 2. Es gilt Ähnliches wie für Punkt 1. Anwendung nur dann, wenn ein großer Stromerzeuger vorübergehend auf Sammelschienen arbeitet, an denen sehr kleine Maschinen und Umspanner liegen; Spannungsregelung der großen Maschine wird beeinflusst.

Punkt 3. Schutz der abgehenden Leitungen mit ihren Schaltanlagen; Einbau teuer; Spannungsregelung wird beeinflusst; Anwendung selten, da Umspanner oft schon ausreichenden induktiven Blindwiderstand besitzen.

Punkt 4. Schutz mehrerer Leitungen durch nur eine Spule; Einbaukosten billiger; beeinflusst die Spannungsregelung für die zu schützenden Netzteile; wird aber notwendig, wenn durch Vergrößerung des Kraftwerkes der Kurzschlußstrom wesentlich heraufgeht, um Auswechslung von Schaltern und anderen Geräten, Leitungen, Kabeln usw. zu vermeiden; stört die Spannungsverhältnisse in allen geschützten Leitungen, wenn nur in einer Kurzschluß auftritt.

Punkt 5. Einbau für jede Leitung; Nachteile und Vorteile wie bei Punkt 4 mit der Abweichung, daß die Spannungsverhältnisse in den nicht gestörten Netzteilen unberührt bleiben; Anlagekosten teurer, wenn mehrere Stromkreise solche Einzelspulen erhalten.

Punkt 6 und 7. Anlagenschutz für den Eigenbedarf des Kraftwerkes; kommt häufiger zur Anwendung, Vorzüge und Nachteile wie bei Punkt 4 und 5; Schaltung nach Art 7 wegen der Spannungsbeeinflussung besser, in der Anlage aber teurer. Anzuwenden besonders bei Leitungsschutz für Kondensations- und ähnliche wichtige Betriebsanlagen.

Punkt 8. Drosselspule in Parallelschaltung; zumeist günstigste Einbauform; Spule führt nur einen Teil des Betriebsstromes dauernd, daher Verluste geringer. Einbau billiger; Spannungsregelung weniger stark beeinflusst; Größe der Drossel besonders vorsichtig zu bestimmen, da sonst ihr Schutzwert namentlich für Nebenbetriebe nicht ausreichend.

Punkt 9. Soll bei Anwendung der Schaltung nach 8 die Aufteilung in Betriebsgruppen andeuten und ist notwendig, da andernfalls Speisung des Kurzschlusses in einem Kraftwerkumspanner, einem Stromerzeuger oder sekundären Netzteilen von allen Maschinen nicht verhindert wird. (Rückumspannung.)

Punkt 10. Unterscheidet sich von Punkt 6 nur dann, wenn eine zweite Eigenbedarfssammelschiene vorhanden; sonst gilt das für Punkt 6 Gesagte sinngemäß.

Kleinere Werke sollen ferner nicht an Durchgangsleitungen nach Abb. 246a, sondern über Stichleitungen mit größerem Spannungsabfall nach Abb. 246b angeschlossen werden.

Über den kurzschlußsicheren Aufbau der Schaltanlage, die dynamischen und thermischen Beanspruchungen der Geräte und den Einbau

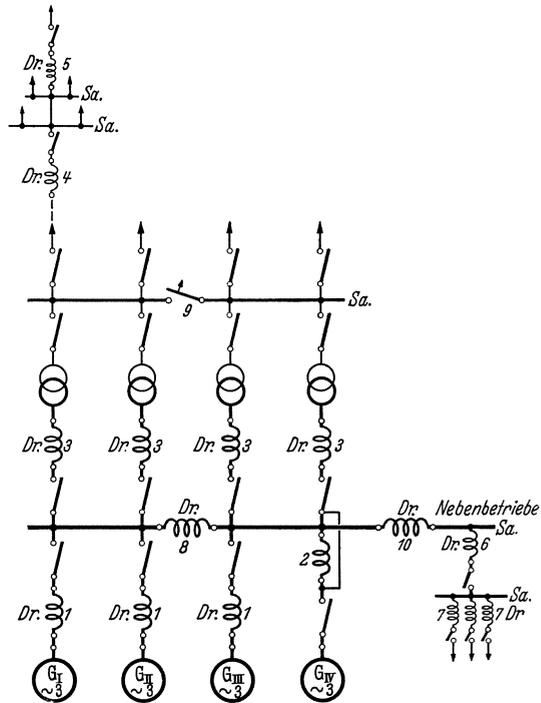


Abb. 245. Schaltbild zur Beurteilung des zweckmäßigsten Einbaues von Kurzschlußdrosselspulen.

von Hochspannungssicherungen wird in den einzelnen Kapiteln weiteres gesagt.

Kurz ist noch auf die Kurzschlußfortschaltung hinzuweisen, die, wenn auch erst in der Entwicklung begriffen, heute jedoch schon Ergebnisse gezeitigt hat, die eine wesentliche Erhöhung der Betriebssicherheit der Netze in Aussicht stellen¹ (S. 335). Ist der Kurzschluß mit Abschalten des Kurzschlußlichtbogens vollständig aufgehoben, steht einer unmittelbar folgenden Wiedereinschaltung nichts im Wege. Durch

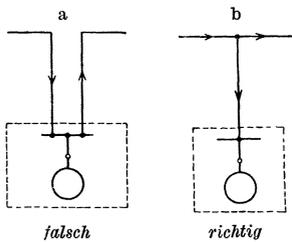


Abb. 246 a und b. Anschluß von kleinen Werken an Großnetze.

entsprechende Ausbildung der ölarmen bzw. öllosen Leistungsschalter wird es ermöglicht, die Störung durch selbständiges Zuschalten auf wenige Halbperioden zu begrenzen. Bleibt der Kurzschluß jedoch auch nach dem Wiedereinschalten bestehen, wird der Stromkreis zum zweitenmal selbständig und endgültig unterbrochen, ein Vorgang, der ebenfalls nur wenige hundertstel Sekunden dauert.

Da die Kurzschlußberechnung sehr häufig auch vom Betriebsingenieur durchgeführt werden muß, soll nun in ausführlichen Beispielen die Anwendung des Gesagten behandelt werden.

17. Beispiel: Aus einem Großkraftwerk mit vier Drehstrom-Turbostromerzeugern von je 15 MVA, $\cos \varphi = 0,8$, 6 kV soll ein Teil der Leistung außer an den Eigenbedarf an mehrere Unterwerke abgegeben werden (Abb. 247). Es sind an den Stellen I bis V die Einschalt-, Ausschalt- und Dauerkurzschlußströme zu ermitteln, um hiernach die Auswahl der Schalter vornehmen zu können.

Kurzschlußpunkt I: Einschalt- und Ausschaltstrom.

Maschine 1, 2 und 3 speisen den Kurzschluß; da alle Maschinen gleicher Bauart sind, werden diese zu einem Ersatzstromerzeuger zusammengefaßt, dessen Nennstrom beträgt:

$$I_{n, E} = \frac{(N_1 + N_2 + N_3)}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{45}{\sqrt{3} \cdot 1,05 \cdot 6} = 4,13 \text{ kA}.$$

Induktiver Blindwiderstand:

$$x_{s-b, E} = \frac{E_{s-b} \cdot U_n^2}{100 \cdot N_E} = \frac{15 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 45} = 0,1325 \text{ Ohm/Phase}.$$

Wirkwiderstand:

$$r_{G, E} = 0,07 \cdot x_{s-b, E} = 0,0092 \text{ Ohm/Phase}.$$

Die Widerstände der Stromerzeugerableitungen und der Sammelschienen können vernachlässigt werden, ebenso $r_{G, E}$, da sie im Verhältnis zum induktiven Blindwiderstand sehr gering sind. Somit ist:

$$I_{K, st I} = \frac{\varkappa \cdot \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,1325} \text{ kA},$$

$$I_{K, st W_1} = \frac{1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,1325} \cong 28,8 \text{ kA},$$

$$\varkappa \text{ aus Abb. 238} = 1,8,$$

$$I_{K, st W_1} = I_{K, st W_2} = I_{K, st W_3} = \frac{28,8}{3} = 9,6 \text{ kA}.$$

¹ Mayr, O.: Kurzschlußfortschaltung. VDE-Fachberichte 1938 S. 32.

$$I_{K, st I} = \frac{1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,6}{\sqrt{3} \cdot 0,1325} \cong 73,5 \text{ kA}$$

Einschaltstromstoß in Punkt I.

Bei einem Schaltverzögerung von 0,1 s ergibt sich für μ_I aus Abb. 239, da:

$$\frac{I_{K, st W I}}{I_{n E}} = \frac{28,8}{4,13}; \mu_I = 0,77.$$

Somit:

$$I_{K, a I} = \mu_I \cdot I_{K, st W I} = 0,77 \cdot 28,8 = 22,2 \text{ kA.}$$

Für eine wiederkehrende Spannung = Nennspannung des Netzes beträgt die Abschaltleistung:

$$N_{a I} = I_{K, a I} \cdot U \cdot \sqrt{3} = 22,2 \cdot 6,0 \cdot \sqrt{3} = 231 \text{ MVA.}$$

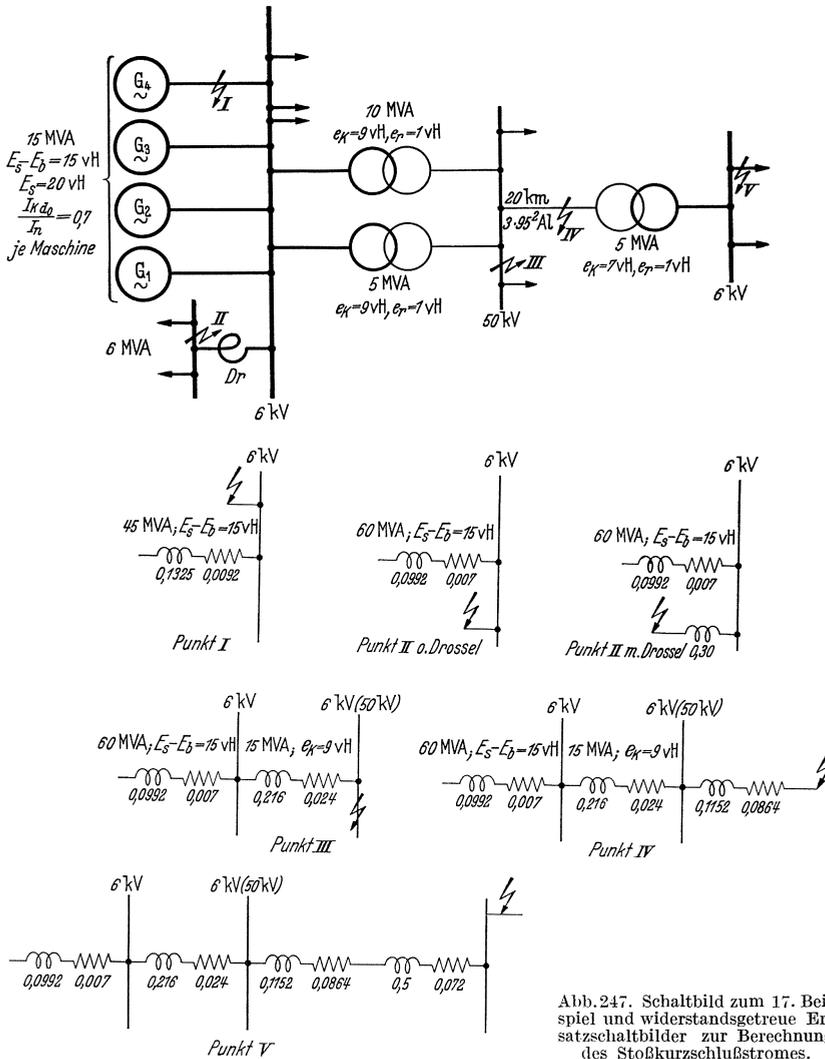


Abb. 247. Schaltbild zum 17. Beispiel und widerstandsgetreue Ersatzschaltbilder zur Berechnung des Stoßkurzschlußstromes.

Kurzschlußpunkt I. Dauerkurzschlußstrom.

Der gesamte Streublindwiderstand beträgt:

$$x_s = \frac{E_s \cdot U_n^2}{100 \cdot N_E} = \frac{20 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 45} = 0,1765 \text{ Ohm/Phase.}$$

Der Ankerrückwirkungs-Blindwiderstand beträgt:

$$\begin{aligned} x_a = x_G - x_s &= \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot m_0 \cdot I_{n,E}} - x_s = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,7 \cdot 4,13} - 0,1765 \text{ Ohm/Phase} \\ &= 1,255 - 0,1765 = 1,0785 \text{ Ohm/Phase.} \end{aligned}$$

Die numerische Kurzschlußentfernung a ist:

$$a = \frac{x_s + X_n}{x_s} = \frac{x_s + 0}{x_s} = 1.$$

Bei einem Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,8$ erhält man für $v = 2,6$ (Zahlentafel 21). Für die Sättigungsziffer k_3 bzw. k_2 ergibt sich aus Zahlentafel 22

$$k_3 = 2,66; \quad k_2 = 2,66.$$

Somit:

$$I_{K,a_3 I} = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (x_a + x_s + X_n)} \cdot k_3 = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot (1,0785 + 0,1765 + 0)} \cdot 2,66 = 7,7 \text{ kA,}$$

$$I_{K,a_2 I} = \frac{1,05 \cdot U}{2 \cdot \left(\frac{x_a}{2} + x_s + X_n\right)} \cdot k_2 = \frac{6,3}{2 \cdot \left(\frac{1,0785}{2} + 0,1765 + 0\right)} \cdot 2,66 = 11,5 \text{ kA.}$$

Der zweipolige Dauerkurzschlußstrom ist also um rd. 50 vH höher als der dreipolige.

Kurzschlußpunkt II ohne Drosselspule. Einschalt- und Ausschaltstrom.

Aus Maschine 1 bis 4, die den Kurzschluß in II speisen, wird wiederum ein Ersatzstromerzeuger gebildet. Es gilt:

$$I_{n,E} = \frac{N_E}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 5,5 \text{ kA,}$$

$$x_{s-b,E} = \frac{E_{s-b} \cdot U_n^2}{100 \cdot N_E} = \frac{15 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 60} = 0,0992 \text{ Ohm/Phase.}$$

$$r_{G,E} = 0,07 \cdot 0,0992 \cong 0,007 \text{ Ohm/Phase.}$$

Auch hier werden die Wirkwiderstände vernachlässigt.

Der Stoßkurzschlußstrom bei II beträgt:

$$I_{K,sl II} = \frac{\kappa \cdot \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot x_{s-b,E}} \text{ kA,}$$

$$\kappa = 1,8 \text{ nach Abb. 238.}$$

$$I_{K,sl w II} = \frac{1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,0992} \cong 38,5 \text{ kA,}$$

$$\frac{I_{K,sl w}}{I_{n,E}} = \frac{38,5}{5,5} = 7,0.$$

Somit:

$$I_{K,sl II} = \frac{1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,6}{\sqrt{3} \cdot 0,0992} \cong 98 \text{ kA}$$

$$\text{Demnach aus Abb. 239 } \mu_{II} = 0,77.$$

$$I_{K,a II} = \mu_{II} \cdot I_{K,sl w II} = 0,77 \cdot 38,5 = 29,7 \text{ kA,}$$

Einschaltstrom in II ohne Drossel.

$$N_{a II} = 29,7 \cdot 6,0 \cdot \sqrt{3} = 309 \text{ MVA.}$$

Kurzschlußpunkt *II* mit Drosselspule. Einschalt- und Ausschaltstrom.

Um Schalter geringerer Abschaltleistung verwenden zu können, wird in das Hauptspeisekabel für den Eigenbedarf eine Drosselspule mit 6 MVA Durchgangsleistung und 5 vH Blindspannungsabfall eingebaut. Induktiver Blindwiderstand der Drossel:

$$x_{Dr} = \frac{e_{Dr} \cdot U^2}{100 \cdot N_{Dr}} = \frac{5 \cdot 6^2}{100 \cdot 6} = \mathbf{0,30 \text{ Ohm/Phase.}}$$

Die Wirkwiderstände werden wiederum vernachlässigt. Für den gesamten Blindwiderstand erhält man:

$$X_{gII} = x_{s-b, E} + x_{Dr} = 0,0992 + 0,3 \cong \mathbf{0,4 \text{ Ohm/Phase.}}$$

Somit folgt:

$$I_{K, st II} = \frac{1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 24,3 \text{ kA} \quad I_{K, st w II} = \frac{1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 9,5 \text{ kA,}$$

$$\text{Einschaltstromstoß in II mit Drossel.} \quad \frac{I_{K, st w II}}{I_{n, E}} = \frac{9,5}{5,5} = 1,725.$$

$$\mu_{II} \text{ aus Abb. 239} = 1,0.$$

$$I_{K, a II} = \mu_{II} \cdot I_{K, st w II} = 1,0 \cdot 9,5 = \mathbf{9,5 \text{ kA,}}$$

$$N_{a II} = 9,5 \cdot 6 \cdot \sqrt{3} = \mathbf{99 \text{ MVA.}}$$

Man sieht, daß die gewählte Drosselspule den Einbau von Schaltern bedeutend geringerer Abschaltleistung ermöglicht (99 statt 309 MVA). Es ist jedoch zu untersuchen, ob der Einbau von Drosselspulen in die einzelnen Abzweigkabel statt wie hier im Hauptspeisekabel nicht größere wirtschaftliche und betriebliche Vorteile bringt.

Kurzschlußpunkt *II* ohne Drosselspule. Dauerkurzschlußstrom.

Für den aus 4 Maschinen gebildeten Ersatzstromerzeuger erhält man:

$$x_s = \frac{E_s \cdot U_n^2}{100 \cdot N_E} = \frac{20 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 60} = \mathbf{0,1323 \text{ Ohm/Phase,}}$$

$$x_a = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot m_0 \cdot I_{n, E}} - x_s = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,7 \cdot 5,5} - 0,1323 = \mathbf{0,814 \text{ Ohm/Phase.}}$$

Die numerische Kurzschlußentfernung beträgt:

$$a = \frac{x_s + X_n}{x_s} = \frac{x_s + 0}{x_s} = \mathbf{1.}$$

Unter den gleichen Bedingungen wie für *I* wird $v = 2,6$; k_2 bzw. k_3 aus Zahlentafel 22:

$$k_3 = 2,66; \quad k_2 = 2,66.$$

Somit:

$$I_{K, a_3 II} = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (x_a + x_s + X_n)} \cdot k_3 = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot (0,814 + 0,1323)} \cdot 2,66 = \mathbf{10,4 \text{ kA,}}$$

$$I_{K, a_2 II} = \frac{1,05 \cdot U}{2 \cdot \left(\frac{x_a}{2} + x_s + X_n\right)} \cdot k_2 = \frac{6,3}{2 \cdot (0,407 + 0,1323)} \cdot 2,66 = \mathbf{15,6 \text{ kA.}}$$

In diesem Fall liegt der zweipolige Kurzschlußstrom wiederum um 50 vH höher als der Strom bei dreipoligem Kurzschluß.

Kurzschlußpunkt *II* mit Drosselspule. Dauerkurzschlußstrom.

$$\begin{aligned}x_s &= \mathbf{0,1323} \text{ Ohm/Phase,} & x_{Dr} &= \mathbf{0,3} \text{ Ohm/Phase,} \\x_a &= \mathbf{0,814} \text{ Ohm/Phase.}\end{aligned}$$

$$a = \frac{x_s + x_{Dr}}{x_s} = \frac{0,4323}{0,1323} = \mathbf{3,27},$$

$$v = \mathbf{2,6}; \text{ aus Zahlentafel 21 und 22: } k_3 = \mathbf{2,5}; \quad k_2 = \mathbf{2,15}.$$

$$I_{K, a_3 II} = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (x_a + x_s + x_{Dr})} \cdot k_3 = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot (0,814 + 0,1323 + 0,3)} \cdot 2,5 = \mathbf{7,3} \text{ kA,}$$

$$I_{K, a_2 II} = \frac{1,05 \cdot U}{2 \cdot \left(\frac{x_a}{2} + x_s + x_{Dr}\right)} \cdot k_2 = \frac{6,3}{2 \cdot (0,407 + 0,1323 + 0,3)} \cdot 2,15 = \mathbf{8} \text{ kA.}$$

Infolge des hohen Blindwiderstandes der Drosselspule wird $I_{K, a_2 II}$ nur um 10 vH größer als $I_{K, a_3 III}$.

Kurzschlußpunkt *III*. Einschalt- und Ausschaltstrom.

Der aus 4 Maschinen gebildete Ersatzstromerzeuger speist über die beiden parallelgeschalteten Umspanner den Kurzschluß in *III*. Sämtliche Widerstände werden auf die Netznennspannung von 6 kV bezogen und die Umspanner gleichfalls zu einem Ersatzumspanner zusammengefaßt. Man erhält somit:

Blindwiderstand des Ersatzumspanners bezogen auf 6 kV:

$$x_{Tfr, E} = \frac{9 \cdot 50^2}{100 \cdot 15} \cdot \left(\frac{6}{50}\right)^2 = \mathbf{0,216} \text{ Ohm/Phase.}$$

Wirkwiderstand:

$$r_{Tfr, E} = \frac{1 \cdot 50^2}{100 \cdot 15} \cdot \left(\frac{6}{50}\right)^2 = \mathbf{0,024} \text{ Ohm/Phase.}$$

Gesamtblindwiderstand:

$$X_{g III} = x_{s-b, E} + x_{Tfr, E} = 0,0992 + 0,216 = \mathbf{0,3152} \text{ Ohm/Phase.}$$

Gesamtwirkwiderstand:

$$R_{g III} = r_{g, E} + r_{Tfr, E} = 0,007 + 0,024 = \mathbf{0,031} \text{ Ohm/Phase.}$$

Letzterer kann wiederum außer Betracht gelassen werden, so daß $Z_{g III} = X_{g III}$ gesetzt werden darf.

$$I_{K, st III} = \frac{\kappa \cdot \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,3152} \text{ kA,}$$

$$\kappa = 1,8 \text{ aus Abb. 238.}$$

$$I_{K, st III} = \frac{1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,3152} \cong \mathbf{31} \text{ kA.}$$

$$I_{K, st w III} = \frac{1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,3152} \cong 12,2 \text{ kA,}$$

$$\frac{I_{K, st w III}}{I_{n, E}} = \frac{12,2}{5,5} = 2,2;$$

$$\mu_{III} \text{ aus Abb. 239} = 0,97.$$

$$I_{K, a III} = 0,97 \cdot 12,2 = \mathbf{11,7} \text{ kA.}$$

$I_{K, st III}$ und $I_{K, a III}$ auf 50 kV umgerechnet:

$$I_{K, st III} = 31 \cdot \frac{6}{50} = 3,72 \text{ kA}$$

$$I_{K, a III} = 11,7 \cdot \frac{6}{50} \cong 1,4 \text{ kA,}$$

Einschaltstrom in Punkt *III*.

$$N_{a III} = 1,4 \cdot 50 \cdot \sqrt{3} = \mathbf{122} \text{ MVA.}$$

Kurzschlußpunkt III. Dauerkurzschlußstrom.

$$\mathbf{x}_s = 0,1323 \text{ Ohm/Phase}; \quad \mathbf{x}_a = 0,814 \text{ Ohm/Phase};$$

$$\mathbf{X}_n = x_{Tr,E} = 0,216 \text{ Ohm/Phase bei 6 kV.}$$

$$\mathbf{a} = \frac{x_s + x_{Tr,E}}{x_s} = \frac{0,1323 + 0,216}{0,1323} = 2,63,$$

$$\mathbf{v} = 2,6; \quad \mathbf{k}_3 = 2,6; \quad \mathbf{k}_2 = 2,3.$$

$$I_{K,d_3,III} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot (0,814 + 0,1323 + 0,216)} \cdot 2,6 = 8,15 \text{ kA},$$

$$I_{K,d_2,III} = \frac{6,3}{2 \cdot (0,407 + 0,1323 + 0,216)} \cdot 2,3 = 9,6 \text{ kA}.$$

Auf 50 kV umgerechnet erhält man:

$$I_{K,d_3,III} = 8,15 \cdot \frac{6}{50} \cong 980 \text{ A},$$

$$I_{K,d_2,III} = 9,6 \cdot \frac{6}{50} = 1,15 \text{ kA}.$$

Kurzschlußpunkt IV. Ein- und Ausschaltstrom.

Leitungsblindwiderstand bei 50 kV: 0,4 Ohm/km; $x_l = 0,4 \cdot 20 = 8,0 \text{ Ohm/Phase}$,

Leitungswirkwiderstand bei 50 kV: 0,3 Ohm/km; $r_l = 0,3 \cdot 20 = 6,0 \text{ Ohm/Phase}$.

Auf 6 kV bezogen ergibt sich:

$$\mathbf{x}_l = 8 \cdot \left(\frac{6}{50}\right)^2 = 0,1152 \text{ Ohm/Phase}; \quad \mathbf{r}_l = 6 \cdot \left(\frac{6}{50}\right)^2 = 0,0864 \text{ Ohm/Phase}.$$

Summe der Blindwiderstände:

$$\mathbf{X}_{gIV} = 0,0992 + 0,216 + 0,1152 = 0,430 \text{ Ohm/Phase}.$$

Summe der Wirkwiderstände:

$$\mathbf{R}_{gIV} = 0,007 + 0,024 + 0,0864 = 0,1174 \text{ Ohm/Phase},$$

somit:

$$\mathbf{Z}_{gIV} = \sqrt{0,43^2 + 0,12^2} \cong 0,435 \text{ Ohm/Phase}.$$

$$I_{K,sIV} = \frac{\varkappa \cdot \sqrt{2} \cdot 6,6}{\sqrt{3} \cdot 0,435} \text{ kA},$$

$$I_{K,sIV} = \frac{1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,435} = 8,8 \text{ kA},$$

$$\frac{R_{gIV}}{X_{gIV}} = \frac{1174}{4350} = 0,27,$$

$$\frac{I_{K,sIV}}{I_{n,E}} = \frac{8,8}{5,5} \cong 1,6,$$

$$\varkappa = 1,38,$$

$$\mu_{IV} = 1,0,$$

$$I_{K,sIV} = \frac{1,38 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,6}{\sqrt{3} \cdot 0,435} = 17,2 \text{ kA}.$$

$$I_{K,aIV} = 8,8 \text{ kA}.$$

Umrechnung auf 50 kV:

$$I_{K,sIV} = 17,2 \cdot \frac{6}{50} = 2,06 \text{ kA}.$$

$$I_{K,aIV} = 8,8 \cdot \frac{6}{50} = 1,055 \text{ kA},$$

$$N_{aIV} = 1,055 \cdot 50 \cdot \sqrt{3} = 91,5 \text{ MVA}.$$

Kurzschlußpunkt IV. Dauerkurzschlußstrom.

$$x_s = 0,1323 \text{ Ohm/Phase}; \quad x_a = 0,814 \text{ Ohm/Phase};$$

$$X_n = x_{Tfr,E} + x_l = 0,216 + 0,1152 = 0,331 \text{ Ohm/Phase.}$$

$$a = \frac{0,1323 + 0,331}{0,1323} = 3,5,$$

$$v = 2,6; \quad k_3 = 2,5; \quad k_2 = 2,1;$$

$$I_{K,d_3IV} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot (0,814 + 0,1323 + 0,331)} \cdot 2,5 = 7,13 \text{ kA},$$

$$I_{K,d_2IV} = \frac{6,3}{2 \cdot (0,407 + 0,1323 + 0,331)} \cdot 2,1 = 7,6 \text{ kA}.$$

Für 50 kV ergibt sich:

$$I_{K,d_3IV} = 7,13 \cdot \frac{6}{50} = 855 \text{ A},$$

$$I_{K,d_2IV} = 7,6 \cdot \frac{6}{50} = 912 \text{ A}.$$

Kurzschlußpunkt V. Ein- und Ausschaltstrom.

Blindwiderstand:

$$x_{Tfr} = \frac{7 \cdot 6^2}{100 \cdot 5} \cong 0,5 \text{ Ohm/Phase}.$$

Wirkwiderstände werden vernachlässigt.

$$X_{gV} = 0,0992 + 0,216 + 0,1152 + 0,5 = 0,9304 \text{ Ohm/Phase}.$$

$$I_{K,stV} = \frac{\varkappa \cdot \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,93} \text{ kA}.$$

$$I_{K,stwV} = \frac{1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,93} = 4,1 \text{ kA},$$

Zur Ermittlung der Stoßziffer ist:

$$\frac{I_{K,stwV}}{I_{n,E}} = \frac{4,1}{5,5} \cong 0,73; \quad \mu_V = 1.$$

$$r_{Tfr} = \frac{1 \cdot 6^2}{100 \cdot 5} = 0,072 \text{ Ohm/Phase},$$

$$I_{K,aV} = 4,1 \text{ kA}; \quad N_{aV} = 42,6 \text{ MVA}.$$

$$R_{gV} = 0,007 + 0,024 + 0,0864 + 0,072 = 0,1894 \text{ Ohm/Phase},$$

$$\frac{R_{gV}}{X_{gV}} \cong 0,2; \quad \varkappa = 1,53,$$

$$I_{K,stV} = \frac{1,53 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,93} = 8,9 \text{ kA}.$$

Kurzschlußpunkt V. Dauerkurzschlußstrom.

Es sind:

$$x_s = 0,1323 \text{ Ohm/Phase}; \quad x_a = 0,814 \text{ Ohm/Phase};$$

$$X_n = x_{Tfr,E} + x_l + x_{Tfr} = 0,216 + 0,1152 + 0,5 = 0,831 \text{ Ohm/Phase}.$$

$$a = \frac{x_s + X_n}{x_s} = \frac{0,1323 + 0,831}{0,1323} \cong 7,25,$$

$$v = 2,6; \quad k_3 = 2,0; \quad k_2 = 1,76;$$

$$I_{K,d_3V} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot (0,814 + 0,1323 + 0,831)} \cdot 2,0 = 4,10 \text{ kA},$$

$$I_{K,d_2V} = \frac{6,3}{2 \cdot (0,407 + 0,1323 + 0,831)} \cdot 1,76 = 4,04 \text{ kA}.$$

Zusammenstellung der Kurzschlußströme in den Netzpunkten $I \div V$.

Kurzschlußpunkt	Netzspannung kV	Einschaltstrom kA	Ausschaltstrom kA	Dauerkurzschlußstrom	
				2 polig	3 polig
<i>I</i>	6	73,50	22,200	11,500	7,700
<i>II</i> ohne Drossel	6	98,00	29,700	15,600	10,400
<i>II</i> mit Drossel	6	24,30	9,500	8,000	7,300
<i>III</i>	50	3,72	1,400	1,150	0,980
<i>IV</i>	50	2,06	1,055	0,912	0,855
<i>V</i>	6	8,90	4,100	4,100	4,040

k) Kurzschlußströme in mehrfach gespeisten Netzen. Um diese Berechnung der Kurzschlußströme durchführen zu können, werden die Netze soweit als möglich mittels Hilfsrechnungen aufgeteilt¹.

Wird eine zwischen den einzelnen Kraftwerken im Regelbetrieb bestehende Kupplung durch den Kurzschluß aufgehoben, so kann infolge der jetzt getrennten Speisung wie bisher gerechnet werden. Der gesamte Kurzschlußstrom ist gleich der Summe der von den verschiedenen Kraftwerken herrührenden Teilkurzschlußströme, wobei angenommen wird, daß die Kraftwerke auch nach Kurzschlußeintritt synchron laufen. Zu beachten ist ferner, daß dieses Verfahren genau genommen nur für die Bestimmung des dreipoligen Kurzschlußstromes gilt, da beim zweipoligen Kurzschluß die voneinander getrennten Netzteile über den gesunden Leiter weiterhin gekuppelt bleiben. Ohne merklichen Fehler zu machen kann man jedoch annehmen, daß über den nicht gestörten Leiter kein Kurzschlußstromanteil fließt.

Bleibt die Kupplung im Kurzschlußfall aufrecht erhalten, so treten Ausgleichströme in Erscheinung. Sind die Netzgebilde sehr verwickelt, wird die Rechnung zweckmäßigerweise unter Zuhilfenahme eines Netzmodelles durchgeführt². Für einfach gestaltete Netze kann man der Berechnung von Stoßkurzschlußströmen das in den Vorschriften angegebene Verfahren zugrunde legen:

In gleicher Weise wie einfach gespeiste Kurzschlüsse sind mehrfach gespeiste Kurzschlüsse zu behandeln, bei denen die Kurzschlußstelle das Netz in mehrere einfach gespeiste Kurzschlüsse aufteilt.

Ist dies nicht der Fall, so ist folgendermaßen zu verfahren: An Stelle des Kurzschlusses wird die Ersatzspannung $1,1 \cdot U$ als einzige Spannungsquelle im Netz eingeführt. Die wirksamen Stoßblindwiderstände der Stromerzeuger werden in diesem Ersatzbild im Anschluß an die Netz Widerstände als Belastungen der Ersatzspannungsquelle angenommen. Man berechnet den Gesamt widerstand dieses Ersatzbildes und erhält den Stoßkurzschluß-Wechselstrom. Die Stromanteile der einzelnen Kraftwerke ergeben sich nach den Kirchhoffschen Gesetzen als die Ströme, die in dem Ersatzbild in die Kraftwerkswiderstände hinein fließen. Statt durch Rechnung können die Ströme auch durch Messung in einem dem Ersatzbild entsprechenden Netzmodell ermittelt werden.

¹ Ollendorf: Praktische Berechnungen von Kurzschlußströmen in mehrfach gespeisten Netzen. ETZ 1931 Heft 49. Neumann, H.: Der verbundgespeiste Dauerkurzschluß in verwickelten Netzen unter Berücksichtigung der Vorlast. Arch. Elektr. XXXII. Bd. 1938 2. Heft.

² Siehe Fußnote 1 S. 296.

Aus dem Verhältnis des Stromanteiles jedes Kraftwerkes zu seinem Nennstrom folgt nach Abb. 239 der Wert μ für die Ermittlung des Ausschaltstromes. Der gesamte Ausschaltstrom ist dann gleich der Summe der mit den zugehörigen Werten μ vervielfachten Stromanteile.

Bei Berechnung der Dauerkurzschlußströme geht man in gleicher Weise vor. Die Kraftwerke werden in diesem Fall durch ihre Streu- und Ständer-Rückwirkungsblindwiderstände dargestellt, und die unter Einwirkung der Ersatzspannung zustande kommenden Stromverteilungen nach den Kirchhoffschen Gesetzen bei Vernachlässigung der Stromerzeugersättigung ermittelt. Man erhält somit die für jedes Kraftwerk wirksamen Betriebsblindwiderstände. Setzt man von diesen die Stromerzeugerwiderstände ab, ergeben sich hieraus die tatsächlichen Betriebs-Netzblindwiderstände, womit numerische Kurzschlußentfernung und Sättigungsziffer bestimmbar sind. Der von den einzelnen Kraftwerken herrührende drei- bzw. zweipolige Dauerkurzschlußstrom kann nunmehr aus den bekannten Beziehungen errechnet werden.

Das 18. Beispiel zeigt den Rechnungsgang zur Ermittlung der Einschalt-, Ausschalt- und Dauerkurzschlußströme in einem mehrfach gespeisten Netz.

18. Beispiel: Berechnung der Ein- und Ausschaltströme für die Schalter 1 und 2, sowie der Dauerkurzschlußströme für das in Abb. 248 dargestellte mehrfach gespeiste Netz.

a) Kraftwerksgrößen:

K. I.

$$x_{s-b} = \frac{12 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 15} = 0,318 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$x_s = \frac{20 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 15} = 0,53 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$I_n = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 1,375 \text{ kA; } x_a = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,7 \cdot 1,375} - 0,53 = 3,24 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$r_{G,s-b} = 0,07 \cdot 0,318 = 0,022 \text{ Ohm/Phase; } r_{G,s} = 0,07 \cdot 0,53 = 0,037 \text{ Ohm/Phase.}$$

K. II.

$$x_{s-b,E} = \frac{14 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 20} = 0,278 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$x_{s,E} = \frac{20 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 20} = 0,397 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$I_{n,E} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 1,835 \text{ kA; } x_{a,E} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,7 \cdot 1,835} - 0,397 = 2,433 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$r_{G,E_{s-b}} = 0,07 \cdot 0,278 = 0,0195 \text{ Ohm/Phase; } r_{G,E_s} = 0,07 \cdot 0,397 = 0,0278 \text{ Ohm/Phase.}$$

K. III.

$$x_{s-b} = \frac{15 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 4} = 1,49 \text{ Ohm/Phase; } I_n = \frac{4}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 0,367 \text{ kA,}$$

$$x_s = \frac{24 \cdot 6,3^2}{100 \cdot 4} = 2,38 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$x_a = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,7 \cdot 0,367} - 2,38 = 11,77 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$r_{G,s-b} = 0,07 \cdot 1,49 = 0,1043 \text{ Ohm/Phase,}$$

$$r_{G,s} = 0,07 \cdot 11,77 = 0,8239 \text{ Ohm/Phase.}$$

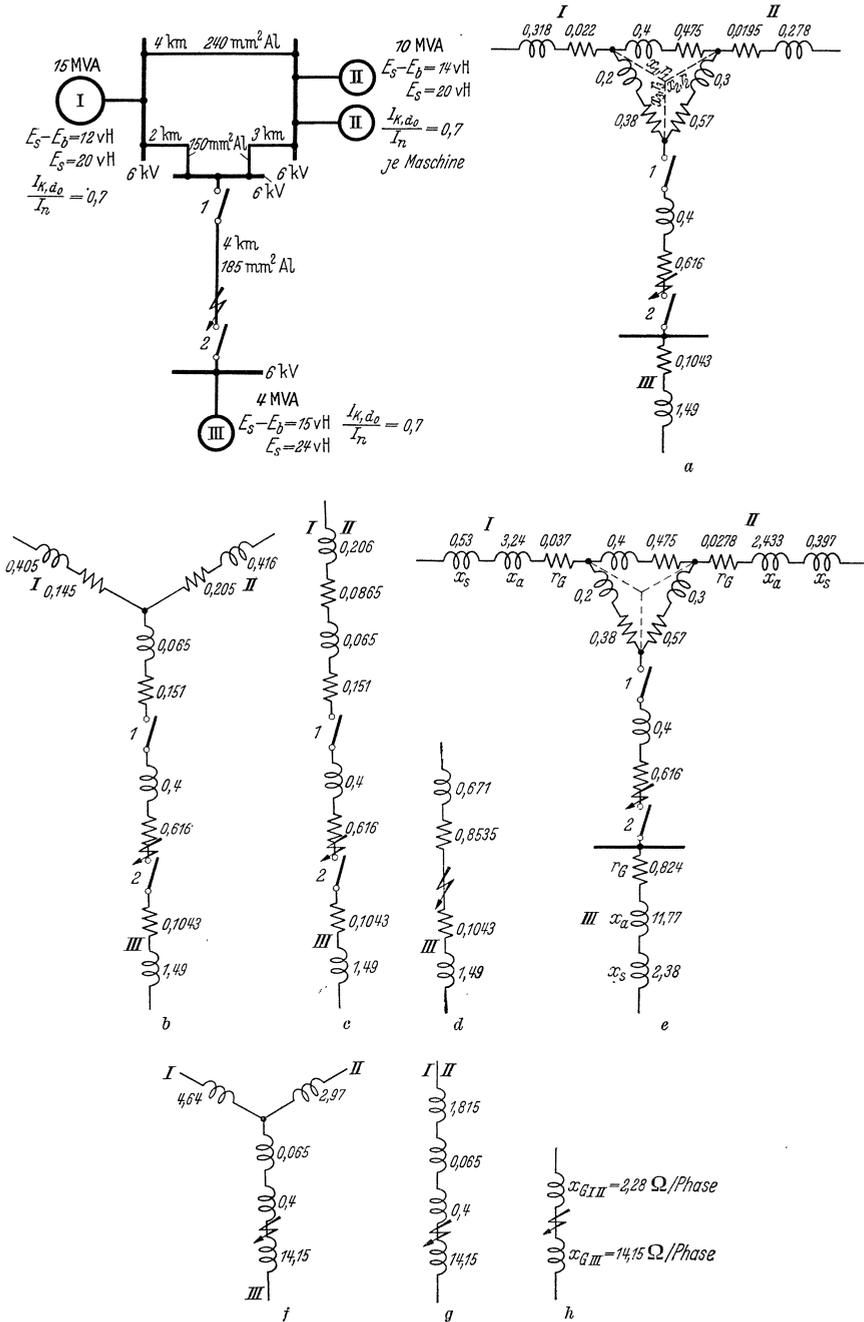


Abb. 248a bis h. Schaltbild zum 18. Beispiel und widerstandstreue Ersatzschaltbilder zur Berechnung der Stoß- und Dauerkurzschlußströme.

b) Streckenwiderstände:

a) 4 km Kabel 240 mm² Al:

$$\mathbf{x}_{Kab} = 0,1 \cdot 4 = \mathbf{0,4} \text{ Ohm/Phase,}$$

$$\mathbf{r}_{Kab} = 0,119 \cdot 4 = \mathbf{0,475} \text{ Ohm/Phase.}$$

b) 2 km Kabel 150 mm² Al:

$$\mathbf{x}_{Kab} = 0,1 \cdot 2 = \mathbf{0,2} \text{ Ohm/Phase.}$$

$$\mathbf{r}_{Kab} = 0,19 \cdot 2 = \mathbf{0,38} \text{ Ohm/Phase.}$$

c) 3 km Kabel 150 mm² Al:

$$\mathbf{x}_{Kab} = 0,1 \cdot 3 = \mathbf{0,3} \text{ Ohm/Phase,}$$

$$\mathbf{r}_{Kab} = 0,19 \cdot 3 = \mathbf{0,57} \text{ Ohm/Phase.}$$

d) 4 km Kabel 185 mm² Al:

$$\mathbf{x}_{Kab} = 0,1 \cdot 4 = \mathbf{0,4} \text{ Ohm/Phase,}$$

$$\mathbf{r}_{Kab} = 0,154 \cdot 4 = \mathbf{0,616} \text{ Ohm/Phase.}$$

c) Berechnung der Ein- und Ausschaltströme.

Umwandlung des Netzdreiecks in einen widerstandsgetreuen Stern (Abb. 248a). Zur Untersuchung, ob komplex oder einfach gerechnet werden kann, werden die Verhältnisse gebildet:

$$\frac{0,380}{j \cdot 0,2} = 190; \quad \frac{0,475}{j \cdot 0,4} = 119; \quad \frac{0,570}{j \cdot 0,3} = 190.$$

Die Umwandlung von Dreieck in Stern muß also mit komplexer Rechnung vorgenommen werden. Es ist:

$$\begin{aligned} (x_1 r_1) &= \frac{(0,38 + j \cdot 0,2)(0,475 + j \cdot 0,4)}{0,38 + j \cdot 0,2 + 0,475 + j \cdot 0,4 + 0,57 + j \cdot 0,3} = \frac{(0,094 + j \cdot 0,243)}{(1,425 + j \cdot 0,9)} \\ &= \frac{(0,094 + j \cdot 0,243)(1,425 - j \cdot 0,9)}{(1,425 + j \cdot 0,9)(1,425 - j \cdot 0,9)} = \frac{0,35 + j \cdot 0,255}{2,84} = \mathbf{0,123 + j \cdot 0,087.} \end{aligned}$$

Die Maschinenwiderstände vom Kraftwerk K. I werden hinzugefügt:

$$0,123 + j \cdot 0,087 + 0,022 + j \cdot 0,318 = \mathbf{0,145 + j \cdot 0,405.}$$

$$\begin{aligned} (x_2 r_2) &= \frac{(0,457 + j \cdot 0,4)(0,57 + j \cdot 0,3)}{0,38 + j \cdot 0,2 + 0,475 + j \cdot 0,4 + 0,57 + j \cdot 0,3} \\ &= \frac{(0,14 + j \cdot 0,365)(1,425 - j \cdot 0,9)}{(1,425 + j \cdot 0,9)(1,425 - j \cdot 0,9)} = \mathbf{0,186 + j \cdot 0,1385.} \end{aligned}$$

Unter Hinzufügen der Maschinenwiderstände von K. II ergibt sich:

$$0,186 + j \cdot 0,1385 + 0,0195 + j \cdot 0,278 = \mathbf{0,205 + j \cdot 0,416.}$$

$$\begin{aligned} (x_3 r_3) &= \frac{(0,38 + j \cdot 0,2)(0,57 + j \cdot 0,3)}{1,425 + j \cdot 0,9} \\ &= \frac{(0,1566 + j \cdot 0,228)(1,425 - j \cdot 0,9)}{(1,425 + j \cdot 0,9)(1,425 - j \cdot 0,9)} = \mathbf{0,151 + j \cdot 0,065.} \end{aligned}$$

Man erhält nunmehr folgendes Ersatzbild Abb. 248b.

Die vom K. I und K. II bis zum Sternpunkt vorhandenen parallelgeschalteten Widerstände werden durch eine Reihenschaltung ersetzt (Abb. 248c). Es folgt:

$$\begin{aligned} &\frac{(0,145 + j \cdot 0,405)(0,205 + j \cdot 0,146)}{0,145 + j \cdot 0,405 + 0,205 + j \cdot 0,146} = \frac{-0,139 + j \cdot 0,143}{0,35 + j \cdot 0,821} \\ &= \frac{(-0,139 + j \cdot 0,143)(0,35 - j \cdot 0,821)}{(0,35 + j \cdot 0,821)(0,35 - j \cdot 0,821)} = \mathbf{0,0865 + j \cdot 0,206.} \end{aligned}$$

Nunmehr werden die in Reihe geschalteten Wirk- und Blindwiderstände zusammengefaßt (Abb. 248d):

$$j \cdot 0,206 + j \cdot 0,065 + j \cdot 0,4 = \mathbf{0,671},$$

$$0,0865 + 0,151 + 0,616 = \mathbf{0,8535}.$$

Um die Stromanteile der Kraftwerke I und II zu ermitteln, führt man an der Kurzschlußstelle die Ersatzspannung $U_{Er} = 1,1 \cdot U$ ein, somit wird:

$$I_{K, st w_{I, II}} = \frac{U_{Er}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\sigma I, II}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,671^2 + 0,855^2}} = \frac{6,6}{\sqrt{3} \cdot 1,085} = \mathbf{3,55 \text{ kA}}.$$

Dieser Gesamtstrom wird vom Werk I und II entsprechend dem umgekehrten Scheinwiderstandsverhältnis vom Sternpunkt ab geliefert. Man erhält infolgedessen:

$$I_{K, st w_I} = \frac{3,55 \cdot \sqrt{0,206^2 + 0,0865^2}}{\sqrt{0,405^2 + 0,145^2}} = \frac{3,55 \cdot 0,223}{0,429} = \mathbf{1,845 \text{ kA}},$$

$$I_{K, st w_{II}} = \frac{3,55 \cdot \sqrt{0,206^2 + 0,0865^2}}{\sqrt{0,416^2 + 0,205^2}} = \frac{3,55 \cdot 0,223}{0,465} = \mathbf{1,705 \text{ kA}}.$$

Für die Ermittlung der Stoßziffer κ ist das Verhältnis $\frac{R_{\sigma I, II}}{X_{\sigma I, II}}$ maßgebend:

$$\frac{R_{\sigma I, II}}{X_{\sigma I, II}} = \frac{0,854}{0,671} = 1,27.$$

κ aus Abb. 238 = 1,05.

Der Stoßkurzschlußstrom beträgt nunmehr:

$$I_{K, st_{I, II}} = 1,05 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,55 \cong \mathbf{5,275 \text{ kA}},$$

anteilmäßig auf die Werke I und II aufgeteilt:

$$I_{K, st_I} = \frac{5,275 \cdot 0,223}{0,429} = \mathbf{2,745 \text{ kA}},$$

$$I_{K, st_{II}} = \frac{5,275 \cdot 0,223}{0,465} = \mathbf{2,530 \text{ kA}}.$$

Den Ausschaltstrom erhält man aus:

$$I_{K, aI} = \mu_I \cdot I_{K, st w_I} \text{ kA}; \quad I_{K, aII} = \mu_{II} \cdot I_{K, st w_{II}} \text{ kA}.$$

Bei einem Schaltverzug von 0,1 s wird nach Abb. 239:

$$\frac{I_{K, st w_I}}{I_{nI}} = \frac{1,845}{1,375} = 1,340 \quad \text{und} \quad \mu_I = 1;$$

$$\frac{I_{K, st w_{II}}}{I_{nII}} = \frac{1,705}{1,835} = 0,93 \quad \text{und} \quad \mu_{II} = 1.$$

$$I_{K, aI} = 1,845 \cdot 1 = 1,845 \text{ kA}; \quad I_{K, aII} = 1,705 \cdot 1 = 1,705 \text{ kA}.$$

Der gesamte Ausschaltstrom, den der Schalter I abzuschalten hat, beträgt:

$$I_{K, aI} + I_{K, aII} = 3,35 \text{ kA}.$$

Die Ausschaltleistung des Schalters I muß demnach bei einer wiederkehrenden Spannung von 6 kV zu:

$$N_{aI, II} = 3,55 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,0 \cong \mathbf{37 \text{ MVA}}$$

gewählt werden.

Vom Kraftwerk III wird der Stoßkurzschlußwechselstrom $I_{K, st w III}$ geliefert:

$$I_{K, st w III} = \frac{1,05 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{1,49^2 + 0,1043^2}} = \frac{6,6}{\sqrt{3} \cdot 1,49} = 2,56 \text{ kA},$$

$$\frac{R_{g III}}{X_{g III}} = \frac{0,1043}{1,49} = 0,07; \quad \kappa = 1,8; \quad I_{K, st III} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,56 = 6,51 \text{ kA}.$$

Bei einem Schaltverzug von 0,1 s erhält man somit folgende Werte:

$$\frac{I_{K, st w III}}{I_{n III}} = \frac{2,56}{0,367} \cong 7,0; \quad \mu_{III} = 0,76;$$

$$I_{K, a III} = 0,76 \cdot 2,56 = 1,945 \text{ kA}.$$

Bei 6 kV wiederkehrender Spannung hat der Schalter 2 die Ausschaltleistung abzuschalten:

$$N_{a III} = 1,945 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,0 = 20,2 \text{ MVA}.$$

d) Berechnung des dreipoligen Dauerkurzschlusses.

Man erhält das in Abb. 248e gezeichnete Ersatzbild.

Das Netzdreieck wird in einen widerstandsgetreuen Netzstern umgewandelt. Unter Hinzufügen der Maschinenwiderstände und Vernachlässigung der Wirkwiderstände des gesamten Kurzschlußstromkreises ergibt sich das in Abb. 248f dargestellte Ersatzbild. Die Wirkwiderstände können hier unberücksichtigt bleiben, da sie im Vergleich zu den Ständer-Rückwirkungsblindwiderständen sehr klein sind.

Die zu einem Widerstand zusammengefaßten parallelgeschalteten Widerstände ergeben nach Abb. 248g:

$$\frac{4,64 \cdot 2,968}{4,64 + 2,968} = 1,815 \text{ Ohm/Phase}.$$

Die in Reihe geschalteten Widerstände vom Kraftwerk I II bis zur Kurzschlußstelle werden zu einem Widerstand vereinigt (Abb. 248h).

Die im Kurzschlußpunkt anzunehmende Ersatzspannung U_{Er} treibt einen Strom durch den Gesamtblindwiderstand $X_{g, I, II}$ von:

$$I_{Er} = \frac{U_{Er}}{X_{g, I, II}} = \frac{U_{Er}}{2,28} \text{ kA}.$$

Entsprechend den Blindwiderständen der Strombahnen Netzsternpunkt—Kraftwerk I bzw. II ergeben sich die in den Widerständen dieser Abzweige auftretenden Stromanteile zu:

$$I_{Er I} = \frac{1,815}{4,64} \cdot \frac{U_{Er}}{2,28} = \frac{U_{Er}}{5,85} \text{ kA}$$

und

$$I_{Er II} = \frac{1,815}{2,97} \cdot \frac{U_{Er}}{2,28} = \frac{U_{Er}}{3,745} \text{ kA}.$$

Somit betragen die Betriebs-Blindwiderstände:

$$X_{g I} = 5,85 \text{ Ohm/Phase},$$

$$X_{g II} = 3,745 \text{ Ohm/Phase}.$$

Zieht man von diesen Widerständen die der Stromerzeuger ab, so erhält man die Betriebs-Netzblindwiderstände zu:

$$X_{n, I} = 5,85 - (0,53 + 3,24) = 2,08 \text{ Ohm/Phase},$$

$$X_{n, II} = 3,745 - (0,397 + 2,433) = 0,915 \text{ Ohm/Phase}.$$

Mit diesen Werten werden die Kurzschlußentfernungen:

$$a_{3, I} = \frac{x_s + X_{n, I}}{x_s} = \frac{0,53 + 2,08}{0,53} = 4,93,$$

$$a_{3, II} = \frac{x_s + X_{n, II}}{x_s} = \frac{0,34 + 0,915}{0,34} = 3,69.$$

Beträgt der Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,8$, wird nach Zahlentafel 21 das Erregungsverhältnis $v = 2,6$. Aus Zahlentafel 22 folgt somit für die Sättigungsziffern $k_{3, I}$ und $k_{3, II}$:

$$k_{3, I} = 2,3; \quad k_{3, II} = 2,48.$$

Der vom Kraftwerk I bzw. II herrührende Dauerkurzschlußstrom beträgt:

$$I_{K, a_3, I} = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (x_s + x_a + X_{n, I})} \cdot k_{3, I} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot (0,53 + 3,24 + 2,08)} \cdot 2,3 = 1,43 \text{ kA},$$

$$I_{K, a_3, II} = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (x_s + x_a + X_{n, II})} \cdot k_{3, II} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot (0,397 + 2,433 + 0,915)} \cdot 2,48 = 2,41 \text{ kA}.$$

Der gesamte von den Kraftwerken I und II über den Schalter I zur Kurzschlußstelle fließende Dauerkurzschlußstrom ist:

$$I_{K, a_3} = I_{K, a_3, I} + I_{K, a_3, II} = 1,43 + 2,41 = 3,84 \text{ kA}.$$

Vom Kraftwerk III werden geliefert:

$$I_{K, a_3, III} = \frac{1,05 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (x_a + x_s + X_n)} \cdot k \text{ kA}.$$

Da $X_n = 0$, beträgt die numerische Kurzschlußentfernung:

$$a_{3, III} = \frac{x_s + X_n}{x_s} = 1.$$

Bei $\cos \varphi = 0,8$ erhält man aus Zahlentafel 21 v zu 2,6 und aus Zahlentafel 22 $k_3 = 2,66$. Demnach wird:

$$I_{K, a_3, III} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 14,15} \cdot 2,66 = 0,685 \text{ kA}.$$

Für Ermittlung des zweipoligen Dauerkurzschlußstromes sind entsprechend der Beziehung:

$$I_{K, a_2} = \frac{1,05 \cdot U}{2 \cdot \left(\frac{x_a}{2} + x_s + X_n \right)} \cdot k_2 \text{ kA},$$

die hier für x_a , x_s und X_n zutreffenden Werte in die Ersatzbilder einzufügen und der Rechnung zugrunde zu legen.

1) Für die Berechnung der Kurzschlußströme in Drehstrom-Niederspannungsnetzen bis 500 V, die unmittelbar von selbständigen Umspannerwerken gespeist werden, sei auf ein Verfahren hingewiesen¹, das an Hand einiger weniger Kennlinientafeln hinreichend zuverlässige Ergebnisse liefert. Hierauf näher einzugehen würde zu weit führen.

¹ zur Megede, Dr.-Ing., u. P. Reinshagen: Vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der Kurzschlußströme in Drehstrom-Niederspannungsanlagen. Siemens-Z. 1930 Heft 1.

Für stark vermaschte und mehrfach gespeiste Netze ist das Rechenverfahren überaus umständlich und zeitraubend. Man bedient sich dann vorteilhafter auch hier der Netzmodelle¹. Für das zu untersuchende Netz wird ein widerstandsgetreues Abbild geschaffen, an das eine Gleichspannung von bestimmter, jedoch frei wählbarer Größe gelegt wird. Durch unmittelbare Messung der Ströme in den einzelnen Leitungszweigen kann man ihre Verteilung, sowie den Kurzschlußstrom an beliebiger Stelle des Netzes bestimmen. Erregung, Sättigung und Ankerrückwirkung der Maschinen werden durch Zwischen-

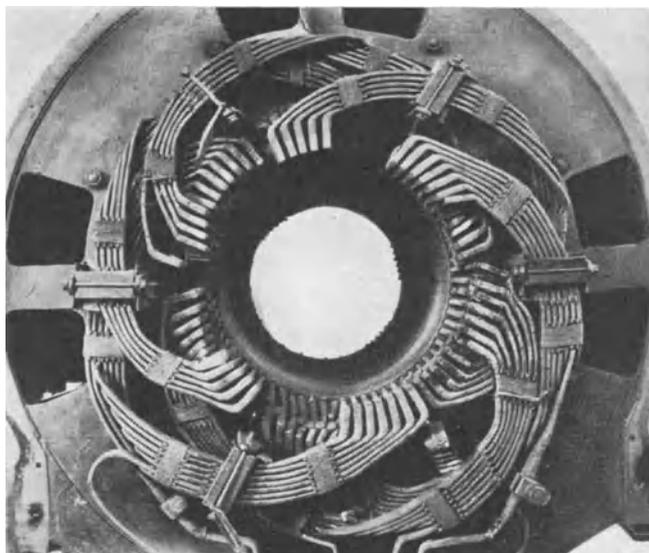


Abb. 249. Durch Kurzschlußkräfte zerstörte Ständerwicklung eines Stromerzeugers.

rechnungen, Vorbelastungen durch Hinzufügen von Widerständen berücksichtigt.

m) Die Kurzschlußbeanspruchung der Maschine² erstreckt sich auf Ständer und Läufer. Bei ungenügender Befestigung und Versteifung der Ständerwickelungsköpfe können diese infolge der anziehenden magnetischen Kräfte zwischen Spulenkopf und Ständereisen, sowie zwischen Spulenköpfen verschiedener Phasen und den abstoßenden Kräften zwischen Erregerwicklung und Spulenkopf derartig hohe mechanische Beanspruchungen erfahren, daß eine Verlagerung und Verschiebungen der einzelnen Leiter oder Spulen gegeneinander eintritt. Sie können verbogen und dadurch in ihrer Isolation stark beschädigt

¹ Koch, W., u. R. Völzing: Netzwidestandsabbild zur Bestimmung der Stromverhältnisse im Netz. Siemens-Z. 1934 Heft 6.

² Lasswitz, E.: Mechanische Wirkung von Kurzschlüssen auf Läufer und Ständer der Wechselstromgeneratoren. Bergmann-Mitt. 1928 S. 182. Biermanns, J.: Überströme in Hochspannungsanlagen. Berlin: Julius Springer 1926.

werden. Ein Durchschlag und damit eine völlige Zerstörung der Wicklung ist die Folge (Abb. 249). Hierauf wurde auf S. 156 bereits hingewiesen.

Auf den Läufer wirken die Kurzschlußkräfte als zusätzliche Drehmomente, die ihre Richtung wiederholt und mit großer Schnelligkeit wechseln. Nicht sicher fundierte Maschinen können dadurch in ihrer Fundamentbefestigung erschüttert, sogar vom Fundament losgerissen werden. Auch die Beanspruchung des Maschinengehäuses ist dabei zu beachten, besonders wenn dieses nicht aus Guß, sondern aus geschweißten Blechen hergestellt ist. Bei der liegenden Welle wird diese Beanspruchung einwandfrei vom Gehäuse selbst und von seiner Fundamentbefestigung aufgenommen werden können, wobei allerdings das drehbar gelagerte Gehäuse besonderer Vorsicht bedarf. Bei der stehenden Welle richtet sich die Gehäusebeanspruchung nach der Form der Wellenlagerung (S. 166).

Besonders empfindlich gegen die erwähnten Drehmomentschwankungen ist die Wellenleitung. Der Betrieb muß verlangen, daß bei großen Maschinen die Welle entsprechend nachgerechnet wird. Infolge der elastischen Eigenschwingungen der Welle darf die Schwingungszahl der durch den Kurzschluß ausgelösten erzwungenen Schwingungen nicht in der Nähe der Eigenschwingungszahl der Welle liegen, um jede Resonanzgefahr auszuschließen.

Weiter ist darauf aufmerksam zu machen, daß das Kurzschlußmoment die Welle unter Umständen weit über das zulässige Maß (kg/cm^2) beanspruchen und zum Bruch bringen kann. Solche Fälle sind bereits vorgekommen. Wird die Welle vom Hersteller der Antriebsmaschine geliefert, müssen die Beanspruchungen vom Hersteller der elektrischen Maschine angegeben werden. Als Richtlinie soll gelten, daß die Eigenschwingungszahl der Welle so hoch liegen muß, daß sie durch die Impulse bei zwei- oder dreipoligem Kurzschluß nicht erregt wird und zur Resonanz führen kann. Bei Kolbenmaschinenantrieb liegen die Verhältnisse ungünstiger, weil zur Erhöhung des Schwungmomentes des Läufers oft noch ein Zusatzschwungrad vorhanden ist, das ein größeres Schwungmoment als der Läufer selbst besitzt. Bei Turbinenantrieb ist dagegen das Schwungmoment des Turbinenläufers stets sehr klein.

Für die Berechnung des Maschinenfundamentes¹ hat der Hersteller der elektrischen Maschinen dem Bauingenieur die erforderlichen Kräftepläne und Kräfteangaben zu machen und dabei auch auf alle Einzelheiten hinzuweisen, die für die Fundierung von besonderer Bedeutung sind.

n) **Erwärmung der Schaltanlagenteile durch Kurzschlußströme.**
a) **Leiter.** Die Kurzschlußströme haben je nach Höhe und Dauer eine zusätzliche Erwärmung der Schaltanlagenteile zur Folge². Hierdurch wer-

¹ Winkelsträter, H.: Kurzschlußkräfte und Fundamentbelastungen. VDE-Fachberichte 1936 S. 90 (dort auch weitere Schrifttumsangaben). Biermanns, J.: Magnetische Ausgleichsvorgänge in elektrischen Maschinen. Berlin: Julius Springer 1919. Richter, R.: Elektrische Maschinen III. Berlin: Julius Springer 1932. Richtlinien für den Bau von Dampfturbinen-Fundamenten in Eisenbeton. Bauing. 1933 S. 227.

² Binder, L.: Kurzschlußerwärmung in Kraftwerken und Überlandnetzen. ETZ 1916 Heft 44/45.

den Leiter und Isolierstoffe oftmals weit über das zulässige Maß hinaus beansprucht. In Stromerzeugern und Umspannern ist die Temperatursteigerung bei richtig bemessenen Wicklungen unerheblich vorausgesetzt, daß die Schutzeinrichtungen ordnungsmäßig ansprechen. Stromwandler, Hauptstromauslöser, Trennschalter, Durchführungen, Kabel und blanke Leiter dagegen müssen den Wärmewirkungen entsprechend bemessen werden. In vielen Fällen ist deshalb auf Grund der Kurzschlußerwärmung ein wesentlich größerer Leiterquerschnitt notwendig als ihn der Regelbetriebsstrom erfordert. Die Abschaltung des Kurzschlusses erfolgt in verhältnismäßig kurzer Zeit, so daß die natürliche Wärmeableitung in der Rechnung vernachlässigt werden kann.

In einem Leiter wird vom Strom $I_{K,a}$ in der Zeit t die Wärmemenge:

$$I_{K,a}^2 \cdot r_l \cdot t = \frac{I_{K,a}^2 \cdot l \cdot t}{\kappa \cdot q} \text{ Ws (Wattsekunden)} \quad (154)$$

erzeugt, die einem Wärmearbeit von: $G \cdot c \cdot \Delta \vartheta$ Wärmeeinheiten entspricht.

Durch Umrechnung ergibt sich:

$$\frac{I_{K,a}^2 \cdot l \cdot t}{\kappa \cdot q} = 4,18 \cdot c \cdot G \cdot \Delta \vartheta \text{ Ws.} \quad (155)$$

Es bezeichnet:

l Länge des Leiters in m,

t Dauer der Belastung in s,

κ elektrische Leitfähigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}$,

q Leiterquerschnitt in mm^2 ,

G Gewicht des Leiters in g,

γ spezifisches Gewicht in g/cm^3 ,

c spezifische Wärme in $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$,

$4,18 c$ spezifische Wärme in $\frac{\text{Ws}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$,

$\Delta \vartheta$ Erwärmung (Temperaturerhöhung in der Zeit t) in $^\circ\text{C}$,

j Stromdichte in A/mm^2 ,

w Wärmeentwicklung in $\frac{\text{Ws}}{\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$.

Aus Gl. (155) folgt die Erwärmung:

$$\Delta \vartheta = \frac{j^2 \cdot t}{w \cdot \kappa} ^\circ\text{C}, \quad (156)$$

oder die Belastungsdauer:

$$t = \frac{\Delta \vartheta \cdot w \cdot \kappa}{j^2} \text{ s.} \quad (157)$$

Mit diesen Gleichungen ist nur die durch den Dauerkurzschlußstrom hervorgerufene Temperaturerhöhung gegeben. Sie nimmt dessen Wirkungszeit entsprechend gleichmäßig zu, während die Temperatursteigerung durch den Stoßkurzschlußstrom am Anfang rascher vor sich geht. Dessen Einfluß wird durch eine um die Zuschlagzeit Δt verlängerte

Wirkungszeit des Dauerkurzschlußstromes berücksichtigt¹. Diese hängt vom Verhältnis Stoßkurzschlußwechselstrom zu Dauerkurzschlußstrom ab; sie kann, sobald die Stromerzeuger unmittelbar auf das Netz arbeiten und die numerische Kurzschlußentfernung klein ist, bis zu einigen Sekunden betragen.

Für den dreipoligen Kurzschluß ist:

$$\Delta t_3 = \frac{I_{K, st w}^2}{I_{K, a_3}^2} \cdot \left(0,1 + \frac{0,3}{a_3^2}\right) \text{ s}, \tag{158}$$

für den zweipoligen Kurzschluß:

$$\Delta t_2 = \frac{I_{K, st w}^2}{I_{K, a_2}^2} \cdot \left(0,1 + \frac{0,3}{a_2^2}\right) \text{ s}. \tag{159}$$

Bei Klemmenkurzschluß wird der Klammerausdruck, die Summe der Zeitfestwerte des abklingenden Gleich- und Wechselstromgliedes, 0,4 s und nimmt bei großer numerischer Kurzschlußentfernung a den Wert 0,1 s an.

Als Mittelwert kann gesetzt werden:

$$\Delta t_3 \cong 0,3 \cdot \frac{I_{K, st w}^2}{I_{K, a_3}^2} \text{ s}, \tag{160}$$

$$\Delta t_2 \cong 0,6 \cdot \frac{I_{K, st w}^2}{I_{K, a_2}^2} \text{ s}. \tag{161}$$

Ist I_{K, a_2} um 40 bis 45 vH größer als der dreipolige Dauerkurzschlußstrom, wird $\Delta t_3 \cong \Delta t_2$. Den Verlauf von Δt_3 und Δt_2 zeigt Abb. 250 in Abhängigkeit vom Verhältnis $I_{K, st w}/I_{K, a}$.

Legt man der Rechnung zur Ermittlung des erforderlichen Querschnittes die in Zahlentafel 24 zusammengestellten Werte für die verschiedenen Baustoffe zugrunde, ferner für Kabel eine Betriebstemperatur von 45° C und eine Höchsttemperatur von 150° C, für blanke Leiter eine Betriebstemperatur von 50° C und eine Höchsttemperatur von 300°, so ergeben sich unter Vernachlässigung der Größenänderung für die spezifische Wärme folgende Gl. (162):

Leiterwerkstoff	Kabel	Blanke Leiter	}
Aluminium	$q = \frac{I_{K, a} \cdot \sqrt{t + \Delta t}}{80,5} \text{ mm}^2 *$	$q = \frac{I_{K, a} \cdot \sqrt{t + \Delta t}}{115} \text{ mm}^2,$	
Kupfer	$q = \frac{I_{K, a} \cdot \sqrt{t + \Delta t}}{124} \text{ mm}^2 *$	$q = \frac{I_{K, a} \cdot \sqrt{t + \Delta t}}{177} \text{ mm}^2,$	
Magnesium	—	$q = \frac{I_{K, a} \cdot \sqrt{t + \Delta t}}{81,0} \text{ mm}^2.$	

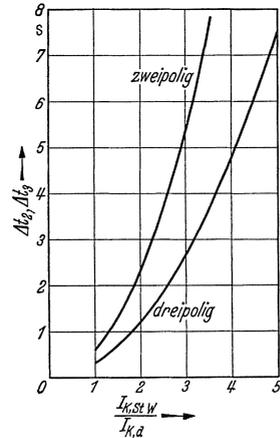


Abb. 250. Kennlinien für Zugschlagszeiten Δt_2 bzw. Δt_3 zur Bestimmung der Erwärmung von Schaltanlagenteilen durch die Kurzschlußströme.

¹ Jacottet, P.: Dämpfung und Wärmewirkung des Stromstoßes bei einfach gespeistem Netzkurzschluß. Arch. Elektr. 1932 Heft 10.

* Die Gl. (162) zur Ermittlung der Kabelquerschnitte gelten für eine Endtemperatur von 150° C bei einer Betriebstemperatur von etwa 45° C, demnach einer

Zahlentafel 24. Festwerte zur Bestimmung der Erwärmung für Aluminium, Kupfer und Magnesium.

	Aluminium	Kupfer	Magnesium
Spezifisches Gewicht g/cm ³	2,7	8,9	1,74
Elektrische Leitfähigkeit bei 20° C m Ohm · mm ²	35,0	57,0	23,0
Spezifische Wärme bei 20° C cal g ° C	0,214	0,0933	0,247
Temperaturbeiwert bei 20° C	0,004	0,004	0,004
Wärmeentwicklung Ws cm ³ ° C	2,4	3,47	1,79
Schmelzpunkt ° C	658	1083	650
Schmelzwärme kcal/kg	100	43,3	70
Spez. Wärmeleitfähigkeit bei 18° C cal cm · s ° C	0,5	0,8 ÷ 0,9	0,382

Für 45 bzw. 50° C Betriebstemperatur kann dann die Erwärmung aus der Gl. (163) gefunden werden zu:

Leiterwerkstoff	Kabel	Blanke Leiter	
Aluminium	$\Delta \vartheta = \frac{j^2 \cdot (t + \Delta t)}{75,6} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta \vartheta = \frac{j^2 \cdot (t + \Delta t)}{75} \text{ } ^\circ\text{C}$,	}
Kupfer	$\Delta \vartheta = \frac{j^2 \cdot (t + \Delta t)}{179} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta \vartheta = \frac{j^2 \cdot (t + \Delta t)}{176} \text{ } ^\circ\text{C}$,	
Magnesium	—	$\Delta \vartheta = \frac{j^2 \cdot (t + \Delta t)}{36,6} \text{ } ^\circ\text{C}$.	

Da in der letzten Zeit auch Magnesium¹ im Schaltanlagenbau (Flachleiter ab 500 mm²) verwendet wird, sind die Werte für diesen

Erwärmung von 105° C während der Zeit $t + \Delta t$. Die Hersteller lassen jedoch heute in der Mehrzahl der Fälle je nach den Verlegungsverhältnissen bei Kabeln bis 3 kV eine Endtemperatur von etwa 205° C, bei Kabeln von 3 bis 20 kV eine solche von 165° C zu, also Erwärmungen von 160° bzw. 120° C. In diesen Fällen ist zu setzen:

In Gl. (162) für Al-Kabel statt „80,5“: 98,5 bei Kabeln bis 3 kV,
88,5 bei Kabeln von 3 bis 20 kV,
für Cu-Kabel statt „124“: 150,0 bei Kabeln bis 3 kV,
132,5 bei Kabeln von 3 bis 20 kV.

Zu beachten ist ferner, daß die Verhältnisse um so günstiger werden, je größer $t + \Delta t$ ist, da dann bereits eine merkliche Wärmeabgabe erfolgt, die Beanspruchung der Kabelisolation also geringer wird (Band II 3. Aufl. S. 422 u. f.).

¹ Almers, H.: Vorschriften und Bestimmungen über die Verwendung von Magnesium für Stromschienen. Elektr.-Wirtsch. 1938 Nr. 32 S. 825.

Leiterwerkstoff mit aufgenommen. Die Verschiedenheit der elektrischen Leitfähigkeiten von Aluminium und Magnesium hat zur Folge, daß die Strombelastbarkeit bei Magnesium geringer ist als bei querschnittsgleichem Aluminium. Dies geht aus der Gl. (164)

$$I_{Mg}^2 \cdot r_{l, Mg} = I_{Al}^2 \cdot r_{l, Al} \quad (164a)$$

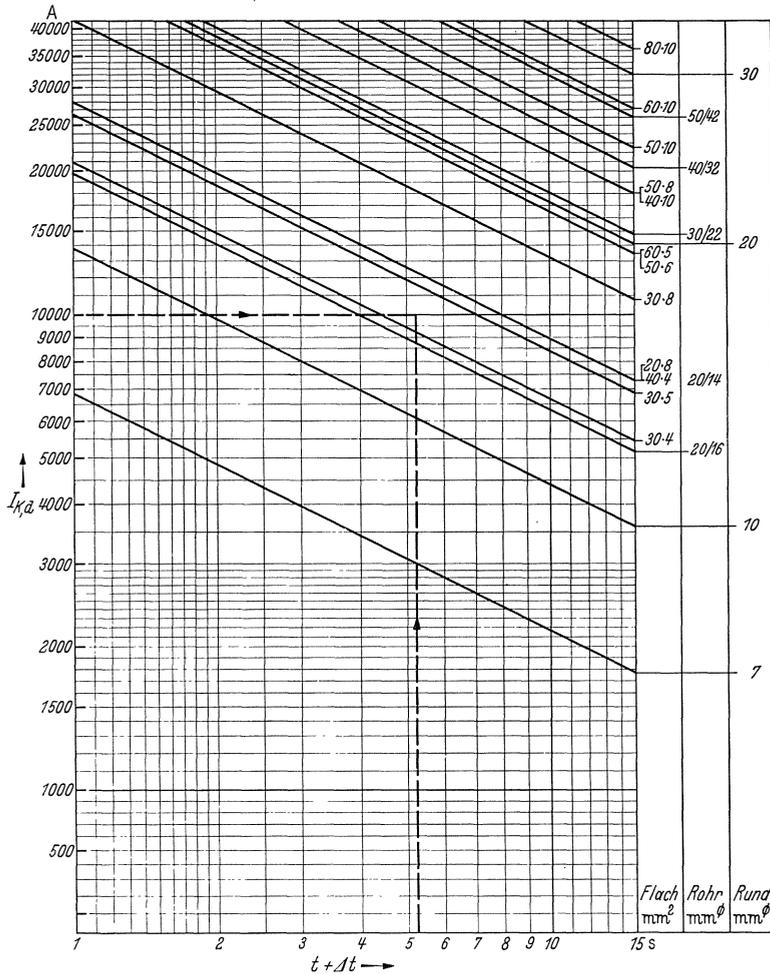


Abb. 251. Mindestquerschnitte blanker Kupferleiter in Abhängigkeit von Dauerkurzschlußstrom und Kurzschlußdauer.

hervor, die für I_{Mg} ergibt:

$$I_{Mg} = I_{Al} \cdot \sqrt{\frac{\kappa_{Mg}}{\kappa_{Al}}} = I_{Al} \cdot \sqrt{\frac{23}{35}} \approx 0,8 \cdot I_{Al} \quad (164b)$$

Ein guter Mittelwert für reines Magnesium ist $\kappa = 23 \frac{\text{m}}{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}$.

Die elektrische Leitfähigkeit liegt je nach Reinheitsgrad und Belastungstemperatur zwischen 19 und $26 \frac{\text{m}}{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}$, wobei $\kappa = 19$ der kleinstzulässige Wert sein dürfte. Mit Rücksicht auf die Entzündungsgefahr

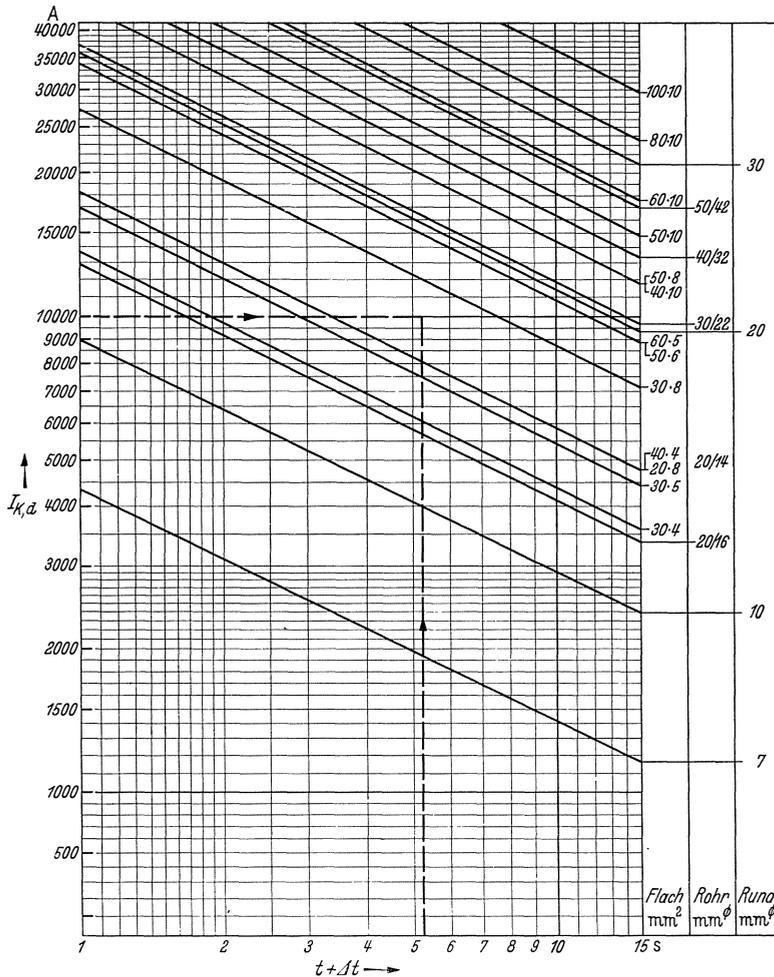


Abb. 252. Mindestquerschnitte blanker Aluminiumleiter in Abhängigkeit von Dauerkurzschlußstrom und Kurzschlußdauer.

werden unter Beachtung eines gewissen Sicherheitszuschlages stets nur Leiter über 10 mm^2 zu verwenden sein. Die Erwärmung durch Kurzschlußströme ist bei Magnesium infolge der größeren Oberflächen und der besseren Wärmeleit- sowie Strahlungsfähigkeit günstiger, die Sicherheit gegen Lichtbogen infolge des etwas niedrigeren Schmelzpunktes und der geringeren Schmelzwärme ungünstiger. Die Verbrennungsrückstände sind bei Magnesium genau so gering wie bei Aluminium und ebenfalls

nicht leitend, so daß auch bei diesem Werkstoff ein Lichtbogen örtlich begrenzt bleibt. Zu beachten ist aber, daß zur Entzündung gebrachtes Magnesium starkes Spritzfeuer zur Folge hat. Um die Bedienung und die übrigen Anlagenteile nicht zu gefährden, wird seine Verwendung

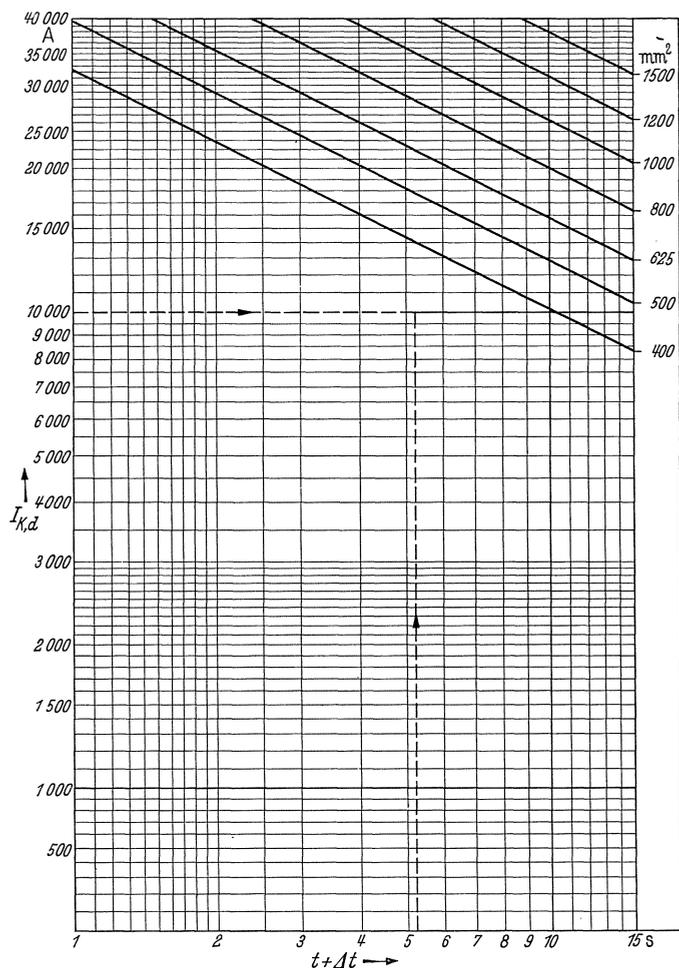


Abb. 253. Mindestquerschnitte für blanke Magnesiumleiter in Abhängigkeit von Dauerkurzschlußstrom und Kurzschlußdauer.

unter besonderen Schutzmaßnahmen vorerst auf die Sammelschienen selbst beschränkt bleiben.

Aus den Abb. 251 bis 255 sind die mit Rücksicht auf Erwärmung jeweils zu wählenden Mindestquerschnitte der Leiter bei verschiedenen Ausführungen und Werkstoffen zu ersehen.

19. Beispiel: $I_{K,sw} = 40 \text{ kA}$, $I_{K,d3} = 10 \text{ kA}$,
 Kurzschlußdauer: $t = \text{Schalt ereigenzeit} + \text{Auslösezeit} = 0,14 + 0,26 = 0,4 \text{ s}$.

Ferner: $\frac{I_{K, stW}}{I_{K, d3}} = 4$; Δt_3 aus Abb. 250 = 4,8 s,

somit: $t + \Delta t = 5,2$ s.

Als Mindestquerschnitte sind bei 300° bzw. 150° C Höchsttemperatur zu wählen:

blankes Kupfer . .	30 · 5 mm ²	Kupferkabel . .	240 mm ²
blankes Aluminium	30 · 8 mm ²	Aluminiumkabel	300 mm ²

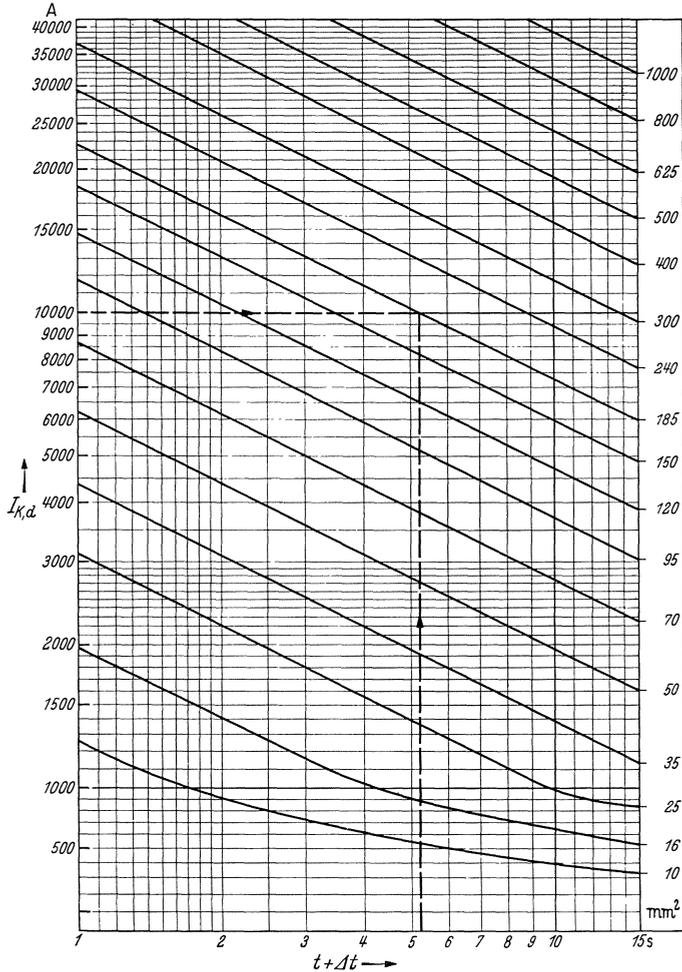


Abb. 254. Mindestquerschnitte für Kupferkabel in Abhängigkeit von Dauerkurzschlußstrom und Kurzschlußdauer.

b) Für Hauptstromauslöser, Durchführungen und Wandler wird der Effektivwert des Stromes, dessen Wärmewirkungen diese Anlageteile und Schaltgeräte, ohne beschädigt zu werden, 1 s lang aushalten können, als thermischer Grenzstrom angegeben. Es ist:

$$I_{therm} = I_{K,d} \cdot \sqrt{t + \Delta t} \quad \text{A-Sekundenstrom.} \quad (165)$$

Für den Leiterquerschnitt erhält man die Gl. (166):

$$q = \frac{I_{therm}}{I_z} \text{ mm}^2, \quad (166)$$

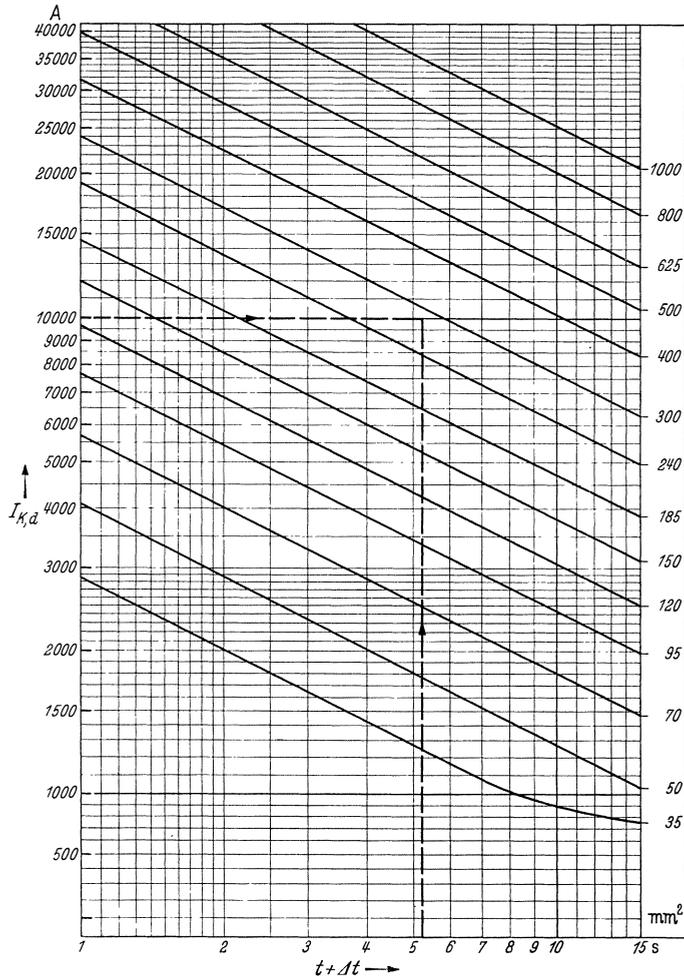


Abb. 255. Mindestquerschnitt für Aluminiumkabel in Abhängigkeit von Dauerkurzschlußstrom und Kurzschlußdauer.

worin:

$t + \Delta t = [\text{Eigenzeit} + \text{Auslösezeit}] + \text{Zuschlagzeit für Stoßkurzschlußstrom in s.}$

I_z den höchstzulässigen Sekundenstrom für 1 mm^2 Leiterquerschnitt, bei dem die Höchsttemperatur 200°C nicht überschritten

wird, in $\frac{\text{A} \cdot \sqrt{\text{s}}}{\text{mm}^2}$ bezeichnet. Es ist:

$$\left. \begin{array}{l} \text{bei Kupfer } I_Z = 180 \frac{\text{A} \cdot \sqrt{\text{s}}}{\text{mm}^2}, \\ \text{bei Aluminium . . . } I_Z = 118 \frac{\text{A} \cdot \sqrt{\text{s}}}{\text{mm}^2}, \\ \text{bei Magnesium . . . } I_Z = 76 \frac{\text{A} \cdot \sqrt{\text{s}}}{\text{mm}^2}. \end{array} \right\} \quad (167)$$

Aus Gl. (167) folgt, daß für je 180 bzw. 118 oder 76 A-Sekundenstrom 1 mm² Hauptleiterquerschnitt erforderlich ist. Für den Regelfall beträgt die Stromdichte bei Nennstrom 1 bis höchstens 3 A/mm²; daraus folgt, daß die Geräte den 180- bzw. 90- oder 60fachen Nennstrom eine Sekunde lang aushalten.

Auslöser. Bei unverzögerter Auslösung beträgt der zulässige Dauerkurzschlußstrom:

$$I_{K,a} = 120 \cdot I_A \quad \text{A} . \quad (168)$$

I_A Nennstrom des Auslösers in A.

Bei verzögerter Auslösung ist den Vorschriften entsprechend:

$$I_{therm} = 60 \cdot I_A \quad \text{A} \quad (169)$$

und somit:

$$I_A = \frac{I_{K,a} \sqrt{t + \Delta t}}{60} .$$

Durchführungen. Unter Zugrundelegung der vom VDE genormten Abmessungen und Leiterquerschnitte erhält man für die Durchführungen mit Porzellan- und Hartpapierüberwurf die in Zahlentafel 25 angegebenen Werte:

20. Beispiel: Der größtmögliche Dauerkurzschlußstrom $I_{K,a}$ betrage nach überschlägigen Berechnungen an der Einbaustelle 8000 A und seine Wirkungszeit $(t + \Delta t) = 4$ s. Es folgt somit:

$$I_{therm} = 8000 \cdot \sqrt{4} = 16000 \text{ A} = 16 \text{ kA} .$$

Es wird nach Zahlentafel 25 noch mit Durchführungen für 350 A Nennstrom auszukommen sein, da die bei überschlägigen Berechnungen ermittelten Kurzschlußströme meist höher als die tatsächlich auftretenden sind.

Trennschalter. Für die den VDE-Vorschriften entsprechenden Trennschalter sind Richtwerte für den thermischen Grenzstrom in Zahlentafel 26 angegeben. Diese können als gute Mittelwerte gelten, da die Kurzschlußbelastbarkeit selbstverständlich von den bei den einzelnen Herstellern gewählten Ausführungsformen abhängt.

Stromwandler müssen ebenfalls den stärksten Kurzschlußströmen standhalten. Die im Kurzschlußfall über die Primärwicklung fließenden Ströme erwärmen die Wicklungen stark und führen bei Überschreiten der Grenztemperatur, etwa 200° C, zur Verkohlung der Isoliermittel. Oftmals völlige Zerstörungen der Wandler und damit außerordentlich schwere Betriebsstörungen sind die Folge, zumal in der Mehrzahl der Fälle auch benachbarte Anlageteile in Mitleidenschaft gezogen werden. Bei allen Entwurfsarbeiten ist daher von vornherein zu

Zahlentafel 25. Zulässiger Dauerkurzschlußstrom für Durchführungen mit Cu-Leiter.

	Nennstrom A	$I_{K,a}$ in A bei $t + \Delta t =$									
		I_{therm} A	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Durchführungen mit Porzellanüberwurf	350	29000	20500	16750	14500	12960	11850	10950	10230	9675	9195
	600	55000	38900	31750	27500	24600	22450	20800	19450	18335	17400
	1000	120000	85000	69250	60000	53700	49000	45400	42500	40000	38000
	1500	200000	141300	115200	100000	89500	81700	75600	70750	66650	63250
Durchführungen mit Hartpapierisolation	350	24000	16950	13850	12000	10720	9800	9080	8500	8000	7600
	600	46000	32500	26800	23000	20600	18800	17400	16250	15320	14550
	1000	105000	74450	60750	52600	47100	43000	39800	37200	35100	33300
	1500	170000	120000	98000	85000	76000	69500	64250	60100	56600	53800
	2000	280000	198000	161600	140000	125200	114200	106000	99000	93300	88600

überprüfen, ob die thermische Festigkeit der gewählten Wandler für die im Kurzschluß auftretenden Beanspruchungen ausreichend ist.

Bei den heutigen Ausführungsformen beträgt:

$$I_{therm} \cong 80 \text{ bis } 120 I_{Wa1} \text{ A-Sekundenstrom} \quad (170)$$

I_{Wa1} Nennstrom des Wandlers nach der Oberspannungsseite in A.

Genauere Angaben über die Höhe des zulässigen thermischen Grenzstromes sind aus den Listen der Hersteller zu ersehen.

Zahlentafel 26.

Mit Rücksicht auf die Erwärmung zulässige Dauerkurzschlußströme für Trennschalter. (Mittelwerte.)

Nennstrom A	I_{therm} A-Sekundenstrom
200	13000
350	22000
600	33000
1000	52000
1500	70000
2000	100000
3000	100000

21. Beispiel: Es soll ein Stützer-Stromwandler Reihe 100 mit einem Übersetzungsverhältnis 100/5 A eingebaut werden, dessen thermischer Grenzstrom das 110fache des primären Nennstromes beträgt. Es ist zu untersuchen, ob der Wandler in thermischer Hinsicht einem Dauerkurzschlußstrom von 10000 A bei $t + \Delta t = 4$ s gewachsen ist.

Thermischer Grenzstrom des Wandlers:

$$I_{therm} = 110 \cdot I_{Wa} = 110 \cdot 100 = 11000 \text{ A-Sekundenstrom,}$$

zulässiger Dauerkurzschlußstrom bei $t + \Delta t = 4$ s:

$$I_{K,a} = \frac{I_{therm}}{\sqrt{t + \Delta t}} = \frac{11000}{\sqrt{4}} = 5500 \text{ A.}$$

Die thermische Festigkeit des Wandlers ist also zu gering. Es muß ein Wandler mit dem Übersetzungsverhältnis 200/5 A gewählt werden.

c) Umspanner. Diese werden heute in ihrem inneren Aufbau praktisch kurzschlußsicher hergestellt. Es ist dazu nichts Besonderes zu sagen. Die RET setzen fest, welchem Stoßkurzschlußstrom die Umspanner gewachsen sein müssen¹.

Bei ihrer Aufstellung ist durch entsprechende Verankerungen dafür zu sorgen, daß bei Kurzschlußbeanspruchungen keine Platzveränderung möglich ist, da damit die Durchführungsisolatoren, Rohrleitungen für Ölausdehnungsgefäße u. dgl. gefährdet werden können.

14. Die Schalt- und Schutzgeräte für Wechselstrom über 1000 V.

Unter den in diesem Kapitel zu behandelnden Schalt-, Schutz- und Überwachungsgeräten werden die Hochspannungsschaltgeräte aller Art mit dem Schaltzubehör für die Betätigung und Auslösung zusammengefaßt. Von der Beschreibung und Erläuterung der Arbeitsweise der einzelnen Schaltgeräte wird wiederum insoweit abgesehen, als das nicht zum besonderen Verständnis der dem Schaltgerät gestellten Aufgabe notwendig erscheint.

a) **Die Hochspannungsschmelzsicherungen.** Grundsätzlich gilt das bereits zu den Niederspannungs-Schmelzsicherungen Gesagte auch für die Hochspannungssicherung, wobei hervorzuheben ist, daß der Verwendung der heutigen Hochspannungssicherung keine Bedenken mehr entgegenstehen, wenn die früher genannten Nachteile keine wesentliche Rolle für ihre Wahl spielen.

Es ist selbstverständlich, daß die Sicherungen den VDE-Bestimmungen entsprechen müssen. Immerhin erscheint es zweckmäßig, einige für den Betrieb besonders wichtige Einzelheiten der REH kurz zu erwähnen, um die Unterschiede leichter zu übersehen, die für die Auswahl und die Arbeitsweise gegenüber den später behandelten Schaltern zu beachten sind.

Schaltvermögen. Jede Sicherung muß ihr Nennausschaltvermögen und jeden kleineren Ausschaltstrom bei ihrer Nennspannung und einem Leistungsfaktor des Kurzschlußkreises $\cos \varphi_k \leq 0,15$ beherrschen. Jede Sicherung muß für das für ihre Nennspannung angegebene Nennausschaltvermögen und jeden kleineren Ausschaltstrom auch bei der 1,15fachen Nennspannung beherrschen.

Für das Nennausschaltvermögen von Sicherungen gelten folgende genormten Nennausschaltströme (Effektivwerte):

0,2; 0,4; 0,6; 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; 10; 15; 20; 30; 40; 60 kA .

Für die Auswahl von Sicherungen sind die schwersten am Verwendungsort möglicherweise auftretenden Beanspruchungen durch Ausschaltstrom, wiederkehrende Spannung, Einschwingvorgang und Leistungsfaktor des Kurzschlußkreises zugrunde zu legen. Die Sicherung ist daher auszuwählen: für einen induktiven ($\cos \varphi_k \leq 0,15$) Ausschaltstrom, der gleich oder größer als der größtmögliche Stoßkurzschlußwechselstrom an der Verwendungsstelle ist bei einer wiederkehrenden Spannung gleich der Nennspannung der Sicherung.

¹ VDE 0532/XII 1937 Regeln für Bewertung und Prüfung von Transformatoren. Prinz, H.: Thermisches Verhalten von Öltransformatoren bei Klemmenkurzschluß. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 1938 XVII. Bd. Heft 3 S. 29. Küchler, R.: Thermische Kurzschlußbeanspruchung von Transformatoren. Hochspannungsforschung und Hochspannungspraxis v. J. Biermanns u. O. Mayr 1931 S. 89.

Kennlinien. Die Sicherungskennlinien sollen die mittleren Schmelzzeiten abhängig von den zugehörigen Stromwerten darstellen und sind für die reinen Schmelzzeiten vom kalten Zustand aus im Bereich ≤ 1 min anzugeben. Abweichungen bis zu ± 50 vH von den mittleren Schmelzzeiten sind zulässig.

Die Schmelzzeiten von Sicherungen sollen den in Zahlentafel 27 angegebenen Werten entsprechen.

Die Kennlinien dürfen sich im Laufe der Zeit nicht ändern, wenn die Sicherungen mit Stromstärken bis zum Nennstrom belastet werden.

Für Sicherungen gelten als genormte Nennstromstärken:

- 2, 4, 6, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 75,
- 100, 150, 200, 300, 400, 600 A.

Betrieblich ist ferner auf die auf S. 239 u. f. genannten Forderungen hinzuweisen, die bei Hochspannung noch dahin zu ergänzen sind, daß eine

Zahlentafel 27. Schmelzzeiten von Sicherungen (VDE).

Nennstrom der Sicherung I_n	Überstrom	Schmelzzeit
≤ 60 A	$1,3 I_n$	> 1 h
	$2 I_n$	< 1 h
> 60 A	$1,3 I_n$	> 2 h
	$2 I_n$	< 2 h



Abb. 256. Auspuffgase (Schaltfeuer) beim Ansprechen einer Hochspannungssicherung älterer Bauart durch Kurzschluß.

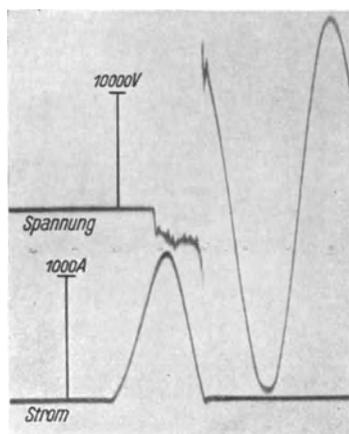


Abb. 257. Abschalten eines Kurzschlußstromes durch eine offene Röhrensicherung; Ausbildung des vollen Kurzschlußstromes und Schaltfeuer.

allmähliche Zerstörung des Schmelzstreifens durch die Koronawirkung nicht eintreten darf. Da die Sicherung unter Umständen eine große Kurzschlußleistung zu unterbrechen hat, ist der Schmelzdraht stets in einen Isolierkörper eingebettet, so daß das beim Schmelzvorgang entstehende Schaltfeuer und die leitenden Auspuffgase (Abb. 256) keine Gefährdung der Bedienung oder der benachbarten Anlageteile herbeiführen können. Eine durchgeschmolzene Sicherung muß von außen sofort mit voller Sicherheit erkannt werden können (Abb. 212).

Die Hochspannungssicherung muß als schnell Schaltendes Schutzgerät wirken. Dann bringt sie den Vorteil, daß der Kurzschlußstrom bereits im Entstehen abgeschaltet wird, sich also der Stoßkurzschluß-

strom nicht vollständig ausbilden kann. Abb. 257 und 258 zeigen Oszillogramme für den Stromverlauf beim Abschalten eines Kurz-

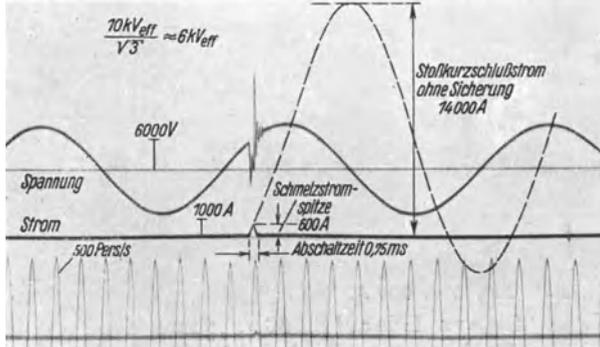


Abb. 258. Abschalten eines Kurzschlußstromes durch eine neue Hochspannungssicherung; Reihe 10,6 A.

schluss durch eine ältere Röhrensicherung und eine neuzeitige schnell-schaltende Hochspannungssicherung.

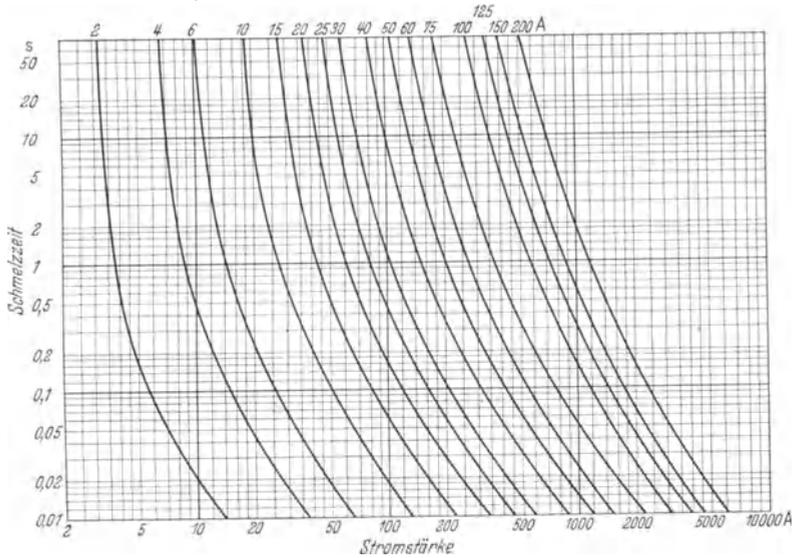


Abb. 259. Schmelzstromstärken von Hochspannungssicherungen in Abhängigkeit von ihren Nennströmen.

Die Hochspannungssicherungen werden für Nennströme innerhalb der Grenzen bis 200 A bei 3 kV und 20 A bei 30 kV gebaut. Der Verlauf der Schmelzkennlinien und die mögliche Staffelung ist aus Abb. 259 zu ersehen. Verwendet werden sie in Anschlußanlagen und kleinen Umspannwerken in Verbindung mit einfachen Trennschaltern. Für kleine

Leistungen können sie auch zum betriebsmäßigen Abschalten unter Last benutzt werden, wenn durch die Bauform dafür gesorgt ist, daß der Schaltlichtbogen sicher abreißt. Für ihre Auswahl ist aber stets die an der Einbaustelle zu erwartende höchste Kurzschlußleistung maßgebend, wie das die REH auch vorschreiben. Aus diesem Grund muß die Kurzschlußberechnung durchgeführt werden.

Da in Hochspannungsanlagen zumeist mehrere Schutzgeräte für Überstrom in Reihenschaltung liegen, ist die Abtrennung einer Fehlerstelle ohne Übergreif auf andere Schaltgeräte auch für das Ansprechen der Sicherung Bedingung. Daher muß das Zusammenarbeiten der in Reihe liegenden Schutzgeräte verschiedener Art durch die Staffelung der Auslösezeiten auch unter Einschluß der Sicherungen sicher gewährleistet sein. Infolge ihrer schnellschaltenden Arbeitsweise ist sie der Schnellauslösung beim Selbstschalter gleichzusetzen. Es muß dabei die Schmelzeit und die Löschzeit des Lichtbogens, die die Abschaltzeit stark beeinflussen kann, bei der zu gewinnenden Staffelung berücksichtigt werden. Ferner muß verlangt werden, daß diese Sicherungen bei elektrischen Stoßbeanspruchungen, wie sie durch Gewitter- und Schaltüberspannungen hervorgerufen werden, nicht abschmelzen (stoßfeste Schmelzleiter, Stoßfestigkeit der Lötstellen)¹.

Beim Umspannerschutz ist darauf zu achten, daß bei einem Fehler auf der Niederspannungsseite die Niederspannungssicherungen vor den Hochspannungssicherungen ansprechen. Das kann durch entsprechende Wahl der letzteren für einen höheren Ansprechstrom (Übersicherung) erzielt werden. Die Hersteller haben für die Auswahl der Sicherungen sehr genaue Kennlinien ermittelt, die für die Bestimmung der Staffelung zu benutzen sind. Es ist zu empfehlen, nach dieser Richtung sich der Mitarbeit der Hersteller zu bedienen.

Die mechanische Kennzeichnung einer durchgebrannten Sicherung wird bei allen neuzeitigen Hochspannungssicherungen auch so ausgeführt, daß sie gleichzeitig ein Meldeschaltstück für Glocke, Hupe oder dgl. schließt oder einen vorgeschalteten Leistungsschalter zur Auslösung bringt (Abb. 260).

b) Die Wechselstrom-Hochspannungsschalter im allgemeinen dienen zum Ein- und Ausschalten unter Leistung oder zum stromlosen Schalten,

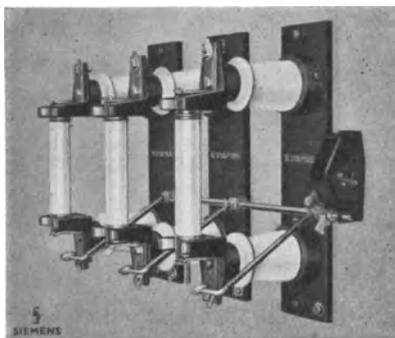


Abb. 260. Dreipolige Hochspannungssicherung mit Abschaltmeldevorrichtung im dreipoligen Sicherungsträger (SSW).

¹ Wrana, J.: Vorgänge in Sicherungen bei elektrischer Stoßbeanspruchung. ETZ 1938 Heft 1 S. 11. Lohausen, K. A.: Die gewitterfeste Ausbildung von Hochspannungs-Mittelleistungssicherungen für geringe Nennstromstärken. AEG-Mitt. 1938 S. 95. Weber, H.: Vorgänge bei Kurzschlußabschaltungen durch Schmelzsicherungen. VDE-Fachberichte Bd. 9. (1937) S. 92.

wobei die stromführenden Teile nicht beiderseits unter Spannung stehen. Im ersten Fall handelt es sich um Leistungsschalter, im zweiten Fall um Trennschalter.

Die vollständige Schalteinheit eines Stromkreises, der von zwei Seiten Spannung in irgendeiner Form, also auch atmosphärisch induzierte Spannung aus einer nicht eingeschalteten Freileitung erhalten kann, muß nach den Errichtungsvorschriften des VDE aus einem Leistungsschalter und je einem Trennschalter vor und hinter dem Leistungsschalter bestehen (Abb. 261). Steht die Spannung nur von einer Seite, so ist auch nur ein Trennschalter erforderlich (Abb. 262).

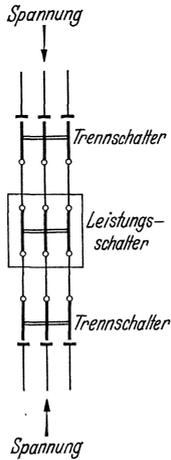


Abb. 261. Schaltbild für Anordnung: Trenn-, Leistungs-, Trennschalter bei zweiseitiger Speisung.

Für die Leistungs- und Trennschalter gelten verschiedene Ausführungsvorschriften. Um die Schaltanlagen zu vereinfachen und ihre Baukosten zu verringern, sind für die Leistungs- und Trennschalter neuerdings noch Bauformen entwickelt worden, die beide Aufgaben mit einem Schaltgerät erfüllen, entweder indem die Trennschalter mit den Leistungsschaltern zusammengesetzt (Abb. 462) werden oder in einem Gerät als Leistungstrennschalter zusammengebaut sind. Die REH geben hierzu klare Begriffserklärungen.

Für die Auswahl der Hochspannungsschaltgeräte sind in den REH ebenfalls besondere Bestimmungen getroffen. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Geräte in Innenraum- oder Freiluftanlagen Verwendung finden sollen, da sich Bauform und Isolation nach diesen Einbauarten zu richten sollen. Diese REH-Bestimmungen lauten:

Nennspannung, Reihenspannung, Nennstrom, Nennfrequenz.

a) Für Hochspannungsgeräte gelten als genormte Nennspannungen:

1, 3, 6, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100, 150, 200 kV.

Hochspannungsgeräte sind so auszuwählen, daß die höchste Netzspannung am Verwendungsort die Nennspannung des Gerätes um nicht mehr als 15 vH überschreitet.

b) Für Hochspannungsgeräte gelten als Reihenspannungen:

1, 3, 6, 10, 20, 30, 45, 60, 80, 100, 120, 150, 200 kV.

1. Hochspannungsgeräte für Innenraumanlagen, die keiner nennenswerten Verschmutzung unterliegen und in denen der Taupunkt der Luft nicht unterschritten wird, sowie für Freiluftanlagen, die keiner nennenswerten Verschmutzung und keinen gut leitenden Feuchtigkeitsniederschlägen ausgesetzt sind, müssen so ausgewählt werden, daß die höchste Netzspannung am Verwendungsort die Reihenspannung der Geräte um nicht mehr als 15 vH überschreitet¹.

¹ Für Erweiterungen bestehender Anlagen mit 35 kV Betriebsspannung dürfen ausnahmsweise Geräte der Reihenspannung 30 kV eingebaut werden.

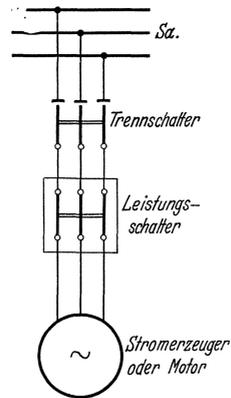


Abb. 262. Schaltbild für Anordnung: Trenn-Leistungsschalter bei einseitiger Speisung.

2. Hochspannungsgeräte für Innenraumanlagen, in die mäßige Staubmengen eindringen können und in denen der Taupunkt der Luft gelegentlich unterschritten wird, sowie für Freiluftanlagen, die mäßiger Verschmutzung und Niederschlägen mäßiger Leitfähigkeit ausgesetzt sind, werden zweckmäßig für die nächsthöhere Reihe ausgewählt als sich nach 1. ergibt. In solchen Innenraumanlagen dürfen nur besonders feuchtigkeitssichere Isolatoren verwendet werden.

3. In Gegenden mit großer Verschmutzungsgefahr und gut leitenden Niederschlägen ist die Innenraumanlage der Freiluftanlage vorzuziehen.

Bei Innenraumanlagen, die großer Verschmutzung oder Feuchtigkeit ausgesetzt sind, empfiehlt sich z. B. die Verwendung gekapselter Geräte oder die Anwendung inneren Überdruckes.

Für Hochspannungsgeräte gelten als genormte Nennstromstärken:

200, 400, 600, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000 A.

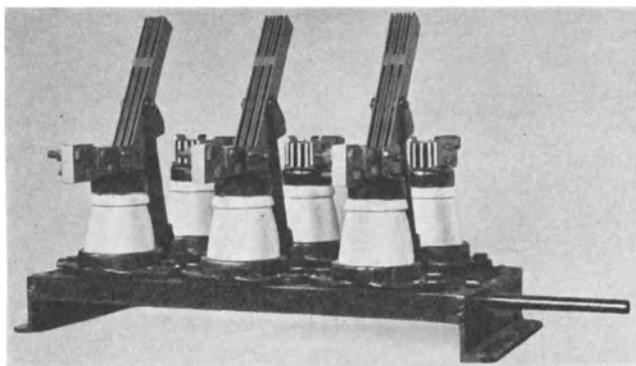


Abb. 263. Dreipoliger Trennschalter Reihe 10, 1000 A.

Hochspannungsgeräte sind so auszuwählen, daß der höchste Betriebsstrom (Mittelwert über etwa 15 min) am Verwendungsort den Nennstrom des Gerätes nicht überschreitet.

Trennschalter und Leistungsschalter unter 200 A Nennstrom sind unzulässig.

Die Nennfrequenz der Hochspannungsgeräte darf von der Betriebsfrequenz um nicht mehr als ± 20 vH abweichen.

e) Der Trennschalter (Abb. 263 bis 265) (Trenner) ist ein Schalter, der besonders dem Schutz der Betriebsmannschaft dient, indem er einen Stromkreis in allen Leitern zuverlässig erkennbar und mit genügendem Isoliervermögen auftrennt. Er wird annähernd stromlos und nur willkürlich d. h. durch Eingriff der Betriebsmannschaft, nicht aber selbsttätig geschaltet. Die Aufgabe, die dem Trennschalter zukommt, ist somit eindeutig festgelegt, und demzufolge soll ihm der Betrieb auch keine weiteren Aufgaben zuweisen etwa darin, daß er zum Abschalten von Leistungen selbst kleinen Ausmaßes gelegentlich oder ständig z. B. in kleinen Umspanneranlagen Verwendung finden soll. Für solche Schaltaufgaben ist der Leistungstrennschalter durchgebildet worden, der weiter unten behandelt wird.

Das Folgende gilt als Ergänzung zu dem im Band I und II Gesagten insbesondere auch im Hinblick auf die REH. Wesentlich ist ferner, daß Trennschalter unter 200 A Nennstrom unzulässig sind. Unzulässig ist auch das selbsttätige Einschalten vom Trennschalter.

Aus den sonstigen REH-Bestimmungen ist weiter zu beachten, daß Trennschalter im geschlossenen Zustand den Kraft- und Wärmewirkungen des größtmöglichen Kurzschlußstromes am Verwendungsort gewachsen sein müssen.

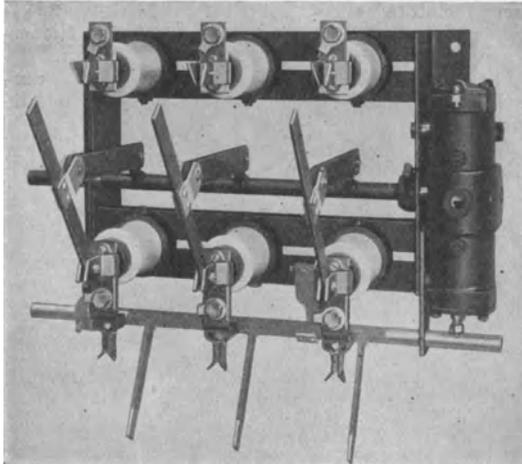


Abb. 264. Dreipoliger Innenraum-Trennschalter mit Erdschalter und Doppelkolben-Druckluftantrieb.

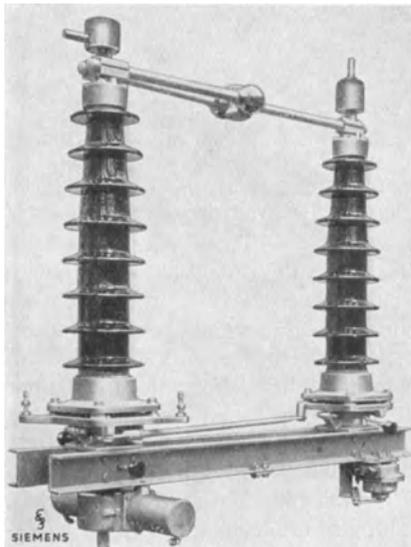


Abb. 265. Freiluft-Drehtrennschalter Reihe 100 mit Doppelkolben-Druckluftantrieb.

Es ist daher bei ihrer Auswahl entsprechend zu verfahren. Für die Bauart ist Vorschrift, daß sie sich unter der Einwirkung des Kurzschlußstromes nicht von selbst öffnen dürfen.

In Schaltanlagen mit sehr großen Strömen oder mit Spannungen über 45 kV werden die Trennschalter, besonders wenn die Gesamtanlage von einer Warte aus gesteuert wird, nicht mehr von Hand, sondern mit Druckluft betätigt. Es gilt dafür das

beim Schalterantrieb Gesagte. Der Antrieb erhält in diesem Fall einen Doppelkolben (Abb. 264), da sowohl die Einschaltung als auch die Ausschaltung mit Druckluft erfolgen muß. Sind im Schaltgang die Schalterbetätigungen jedem Schaltfeld zugeordnet, so sind hier auch die Trennschalterdruckknöpfe unterzubringen und Stellungsanzeiger vorzusehen.

Bei Spannungen über 60 kV müssen alle stromführenden Teile gut abgerundet oder durch kugelförmige Metallkappen abgeschirmt sein, um Leistungsverlust durch Ausstrahlung zu vermeiden.

Handelt es sich um den Anschluß sehr langer 100-kV-Freileitungen oder größerer Kabelstrecken, so ist in der Auswahl

und dem Einbau der Trennschalter Vorsicht geboten, weil beim Öffnen des unbelasteten Stromkreises die infolge der Kapazität zu unterbrechende Leistung so groß sein kann, daß Zerstörungen zu

kleiner Trennschalter, Überspannungen u. dgl. hervorgerufen werden können.

Dort, wo nach dem Abtrennen eines Stromkreises, in der Hauptsache bei Freileitungen, eine Erdung dieses Anlageteiles notwendig ist, um an ihm Arbeiten ausführen zu können, wird der Trennschalter noch mit einem besonderen Erdungsschalter (Abb. 264) versehen. Dieser ist dann durch Zusatzeinrichtungen derart mit dem Trennschalter zu verbinden, daß Fehlschaltungen nicht vorkommen können. Der Erdungsschalter schließt die abgeschalteten Phasen gleichzeitig kurz.

Mit dem Trennschalter darf wie gesagt Leistung nicht geschaltet werden. In ausgedehnten Schaltanlagen und besonders bei Doppelsammelschienen kommt es immer noch vereinzelt vor, daß bei Umschaltungen falsche Trennschalter betätigt werden. Das führt dann zumeist zu recht unangenehmen Betriebsstörungen, zum Verbrennen der

Trennschalter, Lichtbogenbildung, Kurzschluß zwischen den Sammelschienen oder den Leiteranschlüssen zu diesen und zur Gefährdung der Bedienung. Zur Vermeidung solcher Fehlschaltungen werden die Trennschalter mit den zugehörigen Leistungsschaltern bei Hand- und Fernschaltung rein elektrisch, rein mechanisch oder elektrisch-mechanisch so verriegelt, daß ein Aus- oder Einschalten des Trennschalters erst dann möglich ist, wenn der Leistungsschalter ausgeschaltet ist. In gleicher Weise kann die Verriegelung auch zwischen Trenn- und Trennerdungsschalter angewendet werden. Oftmals liegt die Verriegelung zwischen Trenner und Erder im Betätigungs-Druckluftantrieb selbst.

In Anlagen, in denen Druckluft zur Verfügung steht, kann des weiteren zur Verhinderung von Fehlschaltungen ein Druckluftsteuergerät mit druckluftbetätigtem Schaltfehlerschutz verwendet werden¹. Letzterer arbeitet rein mechanisch, ohne in baulichem Zusammenhang mit den Antrieben zu stehen. Im Druckluftsteuergerät (Abb. 279 bis 281) ist jedem Schalter eines Abzweiges ein Riegel mit Aussparungen, ähnlich den Zuhaltungen eines Schlosses zugeordnet, dessen Bewegung von einem Druckluftrückmelder gesteuert wird. Letzterer steht mit dem Antrieb durch je eine „Ein“ und „Aus“ Druckluftrückmeldeleitung in Verbindung. Durch entsprechende Wahl der Aussparungen läßt sich eine weitgehende Abhängigkeit der Schaltvorgänge erzielen. Auch bei nicht ordnungsgemäß gegebenen oder durchgeführten Schaltbefehlen (halboffene Schalter) wird die Verriegelung bereits wirksam.

Abb. 266 zeigt für die elektrisch-mechanische Verriegelung ein Ausführungsbeispiel. Schalter *I* und *II* können weder geöffnet, noch

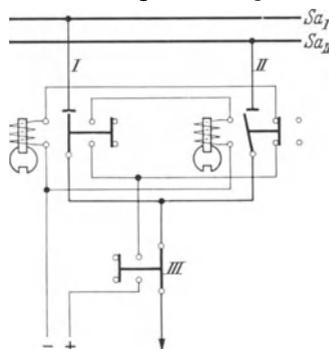


Abb. 266. Elektrisch-mechanische Verriegelung von Trenn- und Leistungsschalter.

¹ Druckluftsteuergerät mit Stellungsrückmeldung und Schaltfehlerschutz. SSW-Druckschrift S. 90 Nr. 436/13. Eisert, J.: Schaltfehlerschutz. ETZ 1938 Heft 1.

geschlossen werden, solange der Leistungsschalter *III* eingeschaltet ist. Ist *III* geöffnet, kann der Trennschalter *I* ebenfalls geöffnet, der Trennschalter *II* aber erst eingelegt werden, wenn Trennschalter *I* geöffnet ist. Für eine elektrisch ferngesteuerte Schaltung zeigt Abb. 267 ein Schaltbild. Zum Schalten des Druckluftantriebes des Trennschalters *2* dienen die Druckknöpfe „Ein“ und „Aus“ im Schaltraum und in der Warte. Die Verriegelungsvorrichtung ist in beiden Fällen der Schaltungsmöglichkeit in Wirksamkeit. Die Steuerventile, die sich auf der Hochspannungsschaltwand befinden, sind mit einem Verriegelungsmagneten *5* ausgerüstet, der im stromlosen Zustand die Betätigung des Trennschalters durch eine mechanische Sperrklinke verhindert unabhängig davon,

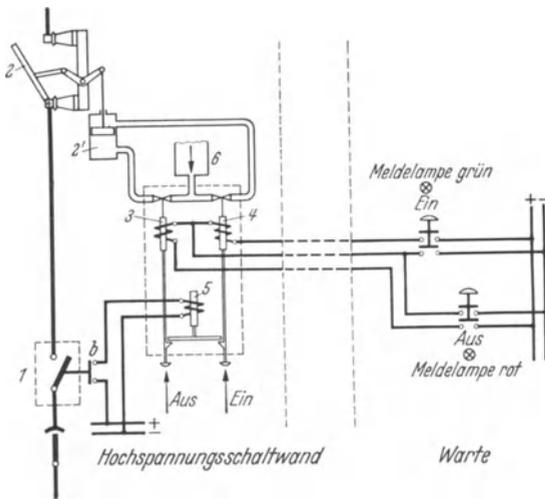


Abb. 267. Ferngesteuerter Trenn- und Leistungsschalter durch Druckluftantrieb mit elektrisch-mechanischer Verriegelung.

ob die Steuerung des Trennschalters *2* durch Niederdrücken der mit Pfeilen versehenen Druckknöpfe von Hand oder durch Betätigen der elektrischen Druckknöpfe in der Schaltwarte erfolgt. Für diese elektrische Betätigung sind die kleinen Steuerspulen *3* und *4* vorgesehen. Durch Öffnen der Steuerventile wird eine Verbindung zwischen dem Druckluftkessel *6* und dem Antriebskolben *2'* im einen oder anderen Sinn so hergestellt, daß der Trennschalter *2* ein- oder ausgeschaltet wird. Die beiden Steuerspulen *3* und *4*, sowie die Verriegelungsspule *5* und die mit Pfeilen versehenen Druckknöpfe sind zu einem kleinen Steuergerät zusammengebaut. Diese Geräte sind, wie aus Abb. 268 zu ersehen ist, auf der Hochspannungs-Schaltwand vereinigt. Auf diese Weise kann die Verriegelungsanordnung einfach und übersichtlich aufgebaut werden, und jeder Schaltwärter ist leicht imstande, die Verriegelungsanordnung auf richtiges Arbeiten nachzuprüfen. Wenn es sich um die Sammelschienen-Trennschalter bei Doppelsammelschienen handelt, wird die Verriegelung der Trennschalter über den Sammelschienen-Kuppelschalter vorgenommen. Dann sind die Trennschalter auch verriegelt, wenn der Betrieb von einer Sammelschiene auf die andere überschaltet werden muß.

Für den elektrischen Teil der Schaltung ist die Ruhestromschaltung gewählt. Beim Ausbleiben des Betätigungsstromes der Verriegelungseinrichtung sind alle Schalter blockiert. Für den Notfall kann diese Verriegelungseinrichtung von Hand aufgehoben werden.

Bei großen ölarmen oder öllosen Leistungsschaltern werden in neuester Bauform die Trennschalter unmittelbar angebaut (Abb. 462 und 465). Das ist nach dem oben Gesagten betrieblich besonders vorteilhaft und verringert zudem die Zahl der Isolatoren.

d) **Der Leistungsschalter** dient zum selbsttätigen und willkürlichen Ein- und Ausschalten beliebiger Ströme bis zu dem für ihn nach seiner Größe geltenden Schaltvermögen. Er ist grundsätzlich entsprechend dem elektrischen Ausschaltvorgang so gebaut, daß der auftretende Lichtbogen durch einen besonderen Löschvorgang so schnell als möglich gelöscht wird, um das Isoliervermögen der Schaltstrecke voll wieder herzustellen. Das Vorhandensein des Lichtbogens ist an die vom Strom selbst erzeugte Temperatur gebunden. Die beim Ausschalten in der Umgebung der Schaltstücktrennung entwickelten Gase werden bei der hohen Temperatur des Lichtbogens von mehreren tausend Grad durch Ioni-

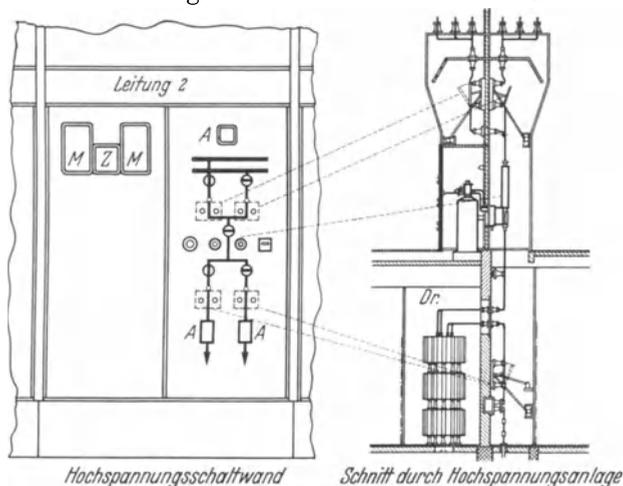


Abb. 268. Trennschaltersteuerung durch Druckluft von der Schaltwand.

sierung leitend. Dem Lichtbogen muß nun durch ein besonderes Kühlmittel mehr Wärme entzogen werden, als ihm durch die zu seiner Erhaltung erforderliche elektrische Energie zufließt. Auf dieses Löschmittel zur Wärmeabführung wird besonders eingegangen werden.

Ein unter Leistung stehendes Schaltgerät, das die Leistung plötzlich unterbrechen soll, hat im Augenblick der Ausschaltung in der Hauptsache der mechanischen Beanspruchung durch den Gas- und Dampfdruck standzuhalten, der in der Schaltstrecke nach der Schaltarbeit A_{Sch} und der Lichtbogenleistung N_{Li} ausgelöst wird¹. Nach Abb. 269 wachsen

¹ Hameister, G.: Der Anstieg der wiederkehrenden Spannung nach Kurzschlußabschaltungen im Netz. ETZ 1936 Heft 36 S. 1025. Mitteilung aus der Abteilung Elektrotechnik der Berliner Kraft- und Licht (Bewag)-Aktiengesellschaft. Krohne: Beitrag zur Frage der Frequenz der wiederkehrenden Spannung bei Kurzschlußabschaltungen. Cigre, Paris 1935, Bericht 116. Hameister: VDE-Fachberichte 1935 S. 42. Kesselring u. Koppelman: Arch. Elektrotechn. Bd. 29 (1935) S. 8.

diese beiden Größen sehr schnell mit der Entfernung der Schaltstücke und der Dauer des Ausschaltlichtbogens und können unter Umständen so groß werden, daß sie zur Schalterzerstörung führen. Je kürzer die Lichtbogendauer ist, je schneller also das Isolierungsvermögen der Schaltstrecke wiederhergestellt wird, was theoretisch am schnellsten geschieht,

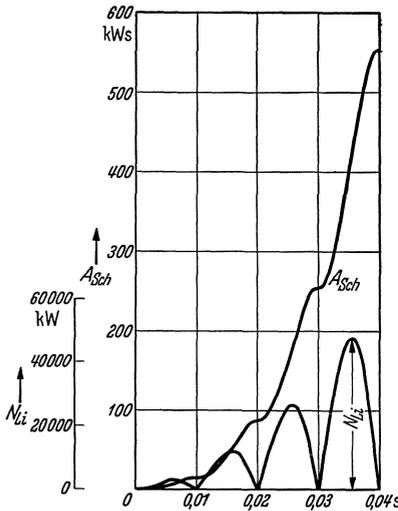


Abb. 269. Lichtbogenleistung N_{Li} und Schaltarbeit A_{Sch} .

wenn beim ersten Stromdurchgang durch Null das Isolierungsvermögen vollständig erreicht ist, um so geringer ist die Beanspruchung und um so geringer die Gefährdung des Schalters. Da der Lichtbogen, wie bereits gesagt, die Isolierstrecke stark ionisiert, erfolgt, wenn das Isolierungsvermögen nicht schon beim ersten Stromdurchgang durch Null vollständig wieder vorhanden ist, durch die wiederkehrende Spannung ein neues Zünden des Lichtbogens und somit immer wieder eine Beanspruchung des Schalters. Die Trennung der Schaltstücke muß daher schneller das vollständige Isolierungsvermögen herbeiführen als die Spannung wiederkehrt. Der wiederkehrenden Spannung kann ein Einschwingvorgang überlagert sein (Abb. 270).

Die Aufstiegs geschwindigkeit ist vom Einschwingverlauf abhängig. Der Einschwingvorgang ist besonders bei Schaltern zu beachten, die vor großen Induktivitäten liegen, wie sie bei Stromerzeugern, Umspannern

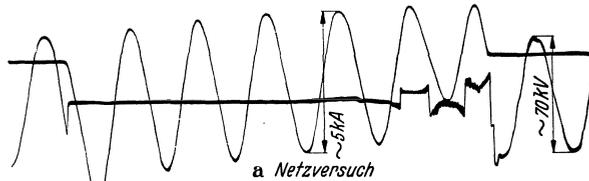


Abb. 270. Wiederkehrende Spannung (Einschwingvorgang).

und Kurzschlußdrosselspulen vorhanden sind, wenn sie einen Kurzschluß hinter einer solchen Induktivität abschalten. Das Produkt aus Ausschaltstrom, wiederkehrender Spannung und Verkettungszahl (bei Drehstrom $\sqrt{3}$) ist die Ausschaltleistung. Das Ausschaltvermögen eines Schalters in Abhängigkeit von der Spannung nach den REH zeigt Abb. 271.

Die nach den REH festgelegten elektrischen Größen zur Kennzeichnung der Leistungsfähigkeit eines Schalters sind: das Nenn einschaltvermögen, das Nenn ausschaltvermögen und der Kurzzeitstrom.

Das Nenneinschaltvermögen ist der Einschaltstrom beim Einschalten auf Kurzschluß (größter Stoßkurzschlußstrom) bei Nennspannung.

Das Nennausschaltvermögen ist das Ausschaltvermögen bei einer wiederkehrenden Spannung gleich der Nennspannung. Es kann entweder durch den Nennausschaltstrom als Stromwert oder die Nennausschaltleistung als Leistungswert angegeben werden. Die Nennausschaltleistung ist das Produkt aus Nennausschaltstrom, Nennspannung und Verkettungszahl (bei Drehstrom $\sqrt{3}$). Bei einem Schalter, der nach seiner Nennspannung verwendet wird, wird das Nennausschaltvermögen durch die Nennausschaltleistung, bei einem Schalter im mittleren Spannungsbereich durch den Grenzausschaltstrom begrenzt, die beide am Verwendungsort nicht überschritten werden dürfen. Dabei ist der Grenzausschaltstrom eines Schalters der Ausschaltstrom, den er höchstens bei einer im allgemeinen geringeren Spannung als seiner Nennspannung beherrschen kann. In besonderen Fällen kann der Grenzausschaltstrom gleich dem Nennausschaltstrom sein.

Der Kurzzeitstrom eines Schalters ist der Strom (Effektivwert), den er während 1 s oder 5 s führen kann, ohne beschädigt zu werden.

Für die Auswahl eines Schalters ist ferner der Leistungsfaktor des Kurzschlußkreises¹ bestimmend. Dieser ist das Verhältnis des Wirkwiderstandes zum Scheinwiderstand, wobei der

$$\text{Scheinwiderstand} = \frac{\text{Wiederkehrende Spannung}}{\text{Ausschaltstrom} \cdot \text{Verkettungszahl}}$$

Der Leistungsfaktor des Kurzschlußkreises soll nach den REH $\cos \varphi_k \leq 0,15$ betragen können.

Für die Auswahl von Schaltern, mit denen Kurzschlußströme unterbrochen werden sollen, sind die schwersten am Verwendungsort möglicherweise auftretenden Beanspruchungen durch Ein- und Ausschaltstrom, wiederkehrende Spannung, Einschwingvorgang und Leistungsfaktor des Kurzschlußkreises zugrunde zu legen. Der Schalter ist daher auszuwählen:

für einen Einschaltstrom mindestens gleich dem größtmöglichen Stoßkurzschlußstrom bei einer Einschaltspannung gleich der Nennspannung des Schalters und

für einen induktiven ($\cos \varphi_k \leq 0,15$) Ausschaltstrom, der gleich oder größer als der bei dem Mindestschaltverzug an der Verwendungsstelle zu

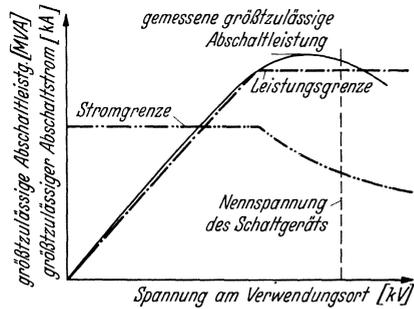


Abb. 271. Verlauf der größtzulässigen Abschaltleistung in Abhängigkeit von der Betriebsspannung.

¹ Siehe Fußnote S. 266.

erwartenden Ausschaltstrom ist bei einer wiederkehrenden Spannung gleich der Nennspannung des Schalters.

Bei Schaltern, deren Nennausschaltvermögen kleiner als die größtmögliche Kurzschlußbeanspruchung an der Verwendungsstelle ist, muß das selbsttätige Ausschalten größerer Ströme verhindert sein.

Die Schalter müssen stets in geschlossenem Zustand den Kraft- und Wärmewirkungen der Kurzschlußströme am Verwendungsort gewachsen sein.

Bei Hochspannung erfordert, wie bereits kurz gesagt, die Löschung des Lichtbogens beim Unterbrechen der Leistung, die über den Schalter geht, ein besonderes Löschmittel, um weiter auch die mit der Unterbrechung ausgelösten Überspannungen zu verhindern oder zum mindesten so stark zu dämpfen, daß sie für die übrigen Anlageteile gefahrlos verlaufen. Bis vor wenigen Jahren wurde nur der Ölschalter verwendet, der mit dem Löschmittel „Öl“ arbeitet und seine Aufgaben bis zu Spannungen von 220 kV und größten Leistungen — auch den dann auftretenden größten Kurzschlußleistungen — befriedigend gelöst hat. Vereinzelt vorgekommene Ölbrände beim Kurzschlußzerknall dieses Schalters wie an sich der Wunsch, die Schaltanlagen von der Ölverqualmungs- und Ölbrandgefahr zu befreien, haben dazu geführt, daß neuerdings ölarme und öllöse Schalter mit besonderen Löscheinrichtungen durchgebildet worden sind. Wenngleich die bisherigen Betriebserfahrungen mit diesen neuen Schalterbauformen als durchaus zufriedenstellend bezeichnet werden können, so ist die Entwicklung im Hochleistungsschalterbau noch keineswegs als abgeschlossen anzusehen, und es erscheint daher verfrüht, betrieblich ein abschließendes Urteil über diese neuen Schalter abzugeben. Es muß aus diesem Grund auch davon abgesehen werden, im einzelnen auf die Schalterbauformen einzugehen.

Grundsätzlich erfolgt die Trennung der Schaltstücke beim Ölschalter in einem großen, mit besonderem Öl gefüllten Kessel. Das Öl tritt ohne oder mit zusätzlichen Vorrichtungen (Löschkammer) zwischen die getrennten Schaltstücke und entzieht dem Lichtbogen so viel Wärme, daß er verlischt bzw. bei der wiederkehrenden Spannung nicht mehr gezündet werden kann. Der beim Ausschalten unter Last auftretende Gasdruck wird über die große Ölfüllung auf die Kesselwand des Ölgefäßes übertragen und muß von dieser ausgehalten werden (druckfester Schalter), oder ein besonderes Auspuffrohr gestattet einen Ausgleich gegen die Atmosphäre.

Unter Berücksichtigung der neueren Schalterbauformen sind Vorteile des Ölschalters nicht mehr zu nennen. Wesentlich sind aber die Nachteile. Sie liegen im besonderen einmal in den großen Ölmengen, die notwendig sind und die beim Stehenbleiben des Lichtbogens durch mechanische Fehler am Schalter (schlechter Schluß der Schaltstücke mit Überhitzung derselben, schlechte Schaltstücktrennung beim Ausschalten, Hängenbleiben im Schaltgestänge, Beschädigung innerer Antriebsteile) zur Entzündung kommen können. Die Folge kann Zerknall des Schalters und ein verheerender Ölbrand mit der Verqualmung und

Verrußung der übrigen Anlageteile sein¹. Des weiteren bedürfen die Schalter besonderer Beaufsichtigung, wenn sie mehrfach hintereinander angesprochen haben, um Beschädigungen der vorgenannten Art rechtzeitig feststellen zu können und den Zustand des Öls zu prüfen, da jeder Lichtbogen das Öl angreift und zersetzt. Bei sehr großen Schaltleistungen und hohen Spannungen müssen die Schaltanlagen sehr wesentlich in ihrer Baudurchbildung auf den gefahrlosen Einbau der Ölschalter abgestellt werden. Das bedingt Zelleneinbau, größeren Raumbedarf, höhere Kosten, vermehrte Bedienung, schlechtere Gesamtübersicht über die Schalteinrichtungen. Im Band I ist hierüber im einzelnen gesprochen worden.

Aus diesen Nachteilen heraus ist der ölarme und öllöse Schalter entstanden. Es würde zu weit führen, auf die Durchbildung und Arbeitsweise dieser Schalterbauformen näher einzugehen. Die Druckschriften der Hersteller geben genügenden Aufschluß, so daß sich der Betriebsingenieur unschwer ein Bild über alle Einzelheiten machen kann. Richtlinien für die Wahl dieser oder jener Bauform lassen sich nicht allgemein aufstellen. Die Erfahrungen, die der Betrieb mit den verschiedenen Schalterdurchbildungen gemacht hat, und die besondere Neigung zu dieser oder jener Bauform bestimmen die Wahl für weitere Anwendung.

Bei den ölarmen Schaltern ist die verwendete Ölmenge so gering, daß eine Brand- oder Verqualmungsgefahr praktisch nicht mehr besteht. Auch die Wartung, so insbesondere hinsichtlich des Verdunstens der Ölmenge, selbst wenn der Schalter lange Zeit nicht betätigt wird, ist gegenüber den öllösen Schaltern nicht mit Mehraufwand verbunden.

Die öllösen Schalter arbeiten mit Wasser, Expansin, Druck- oder Hartgas als Löschmittel. Bei den ersteren ist auf die Temperaturverhältnisse der Schalterumgebung zu achten, beim Druckgasschalter ist betrieblich die Drucklufterzeugung einer besonderen Beurteilung zu unterziehen. Sie erfolgt bei Schaltern kleiner Leistung und mittlerer Spannung im Gerät selbst, bei großen Schaltern von einer eigenen Drucklufterzeugungsanlage mit Druckluftgefäß.

In ihrer äußeren Durchbildung sind alle Schalter so gestaltet, daß sie je nach ihrer Größe an einem Eisengerüst befestigt oder auf einem

¹ Über den Verlauf und die Folgen einer Schaltanlagenstörung eingeleitet durch einen Lichtbogen gibt der folgende Bericht sehr beachtlichen Aufschluß. Ölschalterzerknall. Anlässlich einer Reihe von Erdschlußversuchen, vermutlich infolge Überspannung, entstand an einem 3-kV-Trennschalter ein Überschlag mit nachfolgendem Stehlichtbogen, wodurch der Trennschalter zerstört und die Zelle beschädigt wurde. Der dabei auftretende hohe Kurzschlußstrom führte zu einer Schaltstückeabhebung im zugehörigen Ölschalter. Damit verbunden zerstörte ein Lichtbogen unter Öl nicht nur den Schalter selbst, sondern auch noch den gesamten Zelleneinbau völlig. Die aus dem Schalter fließende Ölmenge brannte sofort und verqualmte alle drei Stockwerke der Anlage. Durch den Rußniederschlag entstanden an einem gegenüber der Störungsstelle liegenden Sammelschienensystem Kurzschlüsse und Isolatorenzerstörungen, so daß der gesamte Betrieb unterbrochen wurde. Der Versuch, einen Teilbetrieb durchzuführen, mußte wegen neuer Überschläge infolge Verrußung wieder aufgegeben, und es konnte erst nach richtiger Vornahme der Reinigungsarbeiten ein vorläufiger Betrieb durchgeführt werden. Die vollständige Überholung der Anlage nahm längere Zeit in Anspruch; bis zur Aufnahme des vollen Betriebes vergingen vier Tage. ETZ 1936 Heft 34.

Fahrgestell aufgesetzt werden. Auch hinsichtlich der Selbstbetätigung für das Ein- und Ausschalten, sowie des Antriebes willkürlich oder selbsttätig weisen die verschiedenen Schalterbauformen keine wesentlichen Abweichungen auf.

Nach diesen Erörterungen sind nun bei der Beurteilung eines Hochspannungs-Leistungsschalters vom betrieblichen Standpunkt aus folgende Einzelheiten von besonderer Bedeutung:

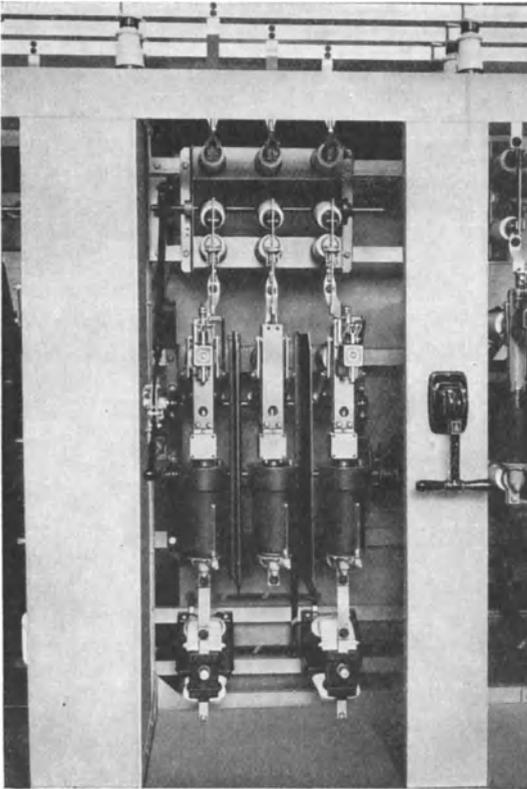


Abb. 272. Kniehebelantrieb mit Doppelgriff.

folgende Einzelheiten von besonderer Bedeutung:

1. sichere Löschung des Lichtbogens;

2. keine Schmelzperlenbildung und kein Abbrand (Verdampfen) der Schaltstücke auch beim mehrmaligen Schalten auf schwerste Kurzschlüsse;

3. große Schaltgeschwindigkeit beim Einschalten auf einen bestehenden Kurzschluß;

4. kürzeste Schaltzeit beim Ausschalten von Abgabe des Ausschaltbefehles bis zum Erlöschen des Lichtbogens = Eigenschaltzeit + Lichtbogensdauer (z. B. $0,1 + 0,03 = 0,13$ s) (Schnellschalter)¹;

5. betriebssicheres Schalten auch auf leerlaufende Umspanner, Kabel und Leitungen;

6. kleinster Löschmittelverbrauch;

7. kein Verdunsten des Löschmittels auch über lange Zeiträume, während welcher der Schalter nicht betätigt worden ist;

8. Unabhängigkeit der Löschmittelbeschaffenheit und der gesamten Schalterbauform bei Freiluftausführung von Luftfeuchtigkeit und Temperatur (Verdunsten, Frost, Beweglichkeit der Schaltstücke und ihrer Kinematik);

9. leichte und gefahrlose Überprüfung des Löschmittelzustandes und der notwendigen Löschmittelmenge, sowie leichte Ersatzmöglichkeit;

¹ Für besondere Zwecke werden vereinzelt auch noch kürzere Zeiten gefordert, die dann aber eine besondere Baudurchbildung des Schalters bedingen.

10. geringste Wartung auch nach einer Reihe schwerer Abschaltungen;

11. leichte betriebsmäßige Überprüfung des Schalters, der beweglichen Schalterteile und der Schaltstücke, schnelle Auswechslungsmöglichkeit und Behebung von Störungen an der Einbaustelle;

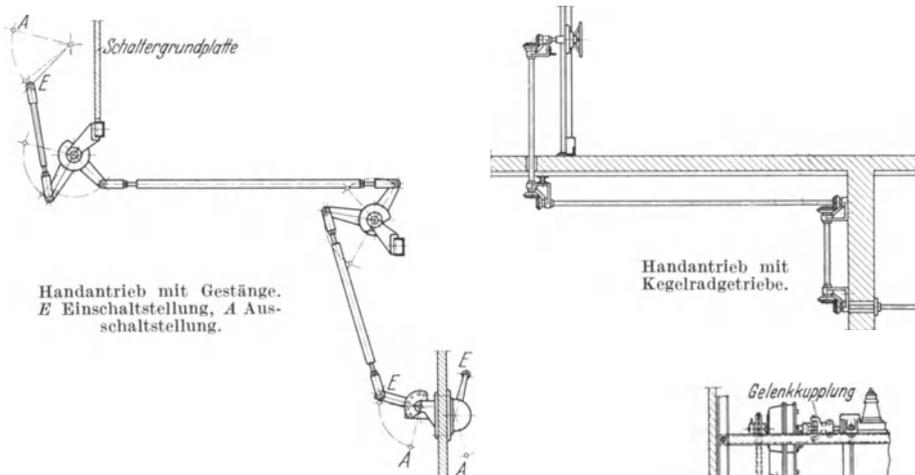


Abb. 273. Verschiedene Schalterhandantriebe.

in mechanischer Beziehung:

12. sichere und für die Bedienung gefahrlose Abführung von Schaltgasen;

13. große Schaltstrecke zwischen den Schaltstücken in der Ausschaltstellung;

14. keine Kriechwegbildungsmöglichkeit zwischen den geöffneten Schaltstücken;

15. Schalterstellungszeiger leicht erkennbar für jeden Schaltzustand;

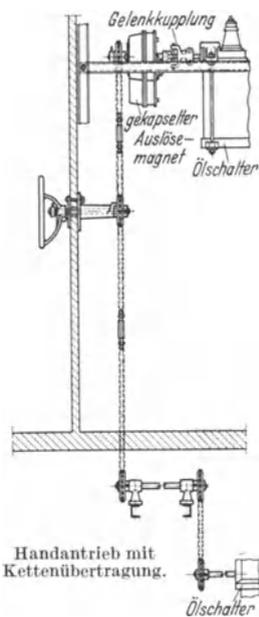
16. schlag- und geräuscharmes Arbeiten des Schalters;

17. geringste Abmessungen für den Einbau;

18. leichter Ein- und Ausbau in der Schaltanlage.

Auf die Punkte 3, 4 und 5, die sich auf Forderung für das Schalten selbst beziehen, wird bei der Behandlung der Schalterbetätigung willkürlich oder selbsttätig näher eingegangen werden.

e) Die Schalter-Antriebsvorrichtungen. Das betriebsmäßige Ein- und Ausschalten der Schalter erfolgt entweder von Hand oder durch besondere Antriebsvorrichtungen. Die Auswahl des betrieblich und wirtschaftlich vorteilhaftesten Antriebes ist abhängig von den verschiedensten



Gesichtspunkten. Die Höhe des geforderten elektrischen Einschaltvermögens beeinflusst in manchen Fällen nicht nur die Größe des Leistungsschalters, sondern auch die Art des Antriebes.

Der Handantrieb ist nach den REH ein von Hand betätigter Antrieb, bei dem die Kraft in höchstens einer Umdrehung oder in einem Hub entweder unmittelbar oder über ein Sprungwerk auf die Antriebswelle des Schalters übertragen wird. Er erfolgt durch Hebel mit einfachem oder Steigbügelgriff (Abb. 208), Kniehebel (Abb. 272) oder Handrad je nach den räumlichen Verhältnissen entweder in unmittelbarer Kupplung mit dem Schalter oder unter Zwischenschaltung eines Gestänges bzw. eines Kegelradgetriebes oder einer Kettenübertragung (Abb. 273). Gestänge sollen derart angeordnet sein, daß sie bei der Einschalt-

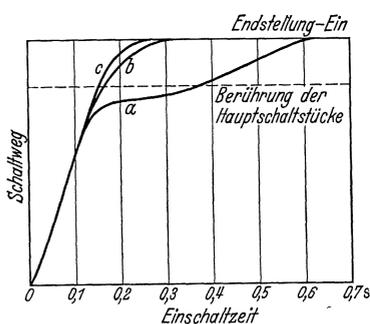


Abb. 274. Schaltzeit in Abhängigkeit vom Schaltweg.

bewegung auf Zug beansprucht werden. Bei Druckbeanspruchung ist ein Durchbiegen oder mindestens ein Durchfedern zu befürchten, was unter Umständen zu einem nicht schnell und sicher genug erfolgenden Schluß der Schaltstücke Veranlassung sein kann. Kettenantriebe werden heute kaum noch verwendet, da sie sehr sorgfältig überwacht werden müssen, um einen Schaltleerlauf bei gelängter Kette zu verhüten. Beim Aufbau der Schaltanlage wird betrieblich der größte Wert darauf gelegt, daß der

Handantrieb in der einfachsten und sichersten Form durchgebildet ist.

Der Handantrieb ist nach den REH zulässig bei Leistungsschaltern bis 200 MVA Nennauschaltvermögen und bis 30 kA Nenn-einschaltvermögen. Schalter mittlerer Leistung bis etwa 150 MVA und 20 kV lassen sich von einem geübten Schaltwärter noch von Hand schalten. Der erforderliche Kraftaufwand und die Schaltgeschwindigkeit setzen dem Handantrieb eine bestimmte Grenze. Abb. 274 zeigt die Schaltzeit in Abhängigkeit von der Bedienung des Handantriebes. Wohl zu beachten ist, daß das Schalten auf Kurzschluß infolge der elektrodynamischen Gegenwirkung der Stromschleife erheblich größere Kraftaufwendung erfordert, so daß die Handschaltung nach dieser Richtung bei Freileitungsschaltern ebenfalls begrenzt ist. Die Einschaltkraft hängt wesentlich auch von der Aufspeicherung der Ausschaltenergie und der Gangbarkeit schwer oder leicht gehender Schalter ab.

Die Vorteile des einfachen Handantriebes sind: einfache Bedienung, geringer Raumbedarf, geringe Überwachung und Wartung, niedriger Preis, Fortfall besonderer Zusatzeinrichtungen.

Einen wesentlichen Nachteil besitzt der Handantrieb darin, daß er die Forderung einer besonders kurzen Einschaltzeit nicht mit Sicherheit erfüllt, also die Zuverlässigkeit der Schaltbewegung nicht gewährleistet ist. Außerdem ist der Handantrieb nur bei sehr geschickter Bedienung zum Parallelschalten geeignet.

Für das Ausschalten ist eine Federauslösung mit Klinkwerk am Schalter selbst angebaut, die durch den Antrieb oder durch Druckknopf betätigt werden kann.

Handschnellantrieb (Speicherantrieb). Der wesentliche Unterschied des Handschnellantriebes gegenüber dem einfachen Handantrieb besteht darin, daß bei ihm der eigentliche Schaltvorgang durch Energie bewirkt wird, die in einem besonderen Federpaket aufgespeichert ist, das von Hand nur gespannt werden muß (Abb. 275). Mit dem Handschnellantrieb kann das Einschalten in kürzester Eigenzeit und vollständig unabhängig von der Geschicklichkeit des Schaltwärters ausgeführt werden. Einen weiteren Vorteil besitzt dieser Antrieb darin, daß er speicherfähig ist, d. h. daß sein Federpaket zu beliebiger Zeit durch einen Spannhel von Hand aufgezogen werden kann.

Das Einschalten des Schalters selbst wird durch Betätigen eines Druckknopfes bewirkt, der eine Verklingung aufhebt. Durch zusätzliche Ausrüstung des Antriebes mit einem Einschaltmagneten kann auch elektrische Fernsteuerung gewonnen werden. Handschnellantriebe werden meist nur bei Leistungsschaltern verwendet, die ein Einschaltvermögen von 30 kA und darüber beherrschen müssen, oder die das schnellste Zusammenschalten von Netzen zu bewirken haben, ohne daß hierfür ein geeigneter Fernantrieb zur Verwendung kommen kann, wie das z. B. bei selbständigen Umspannwerken in größeren Netzen der Fall ist, die im Verbundbetrieb zusammengeschlossen sind. Beim Handschnellantrieb ist die Auslösung als Freiauslösung im Antriebsgehäuse angeordnet. Auslösemagnet und Meldeschalter können im Antrieb eingebaut werden und sind dadurch jederzeit vom Bedienungsgang aus zugänglich. Die Leistungsaufnahme für den Auslösemagneten beträgt bei Gleichstrom etwa 300 W, bei Wechselstrom und abgefallenem Anker etwa 2000 VA, bei angezogenem Anker etwa 600 VA. Bei Anschluß an Stromwandler sind diese für eine Nennleistung von etwa 30 VA auszulegen.

Der Speicherantrieb muß den Ladezustand des Speichers von außen

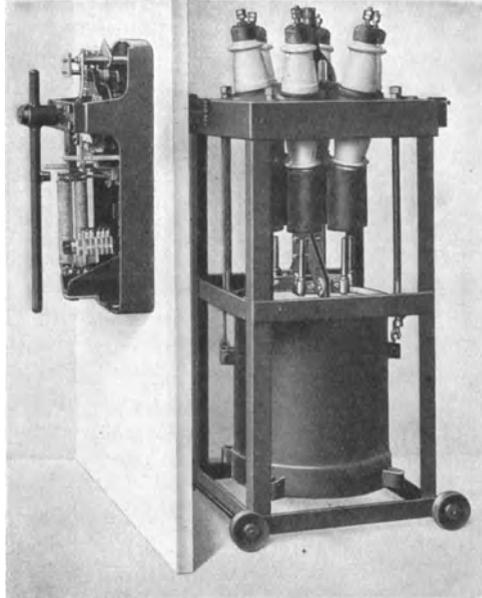


Abb. 275. Handschnellantrieb (Federspeicher) mit abgenommener Schutzhaube am Ölschalter.

her erkennen lassen. Die Freigabe des Speichers darf nur möglich sein, wenn er betriebsbereit geladen ist, damit keine unvollendete Schaltbewegung zustande kommt.

Der Kraftantrieb mit Fernsteuerung. Bei Schaltern für große Leistungen ist der Handantrieb und der einfache Speicherantrieb nicht mehr verwendbar. Es muß dann ein besonderer Kraftantrieb gewählt werden, der für seine Betätigung nicht mehr an den Aufstellungsort des Schalters gebunden ist, sondern seiner Art entsprechend ferngesteuert wird. Er wird auch für mittlere Schaltergrößen bei größerer Entfernung zwischen der Schaltstelle und dem Standort des Schalters also bei Trennung zwischen der eigentlichen Schaltanlage und der Schalttafel, oder wenn die Betätigung mehrerer Schalter auf einen kleinen Raum zusammengezogen werden soll (Schaltwarte), benutzt und macht daher die Lage der Bedienung vom Ort der Schaltanlage frei. Der Kraftantrieb kann in folgenden Formen erfolgen:

Motorantrieb, unmittelbar schaltend, für leichte und mittelschwere Schalter, Motor für Gleich- oder Wechselstrom 2 bis 5 kW;

Federkraftspeicher mit Motoraufzug für alle mittleren und schweren Schalter; große Einschaltgeschwindigkeit, Aufzugsmotor für Gleich- oder Wechselstrom, kleine Betätigungsleistung;

Dreh- oder Hubmagnet für Schalter aller Größen, Leistungsaufnahme 5 bis 20 kW, nur für Gleichstrom 110 oder 220 V;

Druckluftantrieb für Schalter aller Größen, für große Schalt häufigkeit geeignet.

Der Antrieb wird entweder an den Schalter angebaut oder auf der Bedienungswand der Schalterzelle untergebracht. Er soll neben dem Antrieb selbst (Motor, Druckluftzylinder) auch die Freiauslösung, die Einschalt- und Auslösemagnete, Meldeschalter und Abstellschaltstücke enthalten, damit alle Teile, die während des Betriebes der Wartung und Aufsicht unterliegen, außerhalb der Hochspannungszellen gefahrlos zugänglich sind. Zur Verbindung zwischen Antriebs- und Schalterwelle wird entweder eine lose Kupplung oder eine Kardanwelle benutzt, die bei Instandsetzungsarbeiten eine leichte Lösung gestattet, auch beim Einbau die Arbeiten erleichtert, dazu stets leichten Gang ergibt und Klemmungen durch Mauerwerks- oder Bodenveränderungen verhütet. Beim Ausschalten wird die Freiauslösung des Fernantriebes wie beim einfachen Handantrieb entklinkt, so daß nur der Schalter mit der gekuppelten Welle bewegt wird, während der Antrieb stehenbleibt und erst nachträglich von Hand oder fernelektrisch nachgeholt wird.

Der Schalterferntrieb hat folgenden Grundbedingungen zu genügen:

1. dauernde Betriebsbereitschaft des Antriebes und seiner Zusatzeinrichtungen auch nach mehrmaligem, kurz aufeinander folgendem Schalten;
2. sicheres Schaltvermögen vom Augenblick der Schaltbewegung bis zum Schalterschluß ohne jede Störmöglichkeit;
3. richtige Einschaltgeschwindigkeit;
4. weiche Schaltbewegung;

5. einfache Bauart, geringer Platzbedarf;
6. leichte und sichere Überprüfung des Antriebes und der Steueranlagen;
7. bequeme Instandsetzung;
8. leichte Erweiterungsfähigkeit.

Für die Auswahl ist zunächst der Punkt 1. der Grundbedingungen zu klären. Ist Steuerstrom vollständig gesichert auch bei allseitiger Störung oder Stromunterbrechung des Kraftwerkes oder des Umspannwerkes z. B. durch eine bereits vorhandene Batterie oder bei Wasserkraftanlagen durch einen besonderen Hausmaschinensatz vorhanden, so ist der elektrische Antrieb zu verwenden. Ist das nicht der Fall, oder muß erst eine Batterie aufgestellt werden, so ist wirtschaftlich und betrieblich besonders zu prüfen, welche Antriebsform am zweckmäßigsten ist.

Der Punkt 2. schreibt sicheres Schaltvermögen vor, d. h. eine einmal eingeleitete Einschaltbewegung muß vollständig durchgeführt werden, ohne daß es der Bedienung in irgendeiner Weise möglich sein darf, die Bewegung zu hemmen oder zu unterbrechen. Anderenfalls können die schwersten Betriebsstörungen die Folge sein. Das gilt auch für ein Gestänge zwischen Antrieb und Schalterwelle mit Rücksicht auf Gestängebruch, Lösen von Verschraubungen, Durchfedern u. dgl.

Die Forderung unter 3. muß erfüllt werden, um ebenfalls schwere Betriebsstörungen zu verhüten. Es ist nicht angängig, daß ein Motor wegen zu geringer Spannung nicht schnell genug durchzieht, oder ein Druckluftantrieb wegen zu geringen Druckes versagt. Auch Schmelzperlenbildung auf den Schaltstücken, Klemmungen der Schalterwelle und ähnliche, die Einschaltgeschwindigkeit etwa hemmende Vorkommnisse müssen sicher vermieden sein. Dazu muß der Schalterantrieb eine genügende Überleistung besitzen, um mechanische Widerstände vollständig und ohne jede Verzögerung zu überwinden.

Die Forderung zu 4. gilt dem Einbau des Schalters und seiner eigenen Haltbarkeit. Erfolgt das Schalten mit heftigem Stoß, können mechanische Zerstörungen mit der Zeit die Folge sein. Außerdem sind solche Geräusche für die Bedienung und Umgebung sehr lästig, und zudem muß beim Einbau des Schalters auf entsprechende Verstärkungen Bedacht genommen werden. Künstliche Geräuschmilderung durch elastische Zwischenlagen sind in Schaltanlagen durchaus unerwünscht und sollen daher nicht zugelassen werden. Sie beweisen nur Baufehler des Antriebes.

Die weiteren Bedingungen bedürfen einer allgemeinen Erläuterung nicht. Soweit erforderlich werden sie bei der Besprechung der einzelnen Antriebsformen berührt werden.

Wohl zu beachten ist ferner, daß bei allen elektrischen Schalterantrieben die Zuleitungen reichlich bemessen sein müssen, damit nur ein geringer Spannungsabfall beim Einschalten des Motors oder des Magneten auftritt, weil andernfalls der Schalterantrieb unsicher arbeitet.

Der Motorantrieb besteht aus dem Antriebsmotor, der mit Rücksicht auf das erforderliche große Anlaufdrehmoment bei Gleichstrom als

Hauptschluß-, bei Ein- oder Mehrphasen-Wechselstrom als Einphasen-repulsionsmotor ausgeführt wird, und der Übertragung auf die Schalterwelle. Durch Umlegen des Steuerschalters in die gewünschte Ein- bzw. Ausschaltstellung nimmt der Schaltmotor die eine oder andere Drehrichtung an und bewegt die Schalterwelle. In Abb. 276 ist für diesen Antrieb ein Schaltbild gezeichnet.

Um den Schaltmotor jederzeit von den Steuersammelschienen abtrennen zu können und ihn ferner vor Überlastungen z. B. hervorgerufen durch Klemmungen in der mechanischen Übertragung zu schützen, ist derselbe wie jeder Motor zu sichern und mit einem doppelpoligen Hebelnschalter auszurüsten.

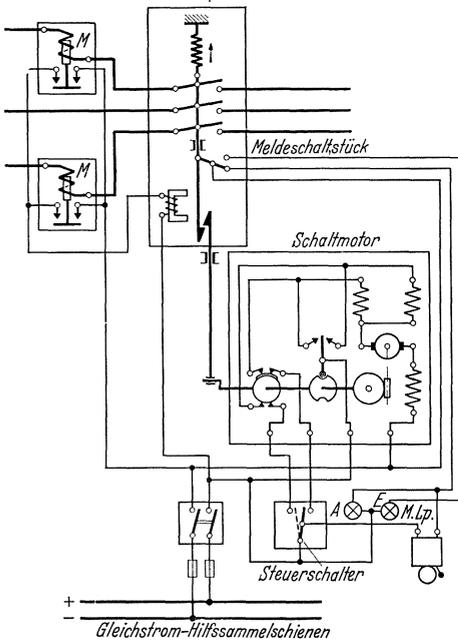


Abb. 276. Schaltbild für einen Motorantrieb

Der Leistungsbedarf beträgt etwa 2 bis 5 kW. Bei größerer Antriebsleistung wird der Motorantrieb nicht mehr gewählt, da er dann die Zwischenschaltung eines Schutzschützes notwendig macht. Der elektrische Schaltvorgang läuft beim Motorantrieb innerhalb etwa 0,5 bis 0,8 s ab, von denen für die eigentliche Einschaltung des Leistungsschalters etwa 0,3 s benötigt werden. Sofern mit dem Schalter parallelgeschaltet werden soll, ist dieses besonders anzugeben, weil dann die Schaltung innerhalb 0,5 s vollzogen sein muß. Besonders vorteilhaft ist der Motorantrieb bei Schaltern für lange Kabelstrecken,

weil hier langsamer eingeschaltet werden soll. Der Motor läuft nach beiden Seiten frei aus, bis seine Bewegungsenergie aufgebraucht ist. Durch die Vermeidung von Endschaltern wird erreicht, daß die Schwungmassen des Motors zur Aufspeicherung hoher Kraftreserve beschleunigt werden können, ohne daß Bruchgefahr durch stoßartige Beanspruchung des Baustoffes entsteht.

Ein im Antrieb eingebauter Hilfsmagnet entklinkt die Freiauslösung und läßt den Leistungsschalter in seine Anfangsstellung zurückfallen, wenn der Steuerschalter vom Bedienungsmann zu früh losgelassen wird, oder die Spannung während des Einschaltvorgangs ausbleibt. Über die Meldeleuchten wird später gesprochen.

Beim Drehmagnetantrieb wird ein mit dem Schalter zusammengebauter Drehmagnet verwendet. Dieser besteht aus einem vierpoligen Gehäuse mit Doppel-T-Anker ohne Wicklung (Abb. 277). Je nach der

Betätigung des Steuerschalters erhält eines der beiden Spulenpaare Strom. Der Anker des Drehmagneten bewegt sich in der einen oder anderen Richtung und bringt dadurch den Schalter in die gewünschte Stellung. An Stelle von Drehmagneten werden heute Hubmagnete bevorzugt.

Der Magnetantrieb wird nur für Gleichstrom gebaut. Es ist daher notwendig, daß dieser Gleichstrom auch in Wechselstromkraftwerken jederzeit vorhanden ist. Man benutzt dazu entweder eine Batterie- oder Gleichrichteranlage, oder entnimmt den Strom den Erregersammelschienen, falls besondere Erregermaschinenätze vorhanden sind.

Die Leistungsaufnahme beträgt während der sehr kurzen Einschaltzeit von etwa 0,2 s je nach Größe des Schalters 5 bis 20 kW.

Nach einer selbsttätigen Ausschaltung über Meßwerk und Auslösemagnet bleiben die Klinken und der Anker in der Einschaltstellung. Eine erneute Einschaltung ist erst möglich, nachdem der gesamte Antrieb in die „AUS“-Stellung gebracht worden ist. Hierzu ist ein „AUS“-Befehl mechanisch oder fernelektrisch erforderlich. Diese Maßnahme verhindert das „Pumpen“ auf einen bestehenden Kurzschluß.

Der Magnetantrieb arbeitet schneller als der Motorantrieb. Aus diesem Grund eignet er sich besser für Schalter zum Parallelschalten.

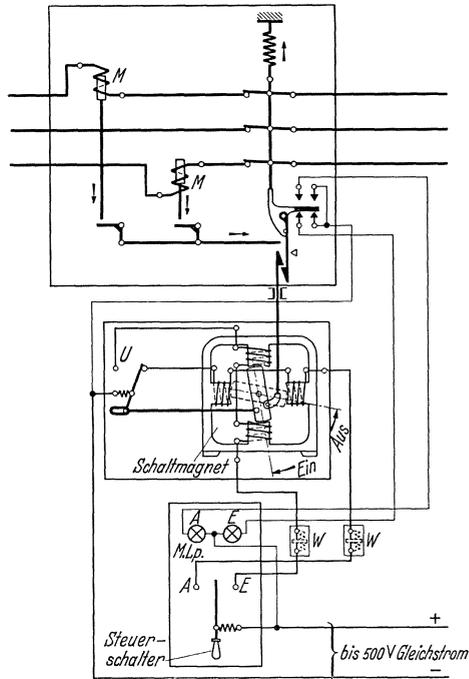


Abb. 277. Schaltbild für einen Drehmagnetantrieb.

Kraftspeicher mit Motoraufzug (Abb. 278). Diese Antriebe werden zumeist für Schalter hoher Leistung verwendet, für die Motorantriebe nicht mehr ausreichen. Sie besitzen wie die Handschnellantriebe ein Federpaket zur Schnelleinschaltung des Leistungsschalters, außerdem aber noch einen Motor kleiner Leistung von etwa 0,6 kW für Gleich- oder Wechselstrom zum Spannen dieses Federpakets von einer Stromquelle aus.

Nach Entkupplung der Spannverklüpfung, die durch Drehen des seitlich am Antrieb sitzenden Handgriffes oder durch fernelektrische Betätigung der Schaltspule erfolgen kann, wird die Schnelleinschaltung innerhalb etwa 0,15 s mit großer Sicherheit durchgeführt.

Die Schaltung kann mechanisch oder fernelektrisch erfolgen, sowie selbsttätig durch Auslösemagnet über Meßwerk und Wandler.

Zur Vermeidung von Fehlschaltungen soll das Spannen der Einschaltfedern nur bei ausgeschaltetem Leistungsschalter möglich sein. Bei Überprüfungsarbeiten oder zur Notschaltung soll der Antrieb durch einen auf den Wellenstumpf aufsteckbaren Hebel von Hand eingeschaltet werden können.

Der Druckluftantrieb kommt erst in neuerer Zeit zur Anwendung. Die bisherigen Betriebserfahrungen sind sowohl in Innenraum- als

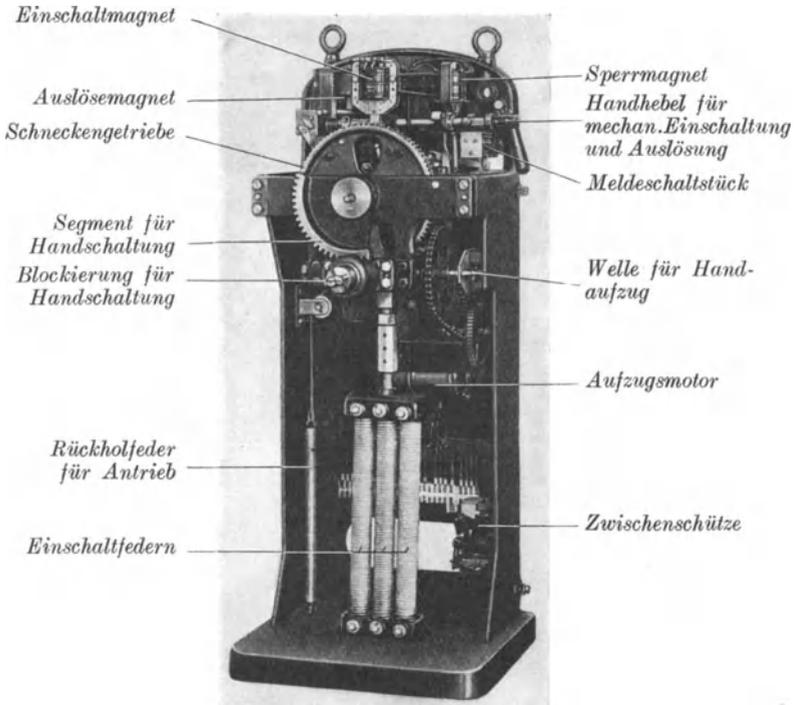


Abb. 278. Federspeicherferntrieb mit Motorantrieb; Schutzhaube abgenommen.

auch in Freiluftanlagen gut. Störungen kommen heute kaum noch vor, wenn die Gesamtanlage mit den Rohrleitungen und Ventilen richtig und auf Grund von Erfahrungen erstellt ist. Besonders vorteilhaft ist die hohe Speicherkapazität mit kleiner Druckluftherzeugungsanlage. Dort, wo bereits Druckluft für andere Zwecke vorhanden ist, kann diese auch für die Schalterbetätigung verwendet werden.

Der Antrieb für den Leistungsschalter besteht im wesentlichen aus einem Einhubdruckzylinder, der nur die Einschaltung bewirkt. Der Zylinder wird aus Gußeisen, der Kolben und die Kolbenringe aus nicht-rostendem Metall gefertigt. Der Druck beträgt im ersten Fall zwischen 4,5 und 10 atü. Innerhalb der Druckgrenze von 4 bis 5 atü sind die Antriebe noch betriebsfähig. Beim Einschalten wird durch fernelektrische oder Handbetätigung eines Ventils dem Antrieb Druckluft zugeführt,

welche den Kolben mit der notwendigen und einstellbaren Geschwindigkeit sicher und stoßfrei in die Einschaltstellung führt. Der Kolben steht im Augenblick des Einschaltens unter Druck und ist sonst entlastet. Beim Ausschalten fällt der Leistungsschalter nach Entklinkung der Auslösung durch seine Federn ohne zusätzliche Wirkung der Druckluft.

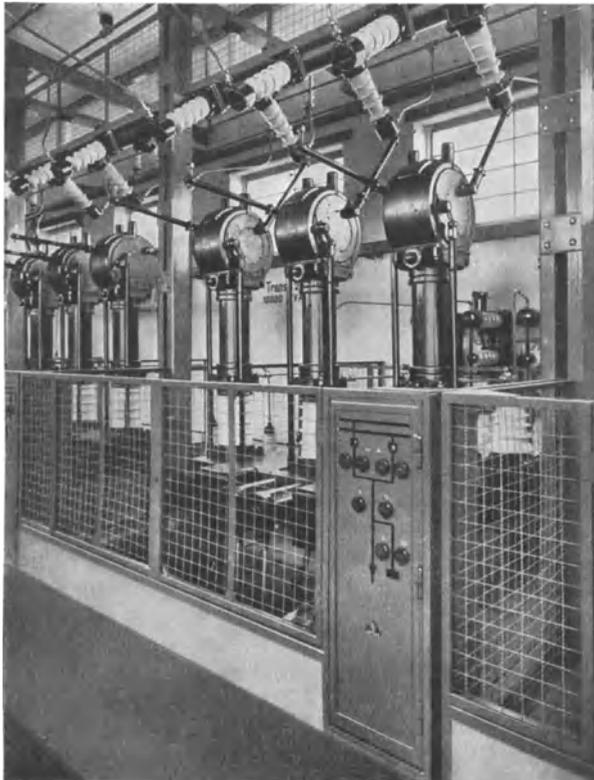


Abb. 279. 40-kV-Schaltanlage mit druckluftangetriebenen Expansionsschaltern und Bedienungsschrank mit eingebautem Druckluftsteuergerät.

Bei älteren Schaltern z. B. beim Umbau einer Anlage arbeitet der Druckluftantrieb auf das Schaltergestänge. Neue Schalter werden heute nur noch mit unmittelbar angebautem Antrieb versehen. Diese Ausführung ist nach jeder Richtung die technisch beste. Sie erspart Raum, gibt klare Übersicht, vermeidet besondere Befestigungsbauten, ist leicht ein- und auszubauen und macht den ganzen Schalter von allen Bauverhältnissen unabhängig. Klemmungen durch fehlerhaften Einbau, durch Gebäudeveränderungen, durch Instandsetzungsarbeiten sind ausgeschlossen, da die Druckluftzuführung durch ein biegsames Rohr zwischen Steuerventil und Antrieb erfolgt. Die Rohranlage kann allen Bauverhältnissen ohne weiteres angepaßt werden. Das Steuerventil kann

außerhalb der Schalterzelle an dem Platz angebracht werden, der für die Bedienung und Überwachung der vorteilhafteste ist also entweder neben der Schalterzelle oder auch auf einer Schalttafel, einem Schalterpult, in der Warte, an Notausgängen u. dgl. Abb. 279 zeigt eine Schaltanlage mit druckluftangetriebenen Schaltern, Abb. 280 ein Schaltfeld mit Druckluftsteuergerät, Schaltfehlerschutz und beleuchteten Schalterstellungsanzeigern in ein Blindschaltbild eingefügt zur Aufstellung an der Zellentrennwand und Abb. 281 ein einfaches Schaltbild dazu.

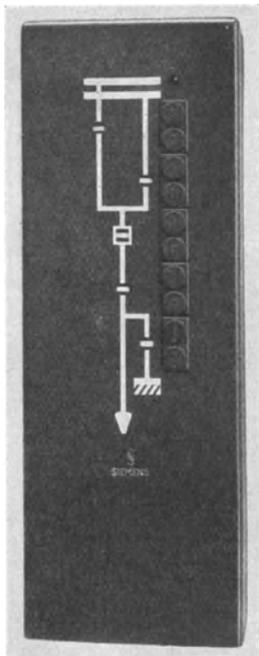


Abb. 280. Druckluftsteuergerät mit Schalterstellungsrückmeldern, Schaltfehlerschutz und Blindschaltbild.

Die Druckluft wird von einer Druckluft-erzeugungsanlage geliefert, die aus dem Luftverdichter mit Elektromotorantrieb und einem Windkessel besteht. Die Luftverdichter-Antriebsleistung ist selbst bei großen Anlagen sehr klein. Sie liegt etwa bei 1,5 bis 3 kW, weil der Schaltluftverbrauch sehr gering ist. Das setzt allerdings ein sehr gutes Rohrleitungsnetz mit entsprechend dicht abschließenden Anschlüssen, Rohrkrümmern und Rohrverbindungen voraus, was nicht immer leicht zu erreichen ist. Abb. 282 zeigt die Schaltung der Erzeugeranlage und Abb. 283 die praktische Ausführung. Das Zu- und Abschalten des Luftverdichters erfolgt selbsttätig, so daß auch die Bedienung kaum ins Gewicht fällt, was wiederum der Batterieaufsicht gegenüber ein besonderer Vorteil ist.

Der Raumbedarf für die Drucklufterzeugungsanlage ist gegenüber einer Batterie für elektrischen Antrieb außerordentlich gering.

Die Druckluft muß vorzüglich gereinigt sein, damit sie die Antriebe und die Rohrleitungen mit den Steuerventilen nicht verschmutzt und das sichere Arbeiten stört. Es sind daher Wasser- und Ölabscheider in der Rohrleitung vorzusehen. Weiter ist beson-

ders darauf zu achten, daß im Winter kein Einfrieren der Leitung und der Wasserabscheider und keine Kondenswasserbildung in der gesamten Anlage eintritt.

Zur Überwachung der Druckluftanlage dienen auf der Hoch- und Niederdruckseite Druckmesser mit Schaltstück und Fallklappen, die Hör- und Sehmeldegeräte in Tätigkeit setzen. Auch Sicherheits- und Rückschlagventile sind erforderlich.

Die Druckluftanlage unterliegt der behördlichen Genehmigung, was nicht vergessen werden darf.

Die Ventile sind so auszuführen, daß beim Undichtwerden des Ventil-sitzes keine Schalterbetätigung eintreten darf, und daß vor allen Dingen, wie bereits auf S. 326 gesagt, ein sicheres Einschalten des Schalters

gewährleistet ist. Bei Einschalten mit zu geringem Druck darf die Schalterbewegung nicht eingeleitet werden.

Für Fernsteuerung erhalten die Ventile besondere Schaltmagnete, die baulich dann in einfachster Weise angegliedert werden und leicht zu überwachen sind. Der Steuerstrom wird zumeist einer kleinen Batterie mit 24 V Spannung entnommen, der Leistungsbedarf beträgt für jedes Ventil etwa 90 W.

Die Beschaffungs-, Unterhaltungs- und Bedienungskosten einer Druckluftanlage sind wesentlich geringer als für eine Batterieanlage.

Für Störungsfälle an der Druckluftherzeugungsanlage wird zweckmäßig ein Handdruckluftherzeugungsgerät beschafft, das zu einem mehrmaligen Schalten des größten vorhandenen Schalters einschl. der zugehörigen Trennschalter ausreicht. Ist die Schaltleistung zu groß, so wird ein Benzinmotorantrieb für den Luftverdichter benutzt. Eine solche Aushilfe sollte in größeren Anlagen nicht fehlen, auch wenn die Haupterzeu-

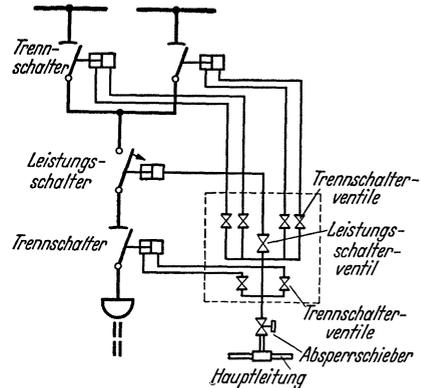


Abb. 281. Schaltbild eines Druckluftsteuergerätes für Trenn- und Leistungsschalter.

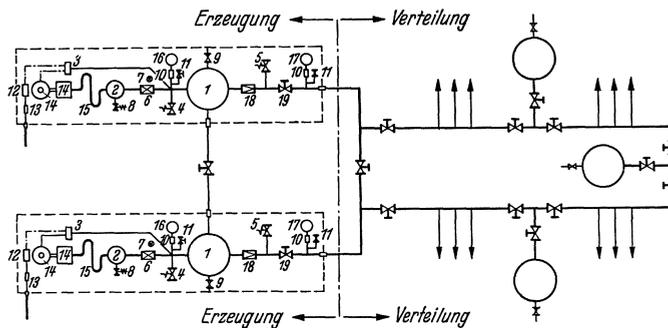


Abb. 282. Schaltbild für zwei Druckluftherzeugungsanlagen mit anschließender Verteilung.

1 Luftbehälter, 2 Öl- und Wasserabscheider, 3 Druckregelschalter, 4 Sicherheitsventil hochdruckseitig, 5 Sicherheitsventil niederdruckseitig, 6 Rückschlagventil, 7 Heizvorrichtung, 8 Sicherheitsventil, 9 Wasserablaßventil, 10 Druckmesserkupplungsventil, 11 Druckmesserprüfhähne, 12 Motorschutzschalter, 13 Sicherungen, 14 Motor mit Verdichter, 15 Kühlschlange, 16 Kontaktdruckmesser hochdruckseitig, 17 Kontaktdruckmesser niederdruckseitig, 18 Druckminderventil, 19 Absperreschieber.

gungsanlage mit 100 vH Überleistung ausgerüstet ist. Das letztere ist ohne große Kosten möglich und wird zumeist derart ausgeführt, daß die eine vollständige Anlage für die sämtlichen Antriebe einschließlich einer gewissen Erweiterung vorgesehen wird, während die zweite Anlage die hundertprozentige Überleistung bildet.

f) **Die Meldeeinrichtungen.** Wie bereits angegeben, soll jeder Schalter mit Meldeschaltstücken versehen sein, um Meldeeinrichtungen anschließen zu können. Letztere werden erforderlich, wenn die Schalter in größeren Schaltanlagen weit von der Bedienungsbühne oder der Schalttafel aufgestellt sind. Um das lästige und zeitraubende

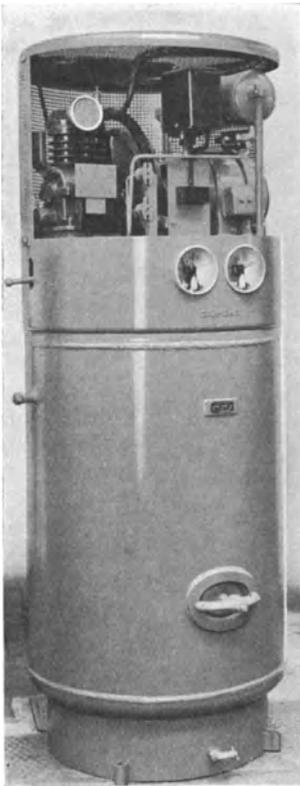


Abb. 283. Betriebsfertige Druckluft-erzeugungsanlage mit teilweise abgenommener Schutzhaube (SSW).

Umherschauen nach dem ausgelösten Schalter zu vermeiden, wird bei größeren Anlagen eine besondere Meldeanlage eingebaut, für die in Abb. 284 ein Schaltbild gezeichnet ist. Da die selbsttätig arbeitenden Schalter bei Handantrieb mit Freilaufkupplungen versehen sein müssen, wodurch die Schalterantriebe in der Einschaltstellung verbleiben, auch wenn die Schalter ausgelöst haben, muß die Meldeanlage derart durchgebildet sein, daß sie alle Schalterstellungen so in Verbindung mit den Antrieben anzeigt, daß der Schaltwärter ohne Schwierigkeit eine vollständige Übersicht über die jeweiligen Gesamt-Schalterstellungen erhält. Die Abb. 284 zeigt in der Schaltstellung *I*, daß der Schalter selbsttätig ausgelöst hat, der Antrieb aber noch in der Einschaltstellung steht, weil die rote Lampe leuchtet und der Wecker ertönt. In der Schaltstellung *II* ist der Schalter von Hand ausgeschaltet, es leuchtet keine Meldelampe. In der Schaltstellung *III* schließlich ist der Schalter eingeschaltet, die grüne Lampe leuchtet.

g) **Selbsttätige Wiedereinschaltvorrichtung**¹. In Anlagen, in denen keine dauernde Wartung besteht oder an Stellen, wo das Abschalten nicht sofort von der Bedienung bemerkt werden kann, tritt durch das Auslösen der Schalter häufig eine überflüssig lange Stromunterbrechung

ein. Um diese zu vermeiden, die besonders in ausgedehnten Mittelspannungsnetzen vorkommt, wo vorübergehende Kurz- und Erdschlüsse durch Baumzweige, Vögel u. dgl. das Auslösen eines Umspannwerk-schalters herbeiführen, sind selbsttätige Wiedereinschaltvorrichtungen durch besondere Schalt- und Meßwerke sehr zweckmäßig, die nach Ablauf einer gewissen einstellbaren Zeit das Wiedereinschalten auf elektrischem Wege bewirken. Dafür müssen die Schalter elektrischen Antrieb erhalten. Ist die Ursache für die Störung nicht mehr vorhanden,

¹ Fleck, B.: Neues Wiedereinschaltrelais für sofortige und verzögerte Wiedereinschaltung. AEG-Mitt. 1939 Heft 3.

so wird die Stromlieferung wiederhergestellt, andernfalls erfolgt ein zweites oder drittes und dann endgültiges Abschalten. Der Schalter ist im letzteren Fall nach Beseitigung der Störung wieder durch den Wärter einzulegen und der Schalterantrieb für einen neuen Störfall vorzubereiten.

Diese Wiedereinschaltvorrichtung für die Hochspannungsschalter wird auch für Industrieanschlußanlagen gewählt, um beim Ausbleiben der Spannung die Störzeit so kurz wie möglich bemessen zu können. Mit besonderen Meßwerken sind solche Störzeiten auf etwa 0,2 bis 0,5 s beschränkbar. Da auch vollbelastete Motoren beim Ausbleiben der Spannung zumeist erst innerhalb einer Sekunde so stark abfallen, daß sie abgeschaltet werden müssen, kann eine solche oft sehr unangenehm empfundene Betriebsstörung vermieden werden. Das gilt besonders für störanfällige Gebietsteile. Sind die Motor-Selbstschalter mit Nullspannungsauslösern versehen, so müssen diese in ihrer Zeiteinstellung auf die Schaltzeit der Wiedereinschaltvorrichtung abgestimmt sein.

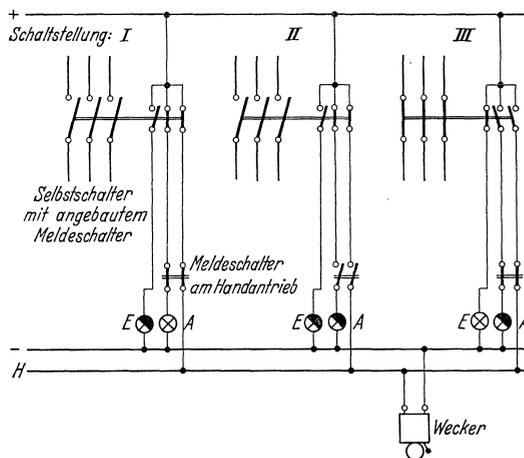


Abb. 284. Schaltbild für eine Meldeanlage.

Die Wiedereinschaltzeit der Leistungsschalter hängt von der Schaltzeit der Antriebe ab. Da in den kleineren Umspannwerken für den elektrischen Antrieb zumeist nur der Magnetantrieb in Frage kommen wird, so ist bei der Eigenzeit eines solchen von etwa 0,4 s, der Eigenzeit des Schnellmeßwerkes von etwa 50 ms und der Schaltzeit des Schalters von etwa 0,2 s eine Gesamt-Wiedereinschaltzeit von 0,6 bis 0,7 s erreichbar. Allerdings ist zu beachten, daß diese Wiedereinschaltung insofern nicht den Vorschriften des VDE entspricht, als letztere vorsehen, daß erst nach 3 min nach Störauslösung eines Schalters erneut eingeschaltet werden darf.

Die Verwendung solcher Wiedereinschaltvorrichtung auf elektrischem Wege setzen naturgemäß voraus, daß die Spannung für den Schalterantrieb ständig vorhanden ist. Ist das für Unterspannungsleitungen in Mittelspannungsnetzen nicht gewährleistet, so muß die Wiedereinschaltung durch einen Gewichtsakkumulator erfolgen. Allerdings ist dann die Störzeit nicht ebenso gering wie beim elektrischen Meßwerk.

Eine zweite Form der selbsttätigen Wiedereinschaltung nach Kurzschlußauslösung des Leistungsschalters wird neuerdings auch in großen Netzen mit höheren Spannungen angewendet. Es ist dieses die Kurz-

schlußfortschaltung (S. 282)¹. Ihrer Arbeitsweise liegt der Gedanke zugrunde, den Lichtbogen eines Kurzschlusses in kürzester Zeit zu unterbrechen, damit seine Zerstörungswirkung zu beschränken und die Leitung sofort wieder einzuschalten. Besteht der Kurzschluß weiter, dann wird auch hier endgültig abgeschaltet. Die gesamte Schaltzeit für die Fortschaltung des Kurzschlusses einschließlich der Zeit des Überstrommeßwerkes mit Schnellauslösung beträgt etwa 10 bis 25 Halbperioden. Innerhalb dieser Zeit muß der Lichtbogen erloschen sein und sich die Überslagstelle abgekühlt bzw. entionisiert haben. Die bisherigen Versuche haben gezeigt, daß mit dieser Zeit befriedigende Ergebnisse erzielt werden können selbst bei Spannungen bis 100 kV und hohen Leistungen. Die kurze Unterbrechung der Stromlieferung mit 0,25 bis 0,35 s wird auch von empfindlichen Abnehmern kaum bemerkt, stört zudem den Parallelbetrieb der Werke nicht. Die Kurzschlußfortschaltung ist daher ein Fortschritt für die Störbeseitigung und damit für die Sicherheit der Kraftübertragung. Die Erdschlußlöschung wird bei Verwendung der Kurzschlußfortschaltung nicht überflüssig, sondern hat ihre Aufgaben in gleicher Weise zu erfüllen.

Hinsichtlich der praktischen und wirtschaftlichen Benutzung dieser Schaltung liegen eigene Erfahrungen bisher nicht vor. Vorerst ist festzustellen, ob die Schalter selbst sich für das schnelle Zu- und dann unter Umständen Wieder-Abschalten eignen. Die Beschaffungskosten der Zusatzschaltgeräte sind nicht wesentlich, wenn Druckluftantrieb vorhanden ist. Bei anderen Antriebsarten wird gegebenenfalls eine Auswechslung erforderlich, um die kurze Schaltzeit zu erreichen. Immerhin wird die Schaltereinrichtung insgesamt nicht einfacher. Da die Kurzschlußfortschaltung nur für Freileitungen anwendbar ist, wird sie sich vornehmlich für solche Strecken eignen, die bei geringeren Leiterabständen und schlechten Masterdungsverhältnissen in gewitterreichen Gegenden und im Zuge großen Vogelbfluges, sowie in besonders rauhreif- und windgefährdeten Gegenden liegen. Für die Fahrleitungen elektrischer Bahnen ist die Kurzschlußfortschaltung schon häufig zur Anwendung gekommen.

h) Der Leistungstrennschalter ist ein Schalter, der wie der Leistungsschalter beliebige Ströme bis zu dem auf dem Leistungsschild angegebenen Schaltvermögen schaltet und der außerdem wie ein Trennschalter besonders dem Schutz der Betriebsmannschaft dient, indem er einen Stromkreis in allen Leitern zuverlässig erkennbar und mit genügendem Isoliervermögen auftrennt. Er wird selbsttätig oder willkürlich ausgeschaltet, aber im allgemeinen nur willkürlich eingeschaltet.

Der Leistungstrennschalter ist ein verbilligtes Schaltgerät und in seinem Aufbau für den Leistungsschalterteil ähnlich den ölarmen oder öllosen Hochleistungsschaltern so nachgebildet, daß die Leistungsunterbrechung in einer Löschkammer erfolgt, deren Wirkungsweise die gleiche wie bei den Leistungsschaltern ist. Löschkammer und Löschmittel ent-

¹ Mayr, O.: Fußnote S. 282. Kaufmann, W.: Die Löschung von Lichtbogenkurzschlüssen durch kurzzeitiges Abschalten. ETZ 1939 S. 241.

sprechen dem Grunde nach den Ausführungsformen der Leistungsschalter. Es gelten hierfür die früher gemachten Angaben.

Hinsichtlich des Schaltvermögens ist auf das auf S. 318 Gesagte zu verweisen.

Ein besonderes betriebliches Merkmal des Leistungstrennschalters liegt darin, daß er nach den REH willkürlich oder selbsttätig ausgeschaltet, aber nur unter ganz besonderen Bedingungen selbsttätig eingeschaltet werden darf. Es müssen dann Maßnahmen getroffen sein, die den Schutz der Betriebsmannschaft gewährleisten z. B. durch Absperrung jedweder Schaltbewegung oder durch Abschalten der Kraftquelle für die Betätigung. Das Schaltvermögen dieses Schalters wird dadurch nicht berührt, sondern lediglich

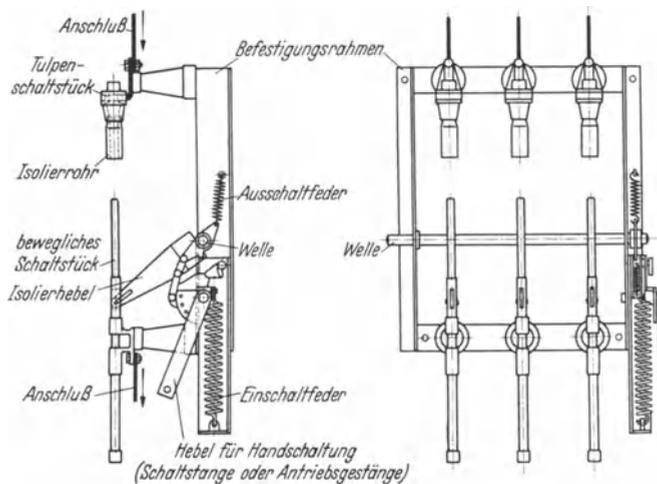


Abb. 285. Leistungstrennschalter.

seine Verwendung als Trennschalter, denn es muß aus Sicherheitsgründen verlangt werden, daß der Leistungstrennschalter unter keinen Umständen z. B. durch ein Meßwerk eingeschaltet werden kann.

Auf bauliche Einzelheiten soll nicht näher eingegangen werden¹. Abb. 285 zeigt einen solchen Schalter. Wesentlich in der Bauform ist besonders, daß ein unbeabsichtigtes Zufallen des geöffneten Schalters infolge abgenutzter Halteklinken, durch starke Erschütterungen u. dgl. unter allen Umständen sicher vermieden sein muß. Der Raumbedarf ist sehr gering, er entspricht etwa dem eines einfachen Trennschalters, was für die Durchbildung der Schaltanlage von Bedeutung ist.

Der Antrieb erfolgt wie beim Leistungsschalter entweder von Hand, oder mittels Motor bzw. Druckluft. Das über die Schalterantriebe Gesagte gilt hier sinngemäß. Wohl zu beachten ist dabei aber, daß der Antrieb besonders schnell schalten muß. Beim Handantrieb muß der

¹ Mayr, O.: Ein neuer Leistungstrennschalter. ETZ 1935 Heft 44 S. 1189. Kyser, Kraftübertragung. III/2. 3. Aufl.

Schluß und die Trennung der Schaltstücke unter Zuhilfenahme von Federn (Sprungschaltung) vor sich gehen, damit beim Einschalten auf einen Kurzschluß der Bedienende nicht gefährdet wird und beim Ausschalten auch bei kleinen Nennströmen die Ausschaltgeschwindigkeit nicht von der Bedienung abhängt.

Im besonderen ist weiter zu fordern, daß beim Schalten das Löschmittel in der Löschkammer nicht herausspritzt und den Bedienenden gefährdet. Weiter müssen bei mehrpoligen Schaltern die Strecken zwischen den einzelnen Phasen so weit bemessen sein, daß der Einbau von Zwischenwänden nicht erforderlich ist, da sich über diese bei feuchter Luftbeschaffenheit unter Umständen Kriechströme ausbilden können, was nach den REH unzulässig ist. Die Lufttrennstrecke muß so groß sein, daß sie den Trennschalterbedingungen entspricht.

Bei der Beurteilung der Löscheinrichtung ist darauf zu achten, daß erstlich jederzeit der Stand in den Löschkammern erkennbar sein muß, um nach mehrmaligem Schalten unter schweren Verhältnissen nicht ohne oder mit zu wenig Löschmittel zu arbeiten. Ferner darf das Löschmittel keine Rußbildung aufweisen, sich nicht in seiner Wirkung verändern, z. B. verharzen, die Metallteile nicht chemisch angreifen und keine schädlichen Gase entwickeln. Auch eine Rückzündungsgefahr muß vermieden sein. Von dem Verbrauch an Löschmittel, der Überprüfung, der Instandsetzung, der Überwachung und dem Schaltvermögen, sowie der Schaltgeschwindigkeit hängt die Güte eines Leistungstrennschalters ab. Zu diesen Einzelheiten kommen noch der zulässige Stoßkurzschlußstrom (etwa 30 kA bei 10 kV und 20 kA bei 20 kV), die Dauerbelastung, die höchstzulässige Erwärmung bei Überlastungen und die zulässige Strombelastung während 1 oder 5 s bei geschlossenem Schalter, sowie die Art der Bedienung und des Ausschaltens mit Rücksicht auf Geräuschbildung, Lichtbogenerscheinung und Sicherheit des Bedienungsmanne.

Für das selbsttätige Ausschalten kommt die Spannungsrückgangs- und die Überstromauslösung mit Zeiteinstellung zur Anwendung. Ein Kurzschluß darf mit einem Leistungstrennschalter aber nur bis zu dem vom Hersteller angegebenen zulässigen Abschaltstrom abgeschaltet werden. Die Meßwerke können an den Schalter angebaut werden, oder auf einen Auslöser wirken. Werden für die Kurzschlußabschaltung Hochleistungs-Trennsicherungen vorgeschaltet, und entsprechen letztere hinsichtlich ihres Isoliervermögens den Bedingungen für Trennschalter, so können sie als Trennschalter angesehen werden. Alsdann ist auch das selbsttätige Einschalten des Leistungstrennschalters gestattet. Die Auslösung des Schalters kann in diesem Fall selbsttätig so eingerichtet werden, daß sie erfolgt, wenn die Sicherung auch nur einer Phase durchgeschmolzen ist. Zu beachten ist, daß die Sicherungen nur bis zu solchen Nennströmen verwendet werden dürfen, die beim Abschmelzen der Sicherung keine höhere Stromspitze ergeben als der zulässige Stoßkurzschlußstrom für den Schalter.

15. Der Fehlerschutz in Hochspannungsanlagen in Verbindung mit dem Leistungsschalter.

Der Fehlerschutz in Hochspannungsanlagen hat sich zu erstrecken auf Fehler aus äußeren Ursachen in den Anschluß- und Übertragungsanlagen durch Überlastungen jeder Art nach Dauer und Höhe (Leistungsüberlastung, Kurzschluß, Erdschluß) und aus inneren Ursachen insbesondere Isolationsdurchbruch bei Maschinen und Umspannern. Der Schutz gegen Überspannungen aus äußeren und inneren Ursachen elektrischer Vorgänge wird besonders behandelt.

Dem Schutz gegen unzulässige Stromüberlastung fallen zwei getrennte Überwachungsaufgaben zu und zwar hinsichtlich der dauernden Überlastung nach Leistung (Überlastschutz), und der Überbeanspruchung durch Kurzschlußstrom (Überstromschutz).

In Gegenüberstellung zu den bisher behandelten Selbstschaltern wird das selbsttätige Öffnen des Leistungsschalters durch einen Auslöser herbeigeführt, der je nach der Art und Arbeitsweise des Fehlerschutzes beispielsweise seinen Auslösestrom, oder den Befehl zum Ansprechen von einem, oder mehreren Meßwerken erhält.

Grundsätzlich ist zwischen Auslöser und Meßwerk (Relais) zu unterscheiden:

Auslöser ist eine elektrisch, thermisch oder mechanisch betätigte Vorrichtung, die die Auslösung mechanisch bewirkt;

Meßwerk (Relais) ist eine elektrisch oder thermisch betätigte Vorrichtung, die über Schaltstücke den Stromkreis eines Auslösers steuert.

a) **Der Auslöser** für elektrische Steuerung wird in Form eines Auslösemagneten entweder unmittelbar an den Schalter angebaut, oder in das Antriebsgestänge gelegt. Das richtet sich nach der Bauform des Schalters und seiner Ausführung für Fern- oder mechanische Handeinschaltung.

In der Regel liegt der Auslöser an der Schaltwelle. Der vom Schalter getrennte Auslöser wird bei großen Leistungsschaltern mit mechanischer Handeinschaltung dann gewählt, wenn aus bedienungstechnischen Gesichtspunkten eine leichte Beaufsichtigung erwünscht ist. Das ist der Fall, sobald Ölschalter in Kammern aufgestellt werden, die nach dem Schaltgang zu durch eine Wand abgetrennt sind. Es entfällt dann das Betreten der Schalterzelle bei eingeschaltetem Schalter lediglich zu dem Zweck, die Auslöser zu überprüfen.

Beim Ansprechen hebt der Auslöser die Verklüftung der Schalterwelle oder des Antriebsgestänges in der Einschaltstellung auf. Die Trennung der Schaltstücke des Schalters erfolgt durch Rückzugfedern. Liegt die Wicklung des Auslösers im Stromkreis des Schalters, so wird ein solcher Auslöser als Primärauslöser, liegt seine Wicklung über Strom- oder Spannungswandler am Stromkreis des Schalters oder an einer besonderen Betätigungsquelle, so wird ein solcher Auslöser als Sekundärauslöser bezeichnet.

Für den Primärauslöser zeigt Abb. 286 ein Schaltbild und Abb. 287 die praktische Ausführung. Die Auslösemagnete liegen unmittelbar im

Hochspannungsstromkreis. Die Magnetanker heben mit ihrer Bewegung die Schalterverklüpfung unmittelbar auf. Der Primärauslöser kann gleichzeitig so als Primärmeßwerk (Primärrelais) ausgebildet werden,

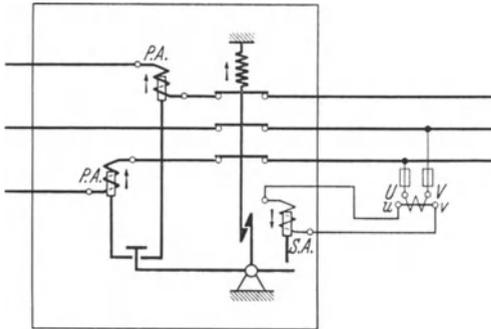


Abb. 286. Schaltbild für einen Auslöser im Hauptstromkreis.

P.A. Primärauslöser, S.A. Sekundärauslöser.

daß er auf verschiedene Ansprechströme mit oder ohne Zeitverzögerung einstellbar ist. Auf das Primärmeßwerk als solches wird auf S. 342 näher eingegangen. Gebaut wird der Primärauslöser für genormte Ströme von 6 bis 1000 A. Unter 6 A ist dieses Primärgerät unzulässig. Dem Grunde nach entspricht der Leistungsschalter mit diesem Primärauslöser dem Selbstschalter für Spannungen bis 1000 V. Das Gestänge zur Entkupplung der Verklüpfung muß als Isoliergestänge ausgebildet sein.

Der Sekundärauslöser erhält seinen Strom zum Ansprechen aus einem Hilfsstromkreis, der vom Fehlerstromschutz betätigt wird. Die Schaltungen mit Primärmeßwerken zeigen die Abb. 288 bis 290. Der Hilfsstrom wird entweder eine besondere Batterie bzw. der Eigenbedarfsanlage des Werkes entnommen oder über Meßwandler gewonnen.

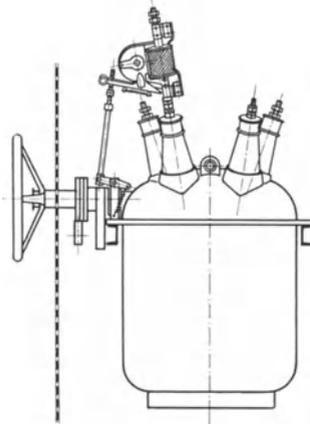


Abb. 287. Ölschalter mit aufgebautem Hauptstromauslöser; unmittelbare mechanische Schalterauslösung.

Die genormte Auslösestromstärke beträgt 5 A, in besonderen Fällen 1 A und die Spannung bei Anschluß an Spannungswandler 100 V, bei Anschluß an eine besondere Betätigungsquelle 24, 60, 110 oder 220 V.

Der Sekundärauslöser kann als Arbeits- oder Ruhestromauslöser ausgeführt werden. Beim Arbeitsstromauslöser tritt die Wirkung auf den Schalter dann ein, wenn der Auslöser durch Ansprechen des Meßwerkes Strom erhält, also wenn er eingeschaltet wird, wie das aus Abb. 288 und 289 zu ersehen ist.

Der Ruhestromauslöser tritt beim Ausschalten oder Schwächen seiner Erregung in Wirksamkeit (Abb. 290). Der Auslöser liegt z. B. an der Unterwicklung von Stromwandlern, die im Regelbetrieb durch die Schaltstücke des Primärmeßwerkes kurzgeschlossen sind. Sprechen die Primärmeßwerke an, so wird der Kurzschluß aufgehoben und dem Auslöserstromkreis Strom von den Wandlern zugeführt.

Der Arbeitsstromauslöser wird zumeist angewendet, weil in allen

größeren Anlagen Hilfsstrom für alle besonderen Steuerzwecke und für die Notbeleuchtung vorhanden ist. Nur bei kleineren selbständigen Umspannwerken wird der Ruhestromauslöser gewählt. Die Schaltleistung für den Auslöser muß dann der Unterwicklung eines Stromwandlers entnommen werden. Spannungswandler als Leistungswandler sind nicht benutzbar, weil bei einem Kurzschluß die Spannung so stark absinkt, daß

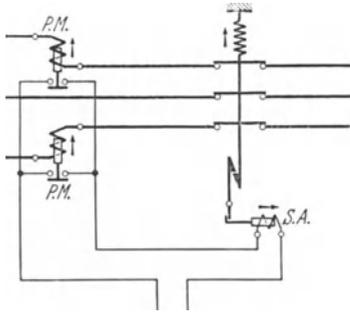


Abb. 288. Auslöser im Hilfsstromkreis (Sekundärauslöser) mit Primärmeßwerk; Arbeitsstromschaltung.

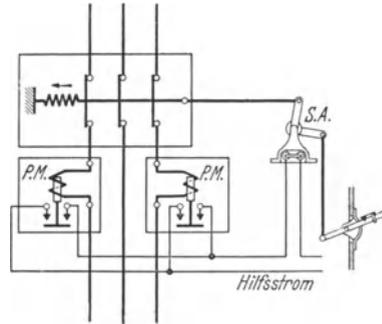


Abb. 289. Auslöser im Schalterantrieb (Sekundärauslöser) mit Primärmeßwerk; Arbeitsstromschaltung.

sie nicht mehr genügende Leistung abgeben können, um den Auslöser zu erregen.

b) Die Fehlerschutzmeßwerke werden ebenfalls als Primär- oder Sekundärmeßwerke (Primär- oder Sekundärrelais) ausgeführt.

Je nachdem das Meßwerk schnell oder nach einer gewissen Zeit ansprechen soll, ist es in der Arbeitsgröße seiner Auslösung und in der Zeit in bestimmten Grenzen einstellbar.

Für die Beurteilung dieser Fehlerschutzmeßwerke und der Auslöser sind von Bedeutung:

- die einstellbaren Grenzen der Ansprechwerte und
- die Streuung in vH der Ansprechwerte,

$$\text{das Halteverhältnis} = \frac{\text{Ansprechwert}}{\text{Rückfallwert}} \quad (\text{nach REH} < 1,4),$$

der Rückfallwert z. B. der Strom in vH des Ansprechstromes, bei dessen Unterschreitung das Meßwerk aus dem Laufzustand unverzüglich in die Ruhelage zurückkehrt,

die Auslösezeit (einstellbare Laufzeit) und die

Zeitstreuung (nach REH bis 3 s Sollwert Abweichung $\leq \pm 0,3$ s, darüber ± 10 vH des Sollwertes),

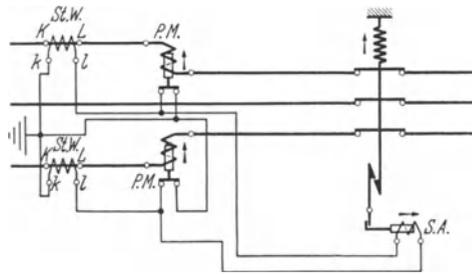


Abb. 290. Primärmeßwerk mit Sekundärauslöser; Ruhestromauslösung mit Stromwandlern.

die Rücklaufzeit (nach REH $< 0,5$ s außer bei Wärme-Auslösern),
 die Einstellsicherheit (nach REH $\geq 1,5$),
 der Ansprechfehler (nach REH $\pm 7,5$ vH),
 der Leistungsverbrauch bei Nennstrom,
 und besonders bei Strommeßwerken:
 die Grenzstromaugenblicksauslösung (Kurzschlußschnellauslösung),
 der thermische und dynamische Grenzstrom (Kurzschlußfestigkeit
 thermisch während 1 s = Einsekundenstrom und dynamisch zulässiger
 Stoßkurzschlußstrom).

Der Anschluß des Meßwerkes an den Stromkreis kennzeichnet dieses als Primär- oder Sekundärmeßwerk.

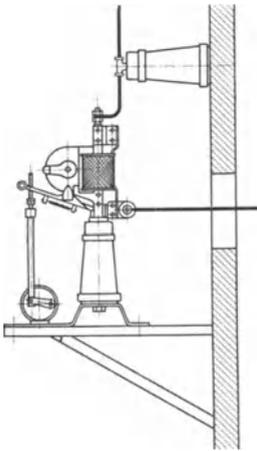


Abb. 291. Primärmeßwerk im Zuge der Leitung; mittelbare elektrische Schalterauslösung.

Das Primärmeßwerk liegt nach Abb. 288 und 289 unmittelbar in der Hochspannungsleitung. Daraus ergibt sich, daß Wicklung und Aufbau des Meßwerkes den dynamischen und thermischen Kurzschlußbeanspruchungen, sowie den Wirkungen von äußeren Überspannungen sicher gewachsen sein müssen. Soll das Meßwerk an einer bestimmten Stelle im Stromkreis liegen und damit vom Schalter getrennt sein (Abb. 291), so wirkt das Übertragungsgestänge auf eine Schaltdose, über die der Auslöser des Schalters betätigt wird. Die Einstellung der Meßwerke erfolgt von Hand und muß im Betrieb mit einem Isolierschlüssel vorgenommen werden. Das darf aber nur unter besonderer Vorsicht geschehen, weil unmittelbar im Hochspannungsstromkreis gearbeitet werden muß. Wenn auch die bauliche Durchbildung auf die gefahrlose Bedienung unter Spannung weitgehendst Rücksicht nimmt, so schließt das nicht die Gefährdung durch eine

unglückliche Verkettung verschiedener Umstände aus. Infolgedessen läßt der Betrieb eine Einstellung oder Umstellung des Primärmeßwerkes zumeist nur im spannungslosen Zustand zu, was den Wert dieses Schutzgerätes beeinträchtigt. Die Billigkeit durch Fortfall der Stromwandler darf gegenüber den Betriebsforderungen nicht den Ausschlag geben.

Da das Meßwerk gegenüber den Einflüssen der Umgebung ungeschützt ist, ist besonders zu fordern, daß die Zeitgenauigkeit ständig erhalten bleibt, daß also auch bei monatelangem Stillstehen im Sommer und Winter die Zeitgenauigkeit nicht durch Verstaubung innerer Triebteile, Verharzung von Ölstellen, Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinträchtigt wird. Auch Erschütterungen beim Schalteransprechen für Meßwerke, die mit dem Schalter zusammengebaut sind, dürfen auf jahrelange Betriebsdauer gesehen das Meßwerk nicht unsicher machen. Abb. 292 zeigt ein solches Primärmeßwerk, das über den Hebel „d“ die Schaltstücke des Auslöserstromkreises schließt.

Das Sekundärmeßwerk liegt an einem Meßwandler und ist somit

vollständig getrennt von Hochspannung und Schalter. Es wird mit geschlossenem Gehäuse ausgeführt, ist damit allen äußeren Einwirkungen der Umgebung entzogen und kann somit als Feinmeßwerk ausgebildet werden. Die Einstellung der Meßwerte ist jederzeit im Betrieb gefahrlos möglich. Auch die Überprüfung, Reinigung und Beaufsichtigung hat nicht zur Bedingung, daß der Stromkreis spannungslos zu machen ist. Es ist in seiner Anschaffung zusammen mit den Meßwandlern teurer als das Primärmeßwerk, was jedoch nur bei Anlagen mittlerer Spannung und geringerer Bedeutung zu einer gewissen Preis- und Betriebsüberprüfung Veranlassung sein kann. Bei höheren Spannungen kann nur das Sekundärmeßwerk Anwendung finden. Sind zwei oder drei Meßwerke für einen Schalter erforderlich, so können sie in einem Gehäuse zusammengebaut oder auch getrennt gewählt werden. Bei der letzteren Ausführung ist die Überprüfung der Meßwerke einfacher, der Platzbedarf allerdings größer, was für die Unterbringung in der Schaltanlage zu beachten ist. Erfordert das Gesamtmeßwerk mehrere Arbeitsglieder, so werden diese entweder eingebaut oder wiederum getrennt benutzt.

Der Fehlerschutz, der mit den Meßwerken erreicht werden soll, hat sich zu erstrecken auf:

Spannungsabsenkungen,
Spannungserhöhungen,
Überlastung,
Überstrom.

Je nach der Arbeitsweise des Meßwerkes kann dieses beim Auftreten des Fehlers augenblicklich ansprechen (Schnellauslösung) oder erst nach Ablauf einer einstellbaren Zeit (Zeitauslösung). Für die Auswahl der einzelnen Meßgeräte sind die Betriebsverhältnisse der Gesamtanlage bestimmend. Ein falsch gewählter Gesamtschutz kann den Betrieb der Anlage auf das empfindlichste stören und die Sicherheit der Stromlieferung so stark beeinträchtigen, daß die größte Unzufriedenheit der Abnehmer die Folge ist. Was das für den Betrieb bedeutet, bedarf keiner besonderen Erklärungen. Es gehört daher mit zu den verantwortlichsten, aber auch interessantesten Aufgaben des Betriebes, den Fehlerschutz so zu wählen und ständig zu überwachen, daß er alle vorkommenden Störungsmöglichkeiten erfaßt und die Gesamtanlage derart schützt, daß die Fehlerstelle schnell und so

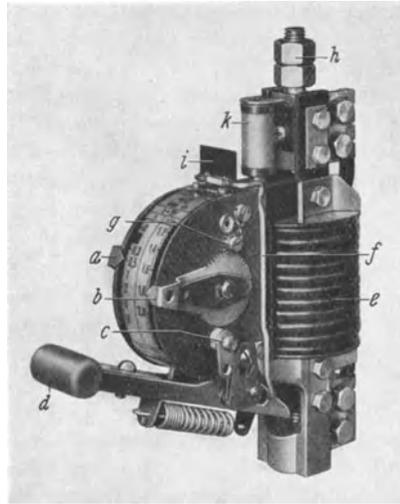


Abb. 292. Hauptstrommeßwerk (BBC).

a Zeiger für Einstellung der Laufzeit, *b* Zeiger für Einstellung des Ansprechstromes, *c* Hebel mit Skala für Einstellung des Grenzstromes, *d* Auslösehebel, *e* Stromspule, *f* Gestänge für Meldeklappe, *g* Feststellvorrichtung für Zeiger *a* bzw. *b*, *h* Anschluß für die Zuleitung, *i* Meldeklappe (in der Meldestellung), *k* Schutzwiderstand.

begrenzt wie nur irgend möglich gegenüber der Gesamtanlage abgeschaltet wird. Die heutigen Meßwerke können diese Betriebsforderungen schon mit einem hohen Grad der Zuverlässigkeit erfüllen.

Im folgenden soll zwischen dem Abnehmerschutz und dem Netzschutz unterschieden werden.

Der Abnehmerschutz erstreckt sich lediglich auf die Abnehmer selbst. Da hierfür die Sicherungen und Selbstschalter in der Hauptsache in Frage kommen, wird auf den Abnehmerschutz nur dort hingewiesen werden, wo eine Abstimmung mit dem Netzschutz erforderlich ist.

Der Netzschutz umfaßt alle Schutzeinrichtungen von der Stromerzeugung über die Verteilungsleitungen und die Umspannwerke bis zu den Abnahmestellen der eigentlichen Stromverbraucher also auch die Unterspannungsnetze.

c) Das Spannungsrückgangs- oder Nullspannungsmeßwerk hat die Aufgabe, den Schalter beim Sinken der Betriebsspannung unter einen bestimmten Wert oder beim plötzlichen Ausbleiben der Spannung zum Auslösen zu bringen. In Abb. 286 war das Schaltbild für einen Schalter mit Spannungsauslöser unter Benutzung eines Spannungswandlers gezeichnet.

Im Abnehmerschutz soll dieses Meßwerk nur mit Zeitverzögerung angewendet werden, andernfalls bringt es für die zu schützenden Anlageteile eine unstatthafte Beunruhigung durch zu häufiges Abschalten, die den Betrieb sehr empfindlich stören kann. Es ist nicht zu verhindern, daß insbesondere durch Gewittereinflüsse in Freileitungsnetzen ganz kurzzeitige Spannungsschwankungen eintreten, die an sich ohne jede Bedeutung sind. Hat das Spannungsrückgangsmeßwerk keine Verzögerung, so spricht es stets auf diese Spannungsabsenkungen an. Auch Kurzschlußstörungen in zweiseitig gespeisten Netzen haben bei der Benutzung des neuesten Netzschutzes zumeist keine längere Spannungsabsenkung als höchstens etwa 0,5 bis 1 s zur Folge, bis dieser Schutz zum Abschalten der kranken Stelle führt und damit die Ursache des Spannungsrückganges beseitigt. Während dieser Zeit dürfen die Spannungsrückgangsmeßwerke ebenfalls nicht auslösen. Liegt die Dauer der Spannungsabsenkung über einem bestimmten Wert, so daß die Motoren nicht mehr durchziehen können oder ihr Überstromschutz anspricht, bzw. ist die Spannung völlig unterbrochen, dann soll durch Auslösen des Hauptschalters des Abnehmerschutzes beim Wiederkehren der Spannung das ungewollte Anlaufen der Motoren im eingeschalteten Zustand verhindert werden, das Gefahren für die Motoren selbst, für die angetriebenen Maschinen, die Bedienung und für die Netzanlagen bringen kann.

Für den Netzschutz wird dieses Meßwerk in seiner einfachsten Arbeitsweise ohne oder mit Zeitverzögerung nicht angewendet, weil Spannungsabsenkungen nicht zum Ansprechen von Netzschaltern führen sollen. Es würde eine unzulässige Stromlieferungsbeeinflussung darstellen, wenn jede ganz kurzzeitige Spannungsabsenkung, wie sie aus den bereits mehrfach genannten Ursachen in Netzen mit Freileitungen häufig vorkommen, zur Schalterauslösung führen würde. Auch die Zeitverzögerung rechtfertigt den Einbau dieses Meßwerkes nicht, da

außerordentlich schwer festgelegt werden kann, von welchem Spannungswert an und nach welcher Zeit das Meßwerk einer bestimmten Schaltstelle bei Reihenschaltung mehrerer Meßwerke ansprechen soll. Abb. 293 zeigt den Verlauf des Spannungsrückganges bei einem einfach gespeisten Netz und Abb. 294 bei mehreren liefernden Kraftwerken für den Fall eines Kurzschlusses bei der Fehlerstelle F . In jedem anderen Fall würde ein anderer Kennlinienverlauf auftreten. Bei zweiseitiger Speisung kann

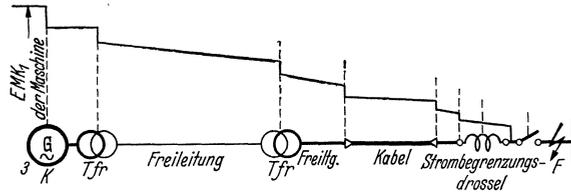


Abb. 293. Kennlinien für den Verlauf der Spannungsabsenkung bei Kurzschluß in einem einfach gespeisten Netz.

sich ein wesentlich abweichender Spannungsverlauf zeigen. Aus diesen Gründen und weiter um auch die Zahl der Fehlerschutzmeßwerke und dadurch die in ihnen selbst unvermeidlich liegenden Fehlerquellen zu beschränken, erhält der Netzschutz ein solches Meßwerk nur in den seltensten Fällen, wenn besondere Umstände dieses rechtfertigen. Auf den

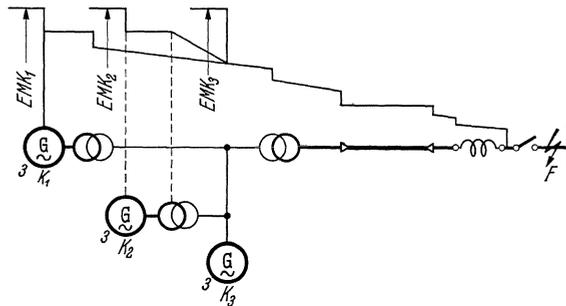


Abb. 294. Kennlinien für den Verlauf der Spannungsabsenkung bei Kurzschluß in einem mehrfach gespeisten Netz.

Einschluß auch eines Spannungsmeßwerkes in den Kurzschlußschutz großer im Kraftwerksverbundbetrieb gefahrener Netze wird später eingegangen werden.

d) Gegen **Spannungserhöhung** bei plötzlichem Abschalten großer Last müssen Maschine, Netz und Abnehmer geschützt werden. Solche Spannungserhöhungen folgen einmal aus der Spannungsänderung der Maschine selbst und sind durch Beeinflussung der Erregung zu verhindern. Dazu dienen der Eil- und Schnellregler oder, wenn solche nicht vorhanden sind, Spannungsmeßwerke, die ohne Zeitverzögerung auf die Verstellung der Erregung wirken. Die Spannungsregelung an sich muß

augenblicklich erfolgen, da sonst die Geräte im Netz zerstört und die angeschlossenen Stromverbraucher jeder Art stark gefährdet werden. Das Hochlaufen der Antriebsmaschine bei solchen Entlastungen als weitere Ursache der Spannungserhöhung muß der Regler der Antriebsmaschine verhindern. Mit der Frequenzerhöhung sind Lastverschiebungen im Verbundbetrieb und Drehzahlsteigerungen der Motoren verbunden, die zu sehr unangenehmen Folgen führen können. Versagt der Regler, so tritt infolge des Durchgehens der Antriebsmaschine eine weitere Spannungserhöhung auf, die nunmehr auch noch die Isolation der Maschinenwicklung gefährdet. Gegen diese Spannungserhöhung wird als Schutz die sofortige Entregung der Maschine benutzt, über die beim Stromerzeugerschutz gesprochen wird. Die Einleitung der Entregung erfolgt dann durch Fliehkraftschalter.

Ist nur eine Maschine vorhanden, so wird mit der Entregung gleichzeitig der Maschinenschalter geöffnet. Sind mehrere Maschinen im Parallelbetrieb, dann ist das Abschalten einer Maschine nicht mehr ohne weiteres zulässig, weil damit die gesamte Stromerzeugung unterbrochen werden könnte. Hierauf wird bei der Besprechung der Schaltbilder eingegangen.

e) Für die **Arbeitsweise** und damit für den **Schutzwert des Überlast- und Überstrommeßwerkes** ist, wie bereits kurz angedeutet, die Abhängigkeit zwischen verschiedenen Meßwerten bestimmend. Es wird hiernach unterschieden zwischen:

- der Schnellauslösung,
- der vom Strom abhängigen Zeitauslösung,
- der vom Strom unabhängigen Zeitauslösung,
- der vom Widerstand der Strombahn abhängigen Auslösung.

Bestimmend für die Auswahl des Überlastschutzes ist der Lastverlauf selbst und die zugelassene Dauer der Überlastung, die sich bei Maschinen, Umspannern, Kabeln usw. nach den VDE-Vorschriften richtet. Neben dem Schutz gegen dauernde Überlastung ist ein solcher unter Umständen auch bei nur vorübergehenden Überlastungen nach bestimmter Arbeitsweise erwünscht z. B. beim Anlauf von Motoren, beim plötzlichen Einspringen bereits belasteter Maschinen oder Umspanner als Ersatz einer gestörten Einheit, um Zeit für die Ersatzmaßnahmen zu gewinnen und trotzdem keine Gefährdungen dieser Anlageteile herbeizuführen.

Der Überstromschutz ist dagegen der Schutz, dem die größte Bedeutung zukommt, sowohl wenn es sich um einfach als auch um mehrfach gespeiste Netzteile, dann um ausgedehnte und vermaschte Netze mit einer großen Zahl von Umspannanlagen, Umformerwerken und vielen Mittel- und Unterspannungsanschlüssen, ganz besonders aber wenn es sich um den Netzverbundbetrieb mit mehreren Kraftwerken handelt. Die in großen Anlagen mannigfaltigen Formen der Kurz- und Erdschlüsse in Freileitungen und Kabeln in bezug auf ihre Lage zum Kraftwerk und nach den zur Zeit im Betrieb befindlichen Stromerzeugern, fehlerhaftes Parallelschalten der Maschinen eines Kraftwerkes, mehrerer Kraftwerke untereinander oder von Umformerwerken bzw. Synchron-

motoren zu einer Speiseleitung und ähnliche Betriebsfälle bedingen, daß die Überstromschutzvorrichtungen an den verschiedensten Stellen der Anlage eine ganz bestimmte Arbeits- und Wirkungsweise besitzen müssen. Anderenfalls werden die oben genannten Grundbedingungen nicht erfüllt, daß eine Fehlerstelle schnell und sicher eingegrenzt und abgeschaltet wird, so daß gesunde Teile der Anlage keine Störungen erleiden.

Der Netzschutz gegen Überstrom erstreckt sich immer auf eine mehr oder weniger große Zahl von Meßstellen, deren Meßwerke im Fehlerfall in Reihe liegen. Darum müssen alle zu einem Stromkreis oder im großen gesehen zu ein oder mehreren Stromeinspeisestellen gehörenden Meßwerke in ihrer Arbeitsweise abgestimmt sein, sonst kommen Fehlschaltungen vor, die vom Betrieb sehr gefürchtet werden. Läßt sich eine Fehlschaltung nicht restlos und zuverlässig als solche aufklären, so bedeutet das eine Unsicherheit der Meßwerke des betreffenden Stromkreises, die zu beseitigen oft außerordentliche Schwierigkeiten, Zeit und Meßuntersuchungen erfordert.

Bei der **Schnellauslösung** arbeitet das Meßwerk sofort also ohne jede Verzögerung, sobald der Strom den eingestellten Auslösewert überschreitet selbst dann, wenn dieser Strom nur innerhalb eines Bruchteiles einer Sekunde auftritt; Abb. 295 zeigt die Arbeitskennlinie.

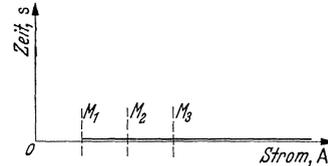


Abb. 295. Arbeitskennlinien für Überstrommeßwerke mit Schnellauslösung.

Das Meßwerk für reine Schnellauslösung findet nur in wenigen Fällen Anwendung. Es kann als Kurzschlußschutz in den Abnehmerschutz eingereiht werden, wird aber zumeist nicht gewählt, weil es bei kurzzeitigen Überlastungen unter Umständen zu Fehlauslösungen führen kann. Im Netzschutz ist dieses Meßwerk vollständig verlassen worden, weil es keine sichere Strom-Zeitstaffelung und aus diesem Grund keine kleinste Eingrenzung einer Fehlerstelle zuläßt.

Die Schnellauslösung allein wird nur für die Trennung mehrerer parallel laufender Stromerzeuger eines Kraftwerkes über die Sammelschienen nach Abb. 414 angewendet, um im Kurzschlußfall den Kurzschlußstrom zu begrenzen und trotzdem den Gesamtbetrieb nicht zu stören, die Gefährdungen der Anlageteile aber zu vermindern. In Verbindung mit dem Netzschutz dagegen wird dieses Meßwerk nur für besondere Verhältnisse benutzt, auf die noch näher hingewiesen werden wird.

Bei der **vom Strom abhängigen Zeitauslösung** ist die Auslösezeit mit dem Anwachsen des Stromes veränderlich. Sie wird um so kleiner, je größer der Strom wird. Ist z. B. ein Schalter auf eine Auslösezeit von 10 s bei einer Überlastung von 50 vH eingestellt, so muß diese Überlastung 10 s lang in unveränderter Stärke vorhanden sein, bis das Meßgerät die Auslösevorrichtung des Schalters zum Öffnen bringt. Tritt dagegen die doppelte Überlastung also 100 vH auf, so erfolgt die Auslösung bereits früher. Den Verlauf der Kennlinien zeigt Abb. 296 für drei verschieden eingestellte Meßwerke. Bei ein und demselben Anlaufstrom

hat jedes Meßwerk eine andere Anlaufzeit. Steigt der Strom über den Wert des Anlaufstromes, so beginnen alle drei Meßwerke zu arbeiten. Sind sie alle auf den gleichen Auslösestrom eingestellt, so wird, wenn dieser Strom etwa bei der mit a bezeichneten Stelle in Abb. 296 liegt, zuerst das Meßwerk mit Einstellung 1 (kleinste Zeit) dann das mit 2 und schließlich das mit Einstellung 3 ansprechen. Beim Anwachsen des Stromes über die Werte a hinaus werden die Zeitunterschiede immer

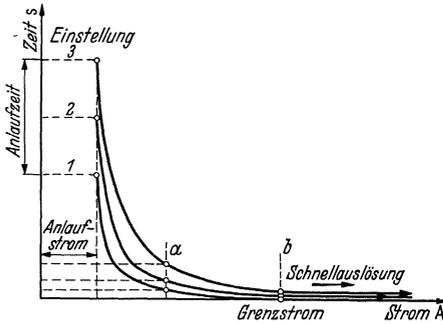


Abb. 296. Strom-Zeit-Kennlinien für das stromabhängige Meßwerk mit Schnellauslösung.

a Zeitauslösung, b Schnellauslösung.

geringer bis zu einem Grenzwert. Wird dieser überschritten z. B. bei Kurzschlußstrom, so werden die Zeitunterschiede so klein, daß eine Staffelung in Reihe liegender Meßwerke nicht mehr erzielbar ist. Es ist daher notwendig, die Ablaufkennlinien der zu wählenden Meßwerke hierauf zu prüfen. Außerdem arbeiten diese Meßwerke je nach ihrer Bauart nach voneinander abweichenden Ausschaltkennlinien. Es können dann Überschneidungen nach Abb. 297 vor-

kommen, die die Staffelung vollständig über den Haufen werfen und schon beim Überlastschutz zu Fehlauflösungen führen.

Dieses Meßwerk wird heute nur noch als Überlastschutz in Abnehmeranlagen angewendet insbesondere in Motorstromkreisen mit stark ver-

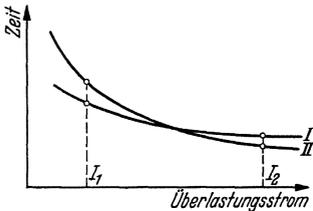


Abb. 297. Überschneiden der Strom-Zeit-Kennlinien verschiedener Meßwerke gleicher Arbeitsweise.

änderlicher Belastung. Dann kann das Meßwerk auch eine besondere Schnellauslösung erhalten.

Als Überstromschutz im Netz eignet es sich nicht, weil nach dem zur Arbeitsweise mehrerer Meßwerke Gesagten eine Staffelung in Reihe liegender Meßwerke im Kurzschlußfall zu verlässig nicht gewährleistet werden kann (Abb. 296). Hinzukommt die Unsicherheit hinsichtlich einer Kennlinienüberschneidung, die selbst

bei Meßwerken eines Herstellers nicht immer zu vermeiden ist. Liegen Meßwerke verschiedener Hersteller in einer Anlage, dann ist die Unsicherheit noch größer.

Eine ähnliche Arbeitsweise allerdings für eine andere Aufgabenerfüllung zeigt das **Wärme-Überstrommeßwerk**. Das abhängige und das weiter unten behandelte unabhängige Strom-Zeit-Meßwerk arbeiten mit Sekunden-Überlastzeit, d. h. sie bringen den Schalter zur Auslösung, wenn die Überlast oder der Überstrom eine bestimmte Zeit vorhanden gewesen ist. Sie nehmen in ihrer Wirkungsweise nicht darauf Rücksicht, ob die Überlastung des Anlageteiles z. B. eines Motors oder eines Strom-

erzeugers bereits eine Erwärmung der Wicklungen verursacht hat, die gefährlich oder schädlich wird. Sie geben daher nicht die Möglichkeit, die Maschinen, Umspanner, Kabel, Motoren nach ihrer zulässigen Erwärmung vorübergehend zu überlasten und damit den Betriebsverhältnissen entsprechend jeweils wirtschaftlich auszunutzen.

Eine diesen Voraussetzungen entsprechende Arbeitsweise besitzt das Wärme-Überstrommeßwerk, das nach dem Erwärmungszeitwert T einstellbar ist. In Zahlentafel 28 sind für verschiedene Anlageteile die Zeitwerte angegeben¹.

Zahlentafel 28.

Erwärmungs-Zeitwerte bei Belastung mit Nennstrom vom kalten Zustand ab unter gewöhnlichen Abkühlungsverhältnissen.

Anlageteil	Erwärmungszeitwert	
	6 kV	10 kV
Motoren 0,3 ÷ 8000 kW	25 ÷ 50 min	
Stromerzeuger 5000 ÷ 30000 kW		
Langsamläufer	25 ÷ 60 min	
Schnellläufer (Turboläufer)	25 ÷ 40 min	
Umspanner 100 ÷ 10000 kVA		
mittlere Öltemperatur bei Luftkühlung	2 ¹ / ₂ ÷ 3 h	
mittlere Öltemperatur bei Wasserkühlung	1 h	
Kupfer gegen Öl	5 ÷ 7 min	
Gürtelkabel in Kanälen bei Nennspannung		
Querschnitt 16 mm ²	32 min	47 min
Querschnitt 25 mm ²	36 min	51 min
Querschnitt 35 mm ²	40 min	57 min
Querschnitt 50 mm ²	46 min	64 min
Querschnitt 70 mm ²	52 min	72 min
Querschnitt 95 mm ²	60 min	80 min
Querschnitt 120 mm ²	67 min	87 min

Abb. 298 zeigt den Verlauf der Erwärmungs- und Abkühlungskennlinien für einen Motor im Dauerbetrieb. Die Erwärmungskennlinie wird durch den Erwärmungszeitwert T des Anlageteiles festgelegt. Dieser gibt in Stunden oder Minuten an, innerhalb welcher Zeit vom kalten Zustand aus der Anlageteil mit gleichbleibendem Strom belastet werden kann, bis er seine Endübertemperatur annimmt. Das Meßwerk kann nun derart eingestellt werden, daß es erst dann zum Ansprechen kommt, wenn diese Endübertemperatur eintritt. Es berücksichtigt also die Vorbelastung und die zulässige Endübertemperatur, die unter Umständen erst nach vielen Minuten erreicht wird. Die Übertemperatur für Maschinen und Umspanner ist in den VDE-Vorschriften angegeben. Sie beträgt 60° C. Hat die Maschine also im Dauerbetrieb nach ihrer Belastung diese Übertemperatur noch nicht erreicht, so ist sie noch für bestimmte Zeit überlastbar. Die Auslösekennlinien eines solchen Meßwerkes zeigt Abb. 299.

¹ Parschalk, Fr.: Überlastschutz von Hochspannungsanlagen durch Hauptstromthermorelais. ETZ 1938 Heft 9 S. 211.

Ein solches Meßwerk ist daher ein reiner Überlastschutz und zusätzlich zu verwenden, wenn ein Schutz dieser Art als erwünscht angesehen wird. Es ersetzt in vollkommener Weise die Wärmeelemente

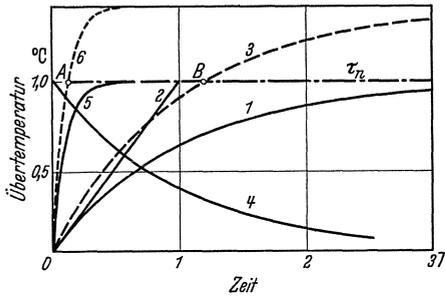


Abb. 298. Erwärmungs- und Abkühlungskennlinien im Dauerbetrieb für die Beurteilung eines Wärme-Überstrom-Meßwerkes.

1 Erwärmung eines Motors bei Nennstrom, 2 Erwärmung eines Motors wenn Wärmeabgabe = Null, 3 Erwärmung bei 1,2fachem Nennstrom, 4 Abkühlung des stromlosen Motors, 5 Erwärmung eines Wärmeauslösers bei Nennstrom, 6 Erwärmung eines Wärmeauslösers bei 1,2fachem Nennstrom ($T_1 = 0,1 T$), T Temperaturzeitwert, τ_n zulässige Endübertemperatur, A Abschalt- punkt des Wärme-Überstrom-Meßwerkes, B Voll- abschaltpunkt.

in den Wicklungen der Maschinen oder die Temperaturzeiger in den Kesseln der Ölumspanner, da beide nur auf Meldegeräte arbeiten und daher eine besondere Überwachung durch die Bedienung erfordern. Wie der Betrieb sich zu der Benutzung dieses Meßwerkes stellt, ist Ansichtssache und daher nicht nach bestimmter Richtung zu beantworten.

Der Einbau eines solchen Meßwerkes erfolgt für Stromerzeuger zusätzlich in die mittlere Phase, bei Leitungen und Kabeln, sowie bei Umspannern unterspannungsseitig an der gleichen Stelle. Bei Motoren, die wegen ihres hohen Anlaufstromes bei Kurzschlußankerläufern nur mit überbrückten Überlast-Meßwerken anlaufen können, ist dieses Meßwerk in zwei Phasen zu legen und ersetzt dann den Überlastschutz. Für Kurzschlußabschaltung in Abnehmerstromkreisen kann eine Schnellauslösung vorgesehen werden. Der Zeitwert wird durch Auswechselung des wärmebestimmenden Bauteiles verändert.

Bei der vom Strom unabhängigen Zeitauslösung besteht das Meßwerk aus zwei Gliedern, einem Strom- und einem Zeitglied. Beide werden auf bestimmte Werte eingestellt. Das Stromglied schaltet das Zeitglied ein. Das Meßwerk bringt erst dann den Schalter zur Auslösung, wenn der Ausschaltstrom

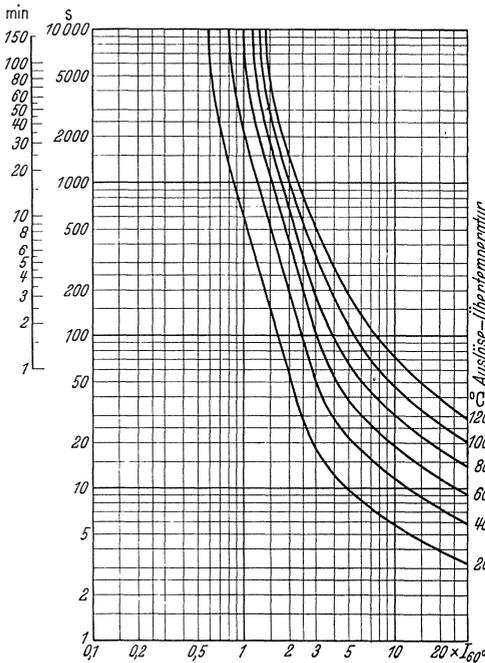


Abb. 299. Auslösekennlinien für ein Wärme-Überstrom-Meßwerk.

also die Überlastung in unveränderter Höhe die festgelegte Zeit überschreitet. Übersteigt der Strom den eingestellten Wert (stoßweise mehr oder weniger starke Überlastungen), so ändert das nichts an der Arbeitsweise des Meßwerkes, weil der Zeitablauf durch ein Uhrwerk oder einen anderen ähnlichen Antrieb erfolgt und somit unabhängig von der Höhe des Stromes ist. Wird bis zum Verschwinden der Überlastung die eingestellte Zeit nicht erreicht, so kehrt das Meßwerk selbsttätig in die Anfangsstellung zurück, ohne in Wirksamkeit getreten zu sein.

Die Stromkennlinien verlaufen vom Anlaufstrom an parallel zur wagerechten Achsenkreuzachse. Abb. 300 zeigt die Arbeitsweise für drei Meßwerke, die auf gleichen oder verschiedenen Strom und auf verschiedene Zeiten eingestellt sind. Es ist somit bei in Reihe liegenden Meßwerken eine Strom- und eine Zeitstaffelung möglich und infolgedessen ist dieses Meßwerk für den Abnehmer- und den Netzschutz geeignet.

Durch eine besondere Ausführung kann dieses Meßwerk zusätzlich auch mit Schnellauslösung arbeiten.

Es können nur Zeiten bis herab zu etwa 0,5 s eingestellt werden. Zu dieser Kleinstzeit kommt noch die Eigenschaltzeit des Schalters mit etwa $0,1 \div 0,3$ s, so daß als kleinste Abschaltzeit insgesamt $0,6 \div 0,8$ s möglich sind.

Als Überlastschutz wird dieses Meßwerk für die Hauptschalter von Hochspannungsabnehmeranlagen und für die Stromerzeuger, sowie die Umspanner der Kraftwerke und Umspannwerke im Netz in der Mehrzahl der Fälle benutzt. Auch für die Staffelung der Netzschalter findet es in mittleren, selbst in größeren Netzgebilden mit einfacher und mehrfacher Speisung — dann allerdings zusammen mit dem Energierichtungsmeßwerk — Anwendung, im letzteren Fall aber nur, wenn keine hohen Ansprüche an die schnelle und sichere Herausschaltung von Fehlerstellen gestellt werden. Den Forderungen, die für den Netzschutz in Höchstspannungsanlagen und im Kraftwerksverbundbetrieb vorgeschrieben werden müssen, genügt aber auch dieses Meßwerk noch nicht.

Die Arbeitsweise und die Art der Meßwertestaffelung soll an einigen Beispielen behandelt werden.

Abb. 301 zeigt ein einfach gespeistes Netz mit 3 Verteilungsstellen A_I, A_{II}, A_{III} , die gleichzeitig Abnahmestellen sind. Alle Schalter 1 bis 7 sind mit dem unabhängigen Strom-Zeit-Meßwerken versehen. Die Einstellung der Stromwerte ergibt sich aus den Belastungen bzw. zugelassenen Überlastungen. Ist der Selbstschalter in A_I für 1 s Auslösezeit eingestellt, und tritt bei F_1 eine Kurzschlußbelastung auf, so dürfen alle anderen Schalter nicht eher fallen, als bis der Schalter 1 ausgelöst hat. Demnach sind die Meßwerke der Schalter 2, 3 und 7 entsprechend in der Zeit zu staffeln. Da nun aber noch auf die Verhältnisse für A_{II} Rück-

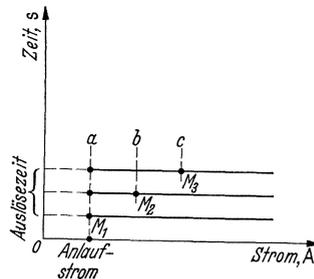


Abb. 300. Strom-Zeit-Kennlinie für das strom-unabhängige Meßwerk.

sicht genommen werden muß, soweit Schalter 3 und 7 in Frage kommen, müssen die Arbeitsweise und die eingestellten Meßwerte der Schalter 4 und 5 bekannt sein. Hier zeigt sich bereits die Notwendigkeit der Abstimmung in allen Auslösewerten der verschiedenen Meßwerke.

Je nach der Wertigkeit der Abnahmestellen A_I und A_{II} ist die Staffelung der einzelnen Meßwerke durchzuführen. Ist A_I eine Industrieanlage und A_{II} ein öffentliches Versorgungsgebiet, so richtet sich die Meßwertestaffelung für letzteres nach den Staffelzeiten, die die Meß-

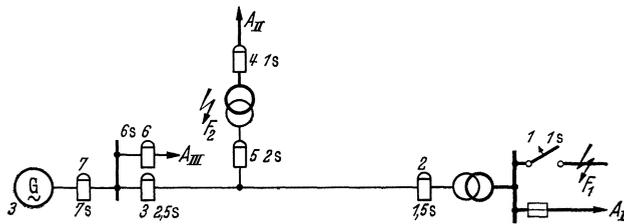


Abb. 301. Einfachgespeistes Netz mit Überlastschutz durch unabhängige Strom-Zeit-Meßwerke.

werke der Verteilungsschalter nach ihrer in Reihe liegenden Zahl erhalten. Daraus ergibt sich dann die Endzeit des Schalters 5. Tritt bei F_2 ein Fehler auf, so darf Schalter 3 nicht fallen. Das ergibt nach den in Abb. 302 eingetragenen Zeiten eine Zeiteinstellung von 2,5 s bei dem

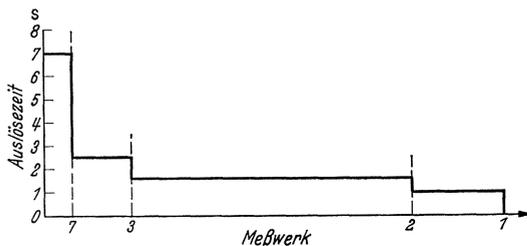


Abb. 302. Zeitkennlinie für die Meßwerke zu Abb. 301 bei gleicher StromEinstellung.

Summenwert der durch Schalter 3 durchzuleitenden Ströme bei Kurzschluß in A_{II} oder A_I .

Liegt nun an den Sammelschienen noch die Netzleitung A_{III} , die für den Schalter 6 eine Zeiteinstellung des Meßwerkes auf 6s fordert, so ist das Meßwerk des

Maschinenschalters auf etwa 7 s einzustellen. Das bedeutet aber, daß eine Kurzschlußbelastung 7 s lang von der Maschine ausgehalten werden muß, ehe sie zur Abschaltung kommt. Das dieses schon ein sehr hoher Wert ist, leuchtet nach allem bisher Gesagten ohne weiteres ein. Es müssen daher hier schon unter Umständen Vorrichtungen für die Begrenzung des Kurzschlußstromes Anwendung finden, oder es muß Schalter 6 mit Schnellauslösung versehen werden, wodurch dann allerdings der gesamte Netzteil A_{III} bei jeder Kurzschlußstörung innerhalb seines Gebietes abgeschaltet wird, was vielfach nicht zulässig ist.

Der Zeitstaffelplan ist in Abb. 302 gezeichnet. Aus ihm ist das bisher Gesagte ohne Schwierigkeit erkennbar.

Bei einem zweiseitig gespeisten Netz, sei es von einem Kraftwerk über eine Ring- oder Doppelleitung (Abb. 303), sei es von zwei

Kraftwerken (Abb. 304 und Abb. 305), kann der Energiefluß je nach der Höhe der Belastungen der einzelnen Abnahmestellen entsprechend dem Widerstand der Leitungsübertragung wechseln. Dadurch kann eine einmal eingestellte Staffelung der unabhängigen Strom-Zeit-Meßwerke nach Strom und Zeit völlig falsch werden und bei Störungen zu Fehlausschaltungen führen. Der Vorteil der zweiseitigen Speisung geht dann ebenfalls verloren. Die Abnahmestellen parallel nur durch einfache Stichleitungen anzuschließen gibt überhaupt keine befriedigende Staffelmöglichkeit. Es ist daher jede Abnahmestelle in der in Abb. 303 und 304 gezeichneten Form derart in die Hauptleitungen einzufügen, daß diese in die Anschlußwerke ein- und ausgeführt (eingeschleift) werden.

Um das unabhängige Strom-Zeit-Meßwerk verwenden zu können, muß noch ein Energierichtungsmeßwerk hinzugefügt werden. Dieses soll jeweils nur das Überstrommeßwerk einschalten und damit in den Staffelman einsetzen, das nach der Lage der Fehlerstelle in Wirksamkeit treten soll und zwar immer in der Stromrichtung, die von den Sammelschienen aller Werke des Netzes einschließlich des oder der Kraftwerke fortgerichtet ist. Abb. 304

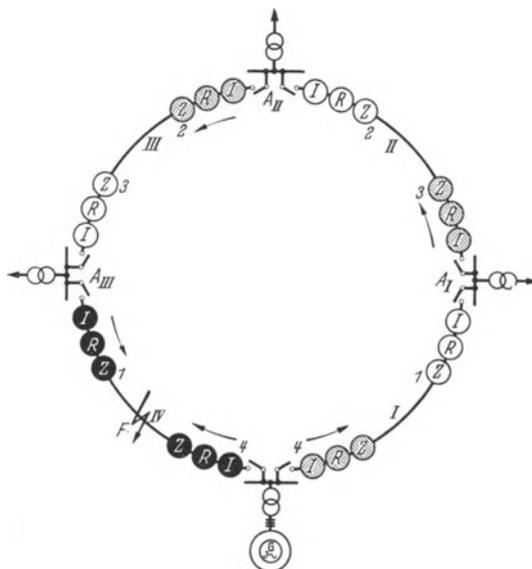


Abb. 303. Ringnetz mit gerichtetem Überstromschutz. Arbeitsweise bei Störung:

- Meßwerk in Ruhe,
- auslösendes Meßwerk,
- ◐ anlaufendes Meßwerk.

gibt hierzu die notwendigen Erklärungen für den ungestörten Zustand und für zwei Störungsfälle. Schnellauslösung dürfen derartige Überstrommeßwerke nicht erhalten.

Abb. 305 zeigt die Arbeitsweise dieses Schutzes bei einer einseitig gespeisten Doppelleitung, die bei A_{III} auf der Sammelschiene zusammengeschlossen ist. Nur mit einem Staffelschutz und Energierichtungsmeßwerken läßt sich der Vorteil der Doppelleitung für alle Werke ausnutzen, wenn Störungen (in Abb. 305 auf einer Fernleitung bei F) die Stromlieferung nicht unterbrechen sollen.

Für die eigentliche Strom- und Zeitstaffelung gelten die gleichen Gesichtspunkte wie für das einfache Netz.

f) Das **Energierichtungsmeßwerk** hat also die Aufgabe bei der Umkehr der Richtung des Energieflusses anzusprechen. Es ist dieses Meß-

werk, wie bereits angedeutet, nur ein Schalt- oder Anreglied für das eigentliche Überstrommeßwerk, um das Arbeiten des letzteren in eine gewollte Energieflußrichtung einzubeziehen.

Für das Meßwerk selbst gelten folgende Bedingungen. Es muß derart durchgebildet sein, daß es in seiner Arbeitsweise nicht von der Spannung

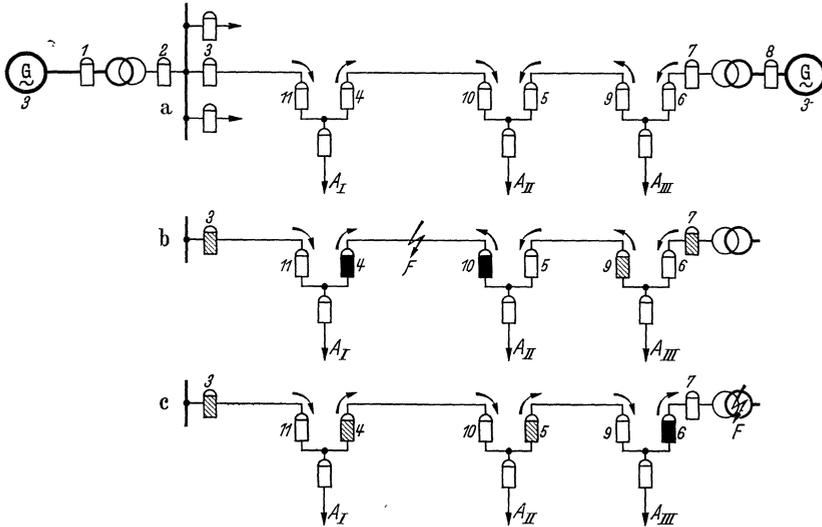


Abb. 304. Zweiseitig gespeistes Netz mit unabhängigen Strom-Zeit-Meßwerken (Zeichenerklärung Abb. 303).

abhängig ist und nicht durch Wirbelstrombildungen in seinen Meßelementen bei starken Strömen gedämpft wird. Auch höhere Harmonische in der Stromkennlinie dürfen die Ansprechgenauigkeit des Meßwerkes nicht stören. Es muß große Stromüberlastung ertragen, aber

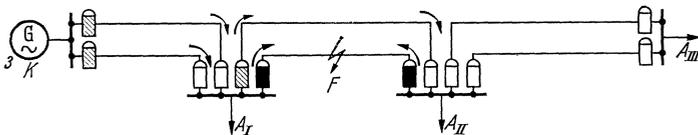


Abb. 305. Doppelleitung mit eingeschleiften Abnahmewerken und unabhängigen Strom-Zeit-Meßwerken.

trotzdem schon auf sehr kleine Leistung ansprechen, vor allem auch dann noch völlig sicher arbeiten, wenn die Spannung auf einen sehr kleinen Bruchteil (bis auf etwa 3 vH) des Nennwertes gesunken ist. Da bei einem Kurzschluß die Spannung im Stromkreis stark abfällt und hierbei ferner noch eine erhebliche Phasenverschiebung auftritt, muß das Meßwerk eine besonders große elektrische Empfindlichkeit besitzen, sonst ist mit einem zuverlässigen Ansprechen nicht zu rechnen. Einpolige Meßwerke sind daher nicht zu empfehlen. Bei Drehstrom wird die Empfindlichkeit

durch eine besondere Schaltung herbeigeführt, bei der die Spannungsspulen an die der benutzten Stromphase gegenüberliegenden Phasen angeschlossen sind (Abb. 306). Dadurch wird erreicht, daß bei einphasigem Kurzschluß zwei Spannungsspulen höher erregt bleiben, und infolgedessen das Meßwerk mit größerer Sicherheit anspricht.

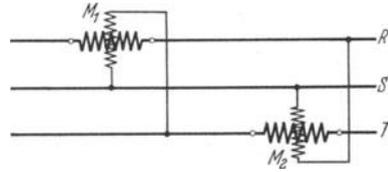


Abb. 306. Schaltung eines Energierichtungsmeßwerkes für Drehstrom.

Es ist zweckmäßig, die Meßwerke einstellbar etwa in den Grenzen zwischen 5 bis 25 oder 10 bis 50 vH Rückstrom zu wählen. Da aber die Schaltstücke nur für geringe Schaltleistung (etwa 10 VA) bemessen werden können, werden zumeist noch Zwischen- oder Hilfsmeßwerke notwendig.

Abb. 307 zeigt ein Schaltbild und Abb. 308 die Arbeitskennlinien. Wesentlich beeinflußt wird die Ansprechzeit solcher Meßwerke durch die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Bei unveränderter Höhe eines bestimmten Rückstromes verläuft die Strom-Zeitkennlinie innerhalb des Bereiches von $\varphi = +90^\circ$ bis -90° V-artig. Aus Abb. 308 ist zu ersehen, daß die Zeit bei $\cos \varphi = 1$ am kleinsten, bei $\cos \varphi = 0$ am größten ist. Bei großer Phasenverschiebung zwischen Überstrom und Spannung kann der Fall eintreten, daß das Rückstrommeßwerk verkehrt ausschlägt also eine unmittelbare Fehlschaltung einleitet. Daraus folgt die weitere Bedingung für ein brauchbares Meßwerk dieser Art, daß dasselbe möglichst weit winkelnunabhängig in der Ansprechzeit ist, also selbst bei einem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ etwa $= 0,1$ bis $0,2$ noch eine im Endlichen besitzende Zeit besitzt.

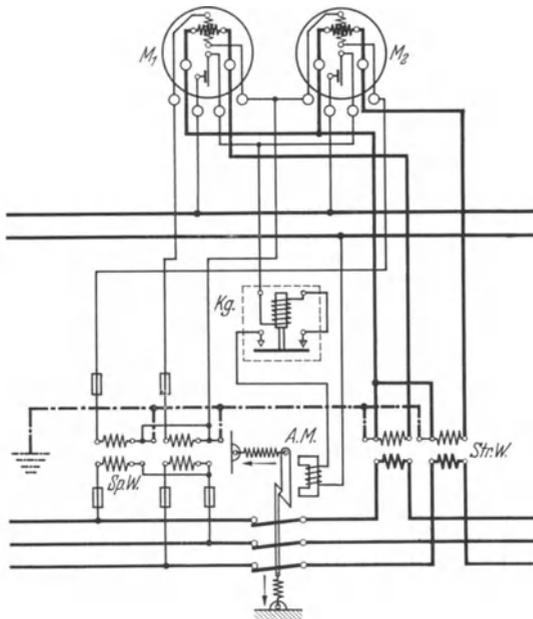


Abb. 307. Schaltbild für ein Energierichtungsmeßwerk in einer Drehstromanlage.

Das Meßwerk kann auch mit einem Schnellschaltstück versehen werden und damit hohe Schaltgeschwindigkeit erhalten. Ferner muß dieses Meßwerk in Stromkreisen, die zwei Kraftwerke verbinden, pendelfest sein d. h. sich sperren, solange die Leistung zwischen den

Kraftwerken pendelt, sonst können ebenfalls Fehlauslösungen vorkommen. Zur Sperrung wird der Rückwärtsausschlag des Meßwerkes benutzt. Ein solches Meßwerk bezeichnet man als gegen Pendelerscheinungen stabilisiert (S. 363).

g) Das widerstandsabhängige Meßwerk (Impedanz-, Reaktanz-, Distanzmeßwerk). Das unabhängige Strom-Zeit-Meßwerk ist verhältnismäßig einfacher Natur. Es befriedigt für größere Übertragungsanlagen nicht, weil es die verwickelten Verhältnisse bei einem Kurzschluß und einem Erdschluß auf der Strecke nicht beherrschen kann, selbst wenn es noch mit einem Energierichtungsmeßwerk verbunden wird¹.

Der Überstromschutz für die großen Hochspannungsnetze wird von der betrieblichen Seite mehr als Kurzschlußschutz zu bezeichnen sein. Die Schutzgeräte müssen sowohl beim zwei- und dreipoligen Kurzschluß metallischer Art oder über Lichtbogen als auch beim Doppelerdschluß in aller kürzester Zeit ansprechen. Dabei ist zu beachten, daß der Kurzschlußstrom je nach den Netzverhältnissen und der Lage der Kurzschlußstelle zu den stromliefernden Kraftwerken in seiner Größe sehr verschieden sein kann. Weiter hat ein Kurzschluß wiederum je nach seiner Lage und den Netzverhältnissen einen mehr oder weniger starken zweiphasigen oder dreiphasigen Spannungszusammenbruch oder eine entsprechende Spannungsabsenkung zur Folge; es muß auch aus diesem Grund die schnellste Herausschaltung der Fehlerstelle erfolgen. Ferner sind die zumeist verschiedenen Widerstandswerte der in der je-

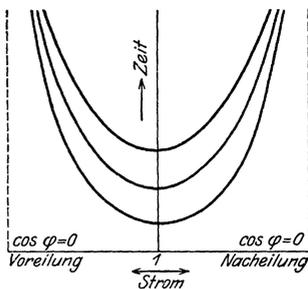


Abb. 308. Arbeitsweise des Energierichtungsmeßwerkes bei vor- und nacheilendem Strom und wechselndem Leistungsfaktor.

weiligen Kurzschlußbahn liegenden Leiterstrecken, dann die unterschiedlichen Umspannerkurzschlußspannungen zu berücksichtigen; schließlich ist nicht zu vergessen, daß die Kraftwerke ins Pendeln kommen können, wodurch die Verhältnisse noch verwickelter werden. Tritt ein Kurz- oder Erdschluß über einen Lichtbogen mit veränderlichem Widerstand auf, so kann er plötzlich durch Erlöschen des Lichtbogens verschwinden und schon im nächsten Augenblick durch Neuzündung des Lichtbogens wieder erscheinen. Die Kraftwerke dürfen bei allen diesen Verhältnissen selbstverständlich nicht aus dem Tritt fallen, ferner nicht so ins Schweben kommen, daß der Betrieb Gefahr läuft, auch nach dieser Richtung gestört zu werden. Beginnen die Maschinen zu pendeln, und neigt bereits ein Stromerzeuger zum Kippen, oder sind die Kraftwerke schon stark an dieser Grenze, so müssen sie sich wieder selbst fangen d. h. in den ordnungsgemäßen Synchronlauf kommen. Ein dreipoliger schwerer metallischer Kurzschluß z. B. durch eine Umspannerstörung oder einen Leitungszusammenbruch hat wiederum eine andere Kraftwerksbeanspruchung zur Folge.

Das sind aber noch nicht alle Wünsche und Gesichtspunkte für die

¹ Schimpf, Dr. R., u. Dr. G. Oberdorfer: Die Störungsbekämpfung in großen Netzen. Elektrotechn. u. Maschinenb. 1937 Heft 16 und 17.

Arbeitsweise der Schutzgeräte. Mit dem Abschalten eines Stromkreises einer Doppelleitung kann beim Übergehen der Gesamtleistung auf den ungestörten Stromkreis nun eine doppelte Betriebsbelastung zu übertragen sein. Hierbei dürfen die Schutzgeräte nicht ansprechen auch nicht dann, wenn stoßweise Überlastungen auftreten. Dabei kann der Belastungsstrom sogar über einem Kurzschlußstrom mit Lichtbogenbildung liegen. Die Betriebsspannung ist dabei voll vorhanden. Ferner treten betriebsmäßige Spannungsänderungen nach dem Spannungsfahrplan ein, die insgesamt die Übertragungsverhältnisse im Netz ändern, indessen nicht mit einer Stör-Spannungsabsenkung zu vergleichen sind.

Aus diesen kurzen Betrachtungen der Betriebsverhältnisse ist ohne weiteres zu ersehen, daß der Überstrom also in der Hauptsache der Kurzschlußschutz nicht mehr mit den einfachen unabhängigen Strom-Zeit-Meßwerken beherrscht werden kann, sondern sorgfältigsten Studiums bedarf, um zunächst einmal alle möglichen Störungsfälle zu erkennen und daraus die Bedingungen für den Fehlerschutz aufstellen zu können.

Der Ausbildung und Vervollkommnung dieses Fehlerschutzes, der in seinem Gesamtaufbau auch als Selektiv- oder Wahlschutz bezeichnet wird, weil er die Fehlerabschaltung nach den Netzverhältnissen wählen soll, ist ein Sondergebiet des Meßwerkbaues und wird heute auch nur durch Sonderfachleute behandelt. Die Betriebsergebnisse mit den zur Zeit durchgebildeten Meßwerken sind durchaus befriedigend. Wesentlich ist dabei die außerordentlich kleine Zeit, die verlangt werden muß, um die Fehlerstelle eng begrenzt vom Netz zu trennen.

Das in den letzten Jahren entwickelte widerstandsabhängige Meßwerk als Schein- oder Blindwiderstandsmeßwerk stellt die Fehlerortsentfernung aus dem Verhältnis von Spannung zu Strom fest (Quotientenmessung) und bestimmt die Auslösezeit t in Form einer Abhängigkeit $t = \frac{F(U)}{f(t)}$.

Abb. 309 zeigt in einfacher Darstellung ein Scheinwiderstandsmeßwerk (Impedanzmeßwerk) und Abb. 310 die praktische Ausführung¹. Ein

¹ Das Schrifttum ist in den letzten Jahren so umfangreich geworden, daß es in allen Zeitschriften zu finden ist. Es muß daher davon abgesehen werden, einzelne Aufsätze herauszugreifen.

Der Verfasser: Versuche mit dem Siemens-Westinghouse-Impedanzrelais im Thüringenwerks-Netz. Siemens-Z. 1929 Heft 10 S. 595 und ETZ 1930 Heft 39 S. 1369.

Kühn, K.: Schutzrichtungen in Höchst- und Mittelspannungs-Freileitungsnetzen. Elektr.-Wirtsch. 1938 Heft 2 S. 27.

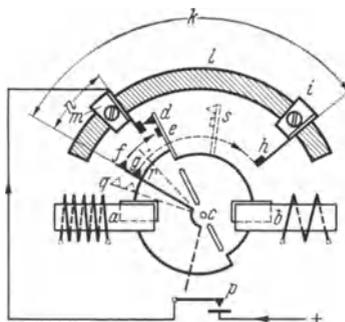


Abb. 309. Scheinwiderstandsmeßwerk mit Eilschaltstück (Grundaufbau, SSW.).

a Spannungseisen, *b* Stromseisen, *c* Ferrarisscheibe, *d* Anschlagstück, *e* Hauptschaltstück, *f*, *g* Schaltstück am Laufhebel, *h* Endzeitschaltstück, *i*, *k* Einstellung der Endzeit, *l* in *s* geeichte Bogenskala, *m*, *n* Einstellung des Anschlagsschaltstückes, *p* Eilschaltstück, *q* Ausgangslage des Laufzeigers bei positiver Zeit für den Kennlinienanfang, *r* Ausgangslage des Laufzeigers bei negativer Zeit für den Kennlinienanfang, *s* Stellung der Scheibe bei entfernten Fehlern.

Stromeisen und ein Spannungseisen wirken nach der Ferraris-Arbeitsweise auf die gleiche Scheibe. Das Stromeisen versucht die Scheibe nach links, das Spannungseisen nach rechts zu drehen. Die Scheibe ist nicht kreisförmig, sondern der Rand ist nach einer bestimmten Kennlinie gekrümmt, so daß die Eintauchtiefe der Scheibe in den Luftspalt des Stromeisens um so kleiner wird, je weiter das Stromeisen die Scheibe gedreht hat. Hierdurch wird erreicht, daß zu jedem Scheinwiderstandswert also zu dem Wert:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K} = \sqrt{R_K^2 + X_K^2},$$

$$Z_K = Z \text{ Ohm/km} \cdot l \text{ km}$$

R_K = Wirkwiderstand der Strombahn,

X_K = induktiver Blindwiderstand der Strombahn

eine bestimmte Einstellung der Scheibe gehört. Die Scheibe ist in der Mitte mit Schlitz versehen, die die beiden Hälften voneinander elektrisch vollkommen trennen. Dadurch wird das Meßwerk in seiner Laufzeit unabhängig von dem Winkel zwischen Strom und Spannung, wird also vom Leistungsfaktor der Strombahn nicht beeinflusst. Der größtmögliche Ausschlag der Scheibe ist der Meßbereich, der durch den Aufbau des Meßwerkes oder durch Vorschalten von Widerständen vor die Spannungsspule zu ändern ist. Ist der Meßbereich klein, so verläuft die Kennlinie des Meßwerkes steil, ist er groß, so hat die Kennlinie einen flachen Verlauf. An sich kann dieses Meßwerk nach einer stetigen oder gekrümmten Kennlinie arbeiten. Ist Z_K größer als der Meßbereich, so schlägt die Scheibe gegen den rechten Anschlag, ist $Z_K = 0$, so liegt die Scheibe am linken Anschlag. Den Grund-Kennlinienverlauf des Scheinwiderstandsmeßwerkes zeigt Abb. 311. Die Grundzeit beginnt bei $Z_K = 0$, die Endzeit ist besonders einstellbar und richtet sich nach der Steilheit

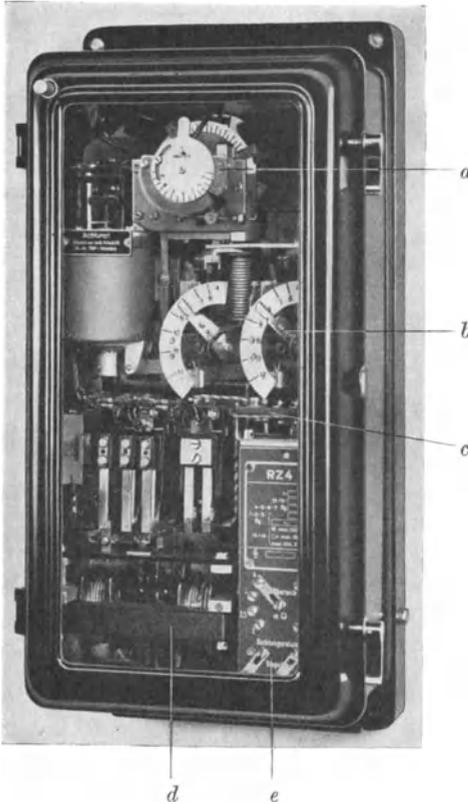


Abb. 310. Meßwerkzusammenstellung eines Schnellimpedanzschutzes der SSW.

a stromunabhängiges Widerstandsmeßwerk, *b* einstellbares Anregeglied, *c* unterbrechungslos arbeitender Strom-Umschalter (gleichzeitig Spannungs-Umschalter), *d* höchstempfindliches Energie-Richtungsmeßwerk, *e* Meßbereich- und Richtungseinstellung.

bau des Meßwerkes oder durch Vorschalten von Widerständen vor die Spannungsspule zu ändern ist. Ist der Meßbereich klein, so verläuft die Kennlinie des Meßwerkes steil, ist er groß, so hat die Kennlinie einen flachen Verlauf. An sich kann dieses Meßwerk nach einer stetigen oder gekrümmten Kennlinie arbeiten. Ist Z_K größer als der Meßbereich, so schlägt die Scheibe gegen den rechten Anschlag, ist $Z_K = 0$, so liegt die Scheibe am linken Anschlag. Den Grund-Kennlinienverlauf des Scheinwiderstandsmeßwerkes zeigt Abb. 311. Die Grundzeit beginnt bei $Z_K = 0$, die Endzeit ist besonders einstellbar und richtet sich nach der Steilheit

des Kennlinienverlaufes. Durch das Verschieben der Kennlinie nach oben oder unten wird die Grundzeit geändert. Um ein sicheres Ansprechen des Meßwerkes bei kleinstem Z_K also bei einem Kurzschluß an den Durchführungsisolatoren, beim Werkseingang oder kurz vor dem Werk zu erreichen, wird ein besonderes Eil-Schaltstück benutzt, das bis zu einem bestimmten Ohmwert des Scheinwiderstandes (also einer bestimmten Leitungslänge) das Meßwerk bei einer gleichbleibenden Zeit von z. B. 0,15 bis 0,2 s ansprechen läßt. Nach dieser Zeit erfolgt ein Sprung und das Ablaufen geschieht dann nach der Kennlinie der Grundzeit bis zur Endzeit. Aus Abb. 311 sind diese Einstellmöglichkeiten zu ersehen und Abb. 312 zeigt die Meßwerkeinstellung für einen einfachen Streckenabschnitt.

Das Scheinwiderstandsmeßwerk arbeitet also nach dem Grundsatz, den im Fall des Kurzschlusses oder Erdchlusses vorhandenen Scheinwiderstand des betroffenen Stromkreises zu erfassen. Es ist dieser Scheinwiderstand Z_K , wie bereits oben gezeigt, gleich dem Verhältnis aus U_K und I_K . Je stärker die Spannung

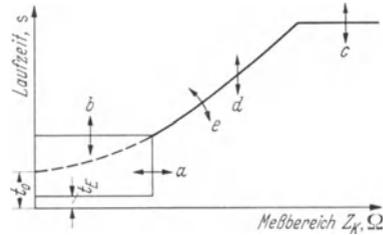


Abb. 311. Kennlinie des Scheinwiderstandsmeßwerkes mit Einstellmöglichkeiten.

a Einstellung des Eilschaltstückes mit Eilzeit, *b* Einstellung des Eilschaltstückes ohne Eilzeit, *c* Endzeiteinstellung, *d* Grundzeiteinstellung, *e* Meßbereichseinstellung, t_0 abzulesende Grundzeit, t_E Eilzeit 0,3 s.

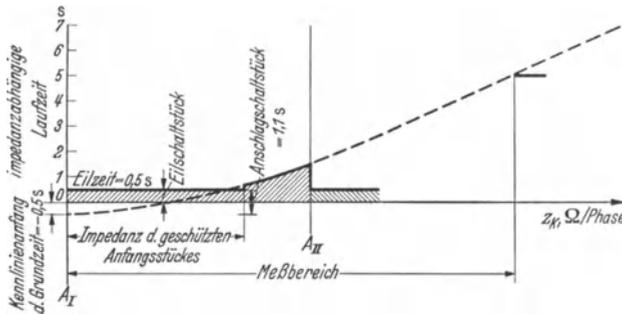


Abb. 312. Einstellung des Scheinwiderstandsmeßwerkes für einen einfachen Streckenabschnitt.

abgesunken und der Kurzschlußstrom klein oder groß ist, wird Z_K verändert:

22. Beispiel: Bei $I_K = 4 \cdot I_n$ und $U_K = 0,10 \cdot U_n$ ist bei $U_n = 50$ kV und $I_n = 500$ A:

$$Z_K = \frac{0,1 \cdot U_n}{4 \cdot I_n \cdot \sqrt{3}} = 0,025 \cdot \frac{50000}{500 \cdot \sqrt{3}} = 1,45 \text{ Ohm/Phase}$$

oder bei: $I_K = 3 \cdot I_n$ und $U_K = 0,2 \cdot U_n$:

$$Z_K = 0,0667 \cdot \frac{50000}{500 \cdot \sqrt{3}} = 3,85 \text{ Ohm/Phase.}$$

Die Meßwerke mehrerer hintereinander liegender Schalter werden also nach Ohm und Zeit gestaffelt, wobei im

Meßscheinwiderstand alle Werte bis zu der Ansprechstelle berücksichtigt sein müssen. Hierzu sind für jedes Netz stets besondere Berechnungen erforderlich. Man bezeichnet diesen Schutz daher auch als widerstandsabhängigen Zeitstaffelschutz.

Der Scheinwiderstand umfaßt geometrisch addiert den Wirkwiderstand R_K und den induktiven Blindwiderstand X_K . Der erstere herrührend nur von dem Leiterbaustoff und dem Leiterquerschnitt oder der Strombahn ist zumeist so gering, daß er keinen beachtlichen Einfluß hat. Bei Kabeln ist R_K allerdings wesentlich größer. R_K ändert sich bedeutend, wenn der Kurzschluß nicht metallisch, sondern über einen Lichtbogen besteht. Hier darf dann die Zunahme des Wirkwiderstandes nicht mehr vernachlässigt werden, was bei dem Staffelplan bzw. der Meßwerkeinstellung berücksichtigt werden muß. Der Lichtbogenwiderstand ergibt sich aus dem Spannungsabfall im Lichtbogen. Dieser ist praktisch als unveränderlich anzusehen, solange der Lichtbogen nicht aufflackert. Es wird mit etwa 2500 V/m Lichtbogenlänge gerechnet. Daraus ergibt sich dann der Lichtbogenwiderstand R_{Li} durch Division mit dem Kurzschlußstrom. Mit dem Aufflackern erhöht sich der Lichtbogenwiderstand unter Umständen bedeutend. Die Abschaltzeit wird länger ($R_K + R_{Li}$), was bei ihrer Festsetzung oder Einstellung beachtet werden muß. Die Zeitzunahme ist abhängig vom Widerstand und kann unter Umständen zu lang werden, wodurch ein anderes Meßwerk zum Ansprechen und damit zur Fehlauslösung kommt¹.

Der Einfluß des Lichtbogenwiderstandes kann durch ein bereits erwähntes Schnellmeßwerk (Eilstufe) in der Form berücksichtigt werden, daß die Lichtbogenbildung durch Verkürzung der Laufzeit aus dem Scheinwiderstand der geschützten Anfangsstrecke bis zum Sprung in die Eilzeit (Abb. 312) verhindert oder so stark beschränkt wird, daß sie den Meßwert nicht fälscht.

Da in einem Drehstromkreis bei einem Kurzschluß viele möglichen Quotienten erhalten werden können, je nachdem ein Kurzschluß zwischen 2 Phasen (RS , ST , RT), ein dreipoliger Kurzschluß, ein einpoliger Erdschluß ($R \rightarrow E$, $S \rightarrow E$, $T \rightarrow E$) oder ein Doppelerdschluß wieder zwischen den verschiedenen Phasen auftritt, kommen entweder Drei-, Zwei- oder Einmeßwerkschaltungen zur Anwendung. Die große Zahl von Meßwerken ist sehr unerwünscht, weswegen die neuerlichen Ausführungen in der Einmeßwerkschaltung durchgebildet sind, wobei die Erfassung des richtigen Strompfades und des zugehörigen Spannungspfades durch unterbrechungslose selbsttätige Umschaltung innerhalb der Meßwerkschaltung herbeigeführt wird.

Letzteres gilt für alle Schein- und die weiter unten behandelten Blindwiderstandsmeßwerke insofern, als ihnen stets durch die entsprechende Schaltung der Strom- und Spannungswandler die dem Fehler richtig zugeordneten Werte zugeführt werden. Es ist hierauf besonders zu achten, damit die Meßwerke auch tatsächlich widerstandsgetreu messen.

¹ Neugebauer, H.: Lichtbogenwiderstand und widerstandsabhängiger Zeitstaffelschutz. Elektr.-Wirtsch. 1938 S. 396.

Beim Scheinwiderstandsmeßwerk muß ein meßbarer Widerstand vorhanden sein, der in seiner Größe nicht zu klein sein darf. Das hängt vom inneren Aufbau dieses Meßwerkes ab. Für kurze Leitungsstrecken mit großem Querschnitt und besonders bei hoher Spannung ist das Meßwerk unter Umständen nicht mehr anwendbar, sofern nicht die Einzelzeitmessung benutzt wird. Ebenso begrenzt infolge der elektromechanischen Durchbildung der zu messende kleinste Strom bei kleiner Spannung und der größte Strom bei der dann vorhandenen hohen Spannung die Wirksamkeit dieses Meßwerkes. Der Strombereich liegt etwa bei 1:15, d. h. beim 15fachen des kleinsten Ansprechstromes wird das Meßwerk ungenau und kann versagen. Daher ist der kleinste Ansprechstromwert nach dem kleinsten Kurzschlußstromwert der Strecke begrenzt und begrenzt damit auch den höchsten Kurzschlußstromwert, wobei sehr kleine Ansprechwerte mit Rücksicht auf etwa auftretende betriebsmäßige Überlastungen der Strecke z. B. beim Ausschalten eines Stromkreises einer Doppelleitung unerwünscht sind.

Es bestimmen somit den Wert eines Scheinwiderstandsmeßwerkes:

der kleinste Ansprechstrom	} bei jeder etwa vorkommenden
der größte Ansprechstrom	
der jeweilige Spannungswert	Maschinenleistung,
die Auslösezeit,	
die Grundzeit,	
der Verlauf der Auslösekennlinie,	
die einstellbare Staffelzeit.	

Die Auslösezeit mit Rücksicht auf die Zeit der Spannungsabsenkung soll so tief wie möglich etwa bei 0,3 bis 0,5 s insgesamt oder für das Meßwerk selbst bei 0,1 bis 0,15 s und darunter liegen.

In den meisten Fällen kann das reine Scheinwiderstandsmeßwerk verwendet werden auch dann, wenn in gemischten Netzen Kabel- und Freileitungsstrecken wechseln. Da die Arbeitsweise unabhängig vom Phasenwinkel ist, können auch Kurzschlußdrosselspulen im Stromkreis liegen oder später eingebaut werden.

Das Blindwiderstandsmeßwerk (Reaktanzmeßwerk) arbeitet wattmetrisch und daher gegenüber dem Scheinwiderstandsmeßwerk derart, daß es nur die Blindkomponente der Quotienten aus der Meßwerkspannung und dem Meßwerkstrom mißt, also den Wirkwiderstand des Lichtbogens ausschaltet. Der jeweilige induktive Blindwiderstand $\omega \cdot L_K = X_K = \frac{U_K \cdot \sin \varphi_K}{I_K}$ der Leiterschleife bis zum Fehlerort bestimmt bei diesem Meßwerk die Auslösezeit. Sie wächst ebenfalls verhältnismäßig mit der Entfernung des Fehlerortes vom Meßwerk, hat also einen stetig ansteigenden Verlauf. Da nun die einzelnen Leitungsstücke zwischen 2 Meßwerken sehr stark in ihren Längen voneinander abweichen können, ist die Kennlinie eines Blindwiderstandsmeßwerkes nicht ohne weiteres brauchbar. So zeigt Abb. 313 die Kennlinien für 3 Meßstellen, deren Meßwerke alle auf 2 s eingestellt sind. Je kürzer die zu schützende

Strecke ist, um so steiler ist die Meßwerkennlinie einzustellen. Tritt bei F ein Kurzschluß ein, so spricht Meßwerk 2 bei z. B. 1,9 s an. Da aber Meßwerk 1 bei etwa 2,4 s anspricht, so liegt nur ein Zeitunterschied von 0,6 s zwischen beiden Schalterauslösungen. Es kann also auch Meßwerk 1 den Schalter 1 auslösen, wenn die gesamte Eigenzeit des Schalters bis zum Öffnen des Stromkreises 0,6 s übersteigt. Aus diesem einfachsten Fall ist zu ersehen, daß das Blindwiderstandsmeßwerk in dieser einfachsten Form nicht ohne weiteres Fehlanschlüsse vermeiden läßt. Die Hersteller haben daher Abwandlungen in der Arbeitsweise auch dieses Meßwerkes vorgenommen, die einen anderen Kennlinienverlauf herbeiführen und zu befriedigenden Ergebnissen geführt haben. Jedenfalls muß auch das Blindwiderstandsmeßwerk kürzeste, sicher einzuhaltende Abschaltzeiten zu erreichen gewährleisten.

Dieses Meßwerk hat beschränkte Anwendungsmöglichkeit. Es ist dort nicht brauchbar, wo der Blindwiderstand sehr klein ist z. B. bei Kabelleitungen. Auch bei gemischten Leitungen ist dieses Meßwerk

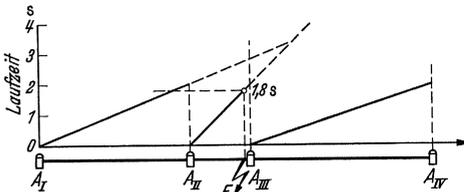


Abb. 313. Kennlinien für 3 Blindwiderstandsmeßwerke auf einer einfachen Leitungsstrecke.

nicht am Platz, weil der Blindwiderstand je Leiterstrecke ganz verschiedene Werte aufweisen kann, so daß eine Staffelung oft kaum möglich ist. Die Abhängigkeit vom Phasenwinkel ist ebenfalls besonders zu beachten. Bei Schwachlast des Nachts kann die Kapazität merklichen Einfluß auf den Blindwiderstand der Strombahn ausüben.

Das über die richtige Schaltung der Strom- und Spannungswandler beim Scheinwiderstandsmeßwerk Gesagte gilt entsprechend auch für das Blindwiderstandsmeßwerk. Die Schaltungen müssen so getroffen werden, daß der Meßwert sowohl der Größe als auch der Phasenlage nach richtig ist.

Das Schein-Blindwiderstandsmeßwerk (Impedanz-Reaktanzmeßwerk) ist eine Zusammenziehung beider Meßwerke derart, daß als erste Schnellstufe eine blindwiderstandsabhängige Wirkung des Meßwerkes herbeigeführt wird. Das ist dann erwünscht, wenn die Leitung verhältnismäßig kurz ist. In diesem Fall spielt der Lichtbogenwiderstand eine unter Umständen ausschlaggebende Rolle in der Ansprechzeit des Scheinwiderstandsmeßwerkes und kann diese so wesentlich beeinflussen, daß die gewünschte Auslösezeit durch eine den Lichtbogenwiderstand entsprechend vorgetauschte Leitungsstrecke als Schnellzeit nicht mehr auftritt. Die Blindwiderstandsschnellstufe bildet die erste, die Scheinwiderstandsabhängigkeit für den Kennlinienverlauf die zweite Stufe.

Werden diese widerstandsabhängigen Meßwerke in zweiseitig gespeisten Netzen verwendet, so müssen sie wiederum mit einem besonderen Anreeglied für die Energierichtung versehen werden

für das das früher Gesagte gilt. Abb. 314 zeigt hierzu einen Staffelplan mit Scheinwiderstandsmeßwerken.

Sollen diese Meßwerke auch Erd- und Doppelerdschlüsse erfassen, so ist das besonders zu verlangen. Alsdann werden noch weitere Schaltglieder und Meßwandlerschaltungen erforderlich. An sich können die Meßwerke auch diesen Bedingungen entsprechen.

Bei der Wahl dieser Meßwerke ist noch auf die Schaltung der Umspannerwicklungen¹ zu achten. Stern dreieckschaltung der Schaltgruppen *C* und *D* können beim Blindwiderstandsschutz zu Fehl-auslösungen führen und zwar bei zweipoligem- und bei Doppelerdschluß in dem vom Fehler nicht betroffenen, aber den Fehler speisenden Netz. Es müssen dann entsprechende Schaltgeräte (Blockierungsgeräte) verwendet werden. Bei den Schaltgruppen *A* und *B* tritt dieser Fehler nicht

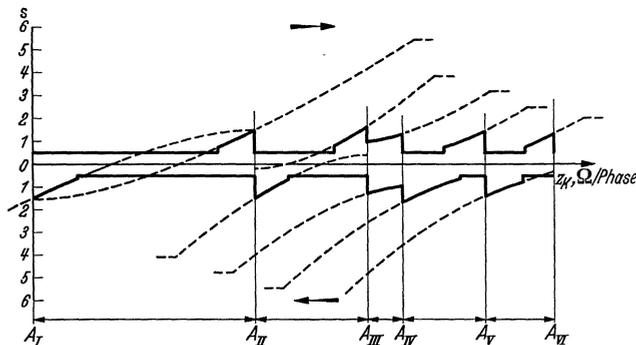


Abb. 314. Staffelplan für eine mit Scheinwiderstandsmeßwerken ausgerüstete doppeltgespeiste Leitungsstecke.

auf. Bei dreipoligem Kurzschluß sind alle Schaltgruppen ohne Einfluß auf Fehl-auslösungen.

Die Pendelsperre². Zu den Bedingungen, die der Netzschutz im Verbundbetrieb mehrerer Kraftwerke zu erfüllen hat, gehört auch die Pendelfestigkeit. Die Ursache des Pendelns ist meist eine kurzschlußartige, schnell verlaufende, in der Richtung wechselnde Stoßbelastung des Netzes durch eine Störung von längerer Dauer. Schnellauslösung eines Schalters kann die Pendelgefahr zwar stark eindämmen, aber auch eine Fehlschaltung herbeiführen. Aus diesem Grund werden die Schein- oder Blindwiderstandsmeßwerke mit einer Pendelsperre zusätzlich versehen, oder wie bereits auf S. 355 gesagt gegen Pendeln stabilisiert. Das geschieht durch ein besonderes Zeitelement, das aber das Hauptmeßwerk in seiner Schnellschaltarbeit nicht beeinflussen darf. Hat letzteres z. B. nicht innerhalb 0,5 bis 0,8 s angesprochen, innerhalb

¹ Gross, E.: Der Einfluß der Transformator-Stern-Dreieckschaltung auf den Distanzschutz der Hochspannungsleitungen gekuppelter Netze. *Elektrotechn. u. Maschinenb.* Bd. 55 (1937) S. 333 und *ETZ* 1937 Heft 48 S. 1295.

² Schimpf, Dr.-Ing. R.: Verhalten des Selektivschutzes beim Außertritt-fallen von Kraftwerken. *ETZ* 1933 Heft 47; s. Fußnote S. 198.

welcher Zeit alle Strom- und Richtungsverhältnisse nur durch den Kurzschluß selbst bestimmt sind, so wird das Schnellschalten gesperrt und das Scheinwiderstandsmeßwerk kann während weiterer 5 oder 10 s nur mit einer um 1 bis 1,5 s höheren Abschaltzeit in Wirksamkeit treten, weil nunmehr das Außertrittfallen der Maschinen eintreten kann. Es ist aber wohl zu beachten, daß die Pendelsperre die Schutzwirkung der Hauptmeßwerke nicht auf eine unzulässig hohe Zeit heraufsetzen darf, sonst verfehlt der eigentliche Schutz seinen Wert. Außerdem muß die Grundschaltung der Meßeinrichtung nach einer bestimmten Zeit, sobald die Netzspannung zur Ruhe gekommen ist, selbsttätig wiederhergestellt werden.

h) Das Spannungsabfallmeßwerk für den Überstromnetzschutz arbeitet in der Form, daß eine Stromerhöhung über einen bestimmten Betriebswert sämtliche in einem Stromkreis liegenden Überstrommeßwerke zum Ansprechen bringt. Durch diese werden die ihnen zugeordneten Spannungsabfallmeßwerke eingeschaltet, die die Auslösezeit nach der im Kurzschlußfall am Meßwertort vorhandenen Restspannung bestimmen. Die Richtung des Leistungsflusses zur Sammelschiene wird ebenfalls vom Energierichtungsmeßwerk erfaßt.

Das Spannungsabfallmeßwerk mißt wie gesagt die Restspannung und bestimmt danach die Auslösezeit. Ist die Restspannung sehr klein oder fast Null, so ist die Auslösezeit am geringsten, liegt die Restspannung hoch, wird die Auslösezeit heraufgesetzt. Nachteilig bei diesem Meßwerk ist, daß es bei kleinen Kurzschlußströmen und mehreren in Reihe liegenden Meßwerken eine genügende Zeitstaffelung nicht ermöglicht. Bei hohen Kurzschlußströmen werden entsprechend der Restspannung die Auslösezeiten zu hoch, so daß die Kurzschlußerstörungen nicht genügend eingedämmt und der Spannungsabfall für die gesunden Strecken nicht so kurzzeitig beseitigt wird, daß Synchronmotoren, Einankerumformer in Tritt bleiben oder andere Stromverbraucher durch Überstromschalter abgeschaltet werden. Schon ein Kurzschluß mit Lichtbogen kann die Restspannung wesentlich verändern. Um auch Erdschlüsse, Doppelerdschlüsse, zweiphasige und dreiphasige Kurzschlüsse richtig zu erfassen, müssen die Schaltungen der Meßwandler und Meßwerke entsprechend vorgenommen werden. Dieser Wahlschutz ist zudem nicht „pendelfest“, d. h. die durch das Pendeln auftretenden hohen Ausgleichströme verändern die Meßwerte für das Spannungsabfallmeßwerk unter Umständen so wesentlich, daß ein falscher Abschaltzustand vorgetäuscht werden kann, der dann zur Fehlerauslösung führt und zudem das Außertrittfallen der Kraftwerke nicht verhindert.

i) Der Stromvergleichsschutz (Differenzschutz, Differentialschutz¹). Beim Zeitstaffelschutz muß ein bestimmter kleinster Widerstand der Kurzschlußbahn vorhanden sein, um für die Meßwerke eine genügende Zeiterhöhung zu erhalten. Für kurze Leitungen mit großen Leiterquerschnitten ist dieser Widerstand oft nicht groß genug. Dann ist der

¹ Thewalt, A.: Einsystemiger Streckenschutz. Siemens-Z. 1936 Heft 8.

Zeitstaffelschutz nicht mehr anwendbar, und an seine Stelle muß der Vergleichsschutz treten.

Dieser Schutz beruht auf dem Vergleich von Strömen, die im gewöhnlichen Betrieb zwangsläufig ein bestimmtes Verhältnis aufweisen. Beispielsweise sind die Ströme am Anfang und Ende einer Leitung oder an den Klemmen eines Stromerzeugers im ungestörten Betrieb stets gleich. In Abb. 315 ist dieses für einen einfachen Leiter dargestellt. Die Wandlerströme auf der Unterseite I_1 und I_2 sind dann ebenfalls gleich, abgesehen von besonderen Verhältnissen, auf die noch näher eingegangen wird. Das Vergleichs-Meßwerk M wird vom Strom nicht beeinflusst und bleibt infolgedessen in Ruhe. Bei einem Fehler innerhalb der Meßstrecke sind die Ströme I_1 und I_2 nicht mehr im Gleichgewicht, das Vergleichs-Meßwerk erhält somit Strom und schaltet den Leistungsschalter der gestörten Strecke ab.

Aus dieser einfachsten Darstellung des Vergleichsschutzes ist ohne weiteres seine Aufgabe und seine allgemeine Arbeitsweise zu ersehen. Es liegt auf der Hand, daß auch für diese Schutzform mannigfaltige Ausführungen auf dem Markt sind. Bei der Auswahl handelt es sich abgesehen von bautechnischen Einzelheiten für den Schutz selbst insbesondere um die Genauigkeit der Wandlerströme im gewöhnlichen Betrieb und bei Störungen, dann um die Form der Übertragung der Meßwerte von den Meßstellen zum Schutzgerät und damit zu den Leistungsschaltern.

Die Zuverlässigkeit dieses Schutzes ist von dem einwandfreien Arbeiten der Stromwandler abhängig. In erster Linie gehört dazu, daß die Stromwandler im ungestörten Betrieb den Primärstrom genau gleich bzw. den jeweiligen Stromverhältnissen genau entsprechend übersetzen, so daß die Sekundärströme genau übereinstimmen und dieses sowohl beim Lastbetrieb und äußeren Störungen bei Auftreten des Stoßkurzschlußstromes als auch bei allen anderen Regelverhältnissen. Sind in der Stromübersetzung nur geringe Abweichungen vorhanden, so tritt schon ein Fehlerstrom sekundär auf, der das Meßwerk in Tätigkeit setzen und eine Abschaltung der zu schützenden Stromkreise herbeiführen kann, ohne daß hierzu ein betrieblicher Anlaß vorliegt. Es tritt eine Fehlauflösung ein. Darum steht der Betrieb dem Strom-Vergleichsschutz wenig freundlich gegenüber. Schon allein das dann notwendige Suchen nach dem vermeintlichen Fehler in der Wicklung kann Zeit und Schwierigkeiten ganz ungewöhnlichen Ausmaßes annehmen, ohne daß mit Sicherheit erkannt werden kann, daß nur eine Fehlauflösung vorgekommen ist.

An einen Strom-Vergleichsschutz ist daher die erste Forderung zu stellen, daß die Stromwandler und die sie verbindenden Meß- und Übertragungsleitungen zusammen mit den Anschlußleitungen der Meßwerke außerordentlich sorgfältig und auf das genaueste untersucht und abge-

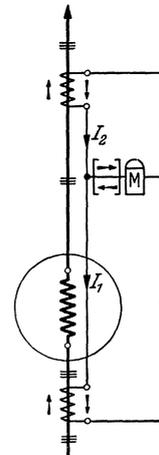
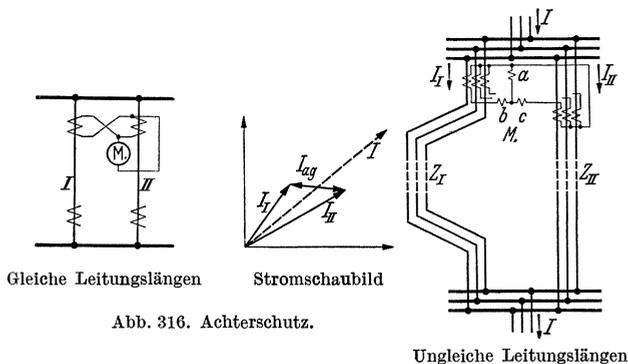


Abb. 315. Einfache Darstellung der Arbeitsweise des Stromvergleichsschutzes.

stimmt werden. Für die Stromwandler selbst muß die Leistungsfähigkeit und das gesamte Überstromgebiet genauestens übereinstimmen (Fehlerkennlinienverlauf, Sättigungsverhältnisse, innerer Aufbau). Die Überstromziffer n aller Stromwandler muß daher sehr hoch liegen ($n = 20$), d. h. es müssen entweder besonders gebaute Wandler verwendet werden, die nur für diesen Schutz zur Verfügung stehen und an die andere Meßgeräte nicht angeschlossen werden, oder es sind die Betriebsstromwandler mit besonderen Meßkernen auszurüsten. Werden letztere benutzt, so ist zu verlangen, daß auch für den Primärstrom in seinem Übersetzungsverhältnis die gleiche Genauigkeit für alle Schutzwandler besteht. Ferner müssen die Bürden der Schutzkreise gleich und abgestimmt sein.

Um die praktisch unvermeidlichen Unterschiede in den Sekundärströmen der Wandler zu berücksichtigen, die mit höherer Belastung immer größer werden (Kurzschlußstrombelastung), um das Vergleichs-



Meßwerk also unempfindlicher zu machen, ohne seinen Schutzwert zu beeinträchtigen, werden besondere Hilfseinrichtungen angewendet. Die bekannteste beruht auf der Benutzung eines Speer-Meßwerkes mit zwei Stromspulen, die den Unterschied der Wandlerströme messen und erst bei einem bestimmten Wert das Vergleichsmeßwerk zum Ansprechen bringen. Ein solcher Schutz wird als stabilisierter Schutz bezeichnet. In dieser Form sind die oben angegebenen Bedenken für die Verwendung des Vergleichsschutzes an sich als beseitigt anzusehen.

Für die Übertragung der Meßwerte kommt in Frage: eine besondere Leitungsverbindung für die Meßleitungen, eine Umwandlung der Meßströme in Gleichstrom ebenfalls mit Leitungsübertragung oder die Benutzung von Fernmeß- und Fernsteuerkanälen etwa bereits vorhandener Einrichtungen. Auch die Hochfrequenzübertragung mit Impulsgebung ist bereits zur Ausführung gekommen. Da die Wahl der Übertragungsform sich ganz nach den örtlichen Verhältnissen richtet, mögen diese kurzen Angaben genügen. Sie geben die erforderlichen Anhaltspunkte für die ersten entsprechenden Untersuchungen. Die Vorzüge und Nachteile sind verhältnismäßig einfach gegeneinander abzuwägen, wobei auf die Veränderlichkeit der Übertragungswiderstände und damit die Änderung der Wandlerströme wiederum hinzuweisen ist.

Sollen kurze parallele Leitungen mit dem Vergleichsschutz ausgerüstet werden, so kommt der Achterschutz nach Abb. 316 oder der Polygonschutz nach Abb. 317 in Frage. Hier ist die grundsätzliche Arbeitsweise des Schutzes darauf aufgebaut, daß sich die Ströme im umgekehrten Verhältnis des Leiterwiderstands aufteilen. Bei diesen beiden Schutzschaltungen handelt es sich ebenfalls um Schaltungen nach der Form des Vergleichsschutzes und zwar eines Quervergleichsschutzes. Die Sekundärwicklungen der Stromwandler in jedem Werk werden hintereinandergeschaltet. Sie bilden dadurch bei nur zwei zu schützenden Leitungen die Gestalt einer 8, bei drei und mehr Leitungen ein Vieleck (Polygon). Beim Achterschutz im gesunden Betrieb saugt der eine Wandlersatz den Strom des anderen ab, so daß in der Brückenschaltung das Meßwerk vom Betriebsstrom nicht durchflossen wird. Ein Fehler in der Leitungsanlage stört dieses Stromverhältnis, bringt somit ei-

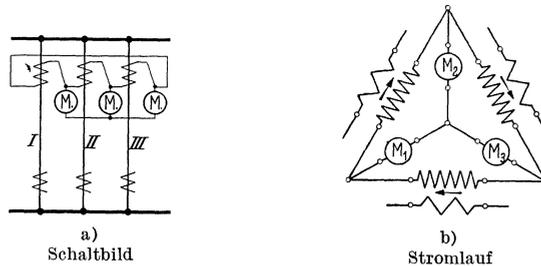


Abb. 317. Polygonschutz.

nen Fehlerstrom hervor, der das Vergleichsmeßwerk zum Ansprechen anregt. Der Achterschutz kann auch für ungleiche Leitungslängen Verwendung finden. Beim Polygonschutz liegen die Meßwerke in den Diagonalen des Vielecks nach dem gemeinsamen Mittelpunkt. Beim Ansprechen schließen diese Meßwerke wiederum Hilfsstromkreise, wodurch das Abschalten der kranken Leitung erfolgt (Abb. 317 b). Im ungestörten Betrieb schließen sich die Wandler-Sekundärströme über das Vieleck. Da die Eckpunkte gleiches Potential haben, sind die Meßwerke stromlos. Bei einer Streckenstörung auf einer Leitung wird die Stromverteilung gestört, und das betreffende Meßwerk kommt zum Ansprechen.

Wird der Vergleichsschutz für Umspanner angewendet (S. 383), so ist er bei der Aufstellung des Netzstaffelplanes für die Leitungsmeßwerke zu berücksichtigen.

Bei einer zweiseitig gespeisten Strecke sind wiederum Richtungsmeßglieder zu benutzen. Diese können ohne Staffelzeit über die Hilfsverbindungen auf den Vergleichsschutz wirken. Auch ein Überstrom-Zeitschutz und eine Pendelsperre können in die Anreeglieder aufgenommen werden.

k) Der Stromerzeugerschutz gegen äußere Störungen ist so zu wählen, daß Störungen aus den Abnahme- und Verteilungsanlagen die Maschinen nicht abschalten, die Stromlieferung also nicht unterbrechen dürfen.

Bei Gleichstrom und kleinen Leistungen genügen zumeist Streifensicherungen und Hebelschalter, bei größeren Leistungen und Parallelbetrieb mehrerer Maschinen werden nach S. 461 für den einen Pol Selbstschalter mit unabhängiger Strom-Zeitauslösung, für den zweiten Pol Streifensicherungen und Hebelschalter oder auch zweipolige Selbstschalter eingebaut. Ist hier keine genügende Zuverlässigkeit gewährleistet, so wird Schnellauslösung für die Maschinenschalter gewählt, die dann so hoch einzustellen ist, daß sie nur im äußersten Fall und nach Schmelzen der Sicherungen zum Ansprechen kommt. Liegt eine Batterie parallel, so sind die Selbstschalter noch mit Rückstrom- und Spannungsrückgangsauslösung auszurüsten.

Bei Drehstrom und Niederspannung für kleine Leistung genügen wiederum Sicherungen und Hebelschalter, bei größeren Leistungen und Hochspannung sind die Schalter mit unabhängigen Strom-Zeitmeßwerken zu versehen. Schnellauslösung auch als Kurzschlußschutz darf nicht angewendet werden. Jede Phase hat ein Meßwerk zu erhalten. Über die zusätzliche Anwendung des Wärmeschutzes ist auf S. 350 gesprochen worden.

Die Einstellwerte für Strom und Zeit richten sich nach der zulässigen Überlastung der Maschine und den besonderen Verhältnissen der Anlage, so nach der Kurzschlußstromdämpfung durch Umspanner oder Drosselspulen oder nach den Endzeiten eines Staffelpfanes für die Netzmeßwerke. Größere Abschaltzeiten als 10 bis 12 s werden zumeist nicht zugelassen.

Beim Parallelbetrieb mehrerer Maschinen und im Verbundbetrieb mit anderen Werken kann durch das plötzliche Ausfallen von Maschinen eine Überlastung der noch im Betrieb befindlichen Maschinen hervorgerufen werden. Hierauf ist bei der Einstellung der Maschinenschaltermeßwerke Rücksicht zu nehmen. Für diesen Fall zusätzlich noch Überlastmeßwerke einzubauen ist zumeist nicht empfehlenswert, weil der Schutz nur verwickelter wird und Fehlschaltungen besonders auch im Hinblick auf die kurzzeitige Überlastbarkeit vorkommen können, die dann wieder andere parallel laufende Maschinen durch Überlastungen gefährden. Um solche Störungen anzuzeigen, ist es einfacher und sicherer, die Maschinenstromzeiger mit Meldestücken zu versehen, die beim Überschreiten der zulässigen Strombelastung Hör- und Sichtmeldegeräte betätigen und so die Bedienung auf den Fehler aufmerksam machen. Damit wird schneller und zuverlässiger erreicht, daß die zweckmäßigsten Abhilfemaßnahmen ergriffen werden z. B. Zuschalten einer neuen Maschine, Abtrennen weniger wichtiger Stromkreise, Einsatz von Zusatzfeuerungen in den Kesseln, Notruf an die Aushilfsleute, Eingreifen des Betriebsführers u. dgl.

1) Der Schutz gegen innere Maschinenstörungen erstreckt sich auf den Schutz gegen:

- unzulässige Wicklungserwärmung,
- Wicklungsschluß,
- Körperschluß,
- Windungsschluß.

Je größer die Maschine ist, und je weniger nach der Zahl der Maschinen und den Belastungsverhältnissen das Kraftwerk den längeren Ausfall einer Maschine durch innere Beschädigungen ertragen kann, um so umfangreicher wird der Schutz gegen innere Störungen anzuwenden sein. Seine Hauptaufgabe besteht in der schnellsten Kennzeichnung eines inneren Fehlers und einer selbsttätigen Abschaltung der Maschine, um die Ausbreitung des Fehlers einzuschränken. Dadurch kann der Umfang der Störung und der Instandsetzungsarbeiten wesentlich eingeschränkt werden. Also auch die wirtschaftliche Seite ist hier bestimmend.

Die Überwachung der Wicklungstemperatur erfolgt durch eingebaute Temperaturzeiger, für die aus bautechnischen Gründen nur Wärmeelemente (Widerstandstemperaturzeiger) in Frage kommen. Der Einbau solcher Temperaturmeßeinrichtungen wird von den REM gefordert (Abb. 128).

Den Verlauf der Temperatur im Kupfer und Eisen des Ständers eines Drehstromerzeugers zeigt Abb. 108. Er hängt von der Art der Kühlung ab. Bei der Radialkühlung liegen die Stellen höchster Temperatur etwa in der Mitte des Ständers, bei der Axialkühlung in der Nähe des Luftaustrittes also seitlich verschoben.

Die Temperaturüberwachung der Maschinen im Betrieb ist eine wesentliche persönliche Aufgabe der Bedienung, um aus den fortlaufenden schriftlichen Aufzeichnungen feststellen zu können, ob sich und an welchen Meßstellen Temperaturerhöhungen zeigen, die unter Umständen zu besonderen Maßnahmen Veranlassung geben müssen. Dabei sind Höhe der Belastung, Dauer, Kühlmitteltemperatur beim Ein- und Austritt und Außentemperatur gleichzeitig zu beobachten. Die in den REM festgelegten Höchsttemperaturen für Eisen und Wicklungen sind mit den Temperaturaufzeichnungen zu vergleichen.

Für den Betrieb ist ferner von besonderer Bedeutung, an welchen Stellen die Wärmeelemente in der Maschine eingebaut sind. Der Hersteller muß hierzu unbedingt die erforderlichen Angaben machen und zweckmäßig zeichnerisch darstellen, damit die Betriebsüberwachung auch richtig und mit Erfolg durchgeführt werden kann.

Die Feldschwächung und Schnellentregung ist der Behandlung der weiteren Schutzvorrichtungen voranzustellen, weil letztere nicht immer mit Sicherheit verhüten können, daß der beim Isolationsfehler entstehende Lichtbogen sofort zum Verlöschen kommt, und ein Brand im Inneren der Maschine vermieden wird. Sie müssen in ihrer Wirkung dadurch unterstützt werden, daß die Maschine schnell und vollständig spannungslos gemacht also entregt wird.

Die einfachste Form bei Synchronmaschinen mit Eigenerrregung besteht darin, die Entregung durch Feldschwächung der Erregermaschine mit Hilfe eines Vorschaltwiderstandes im Nebenschlußkreis herbeizuführen (Abb. 318). Der Schalter *Sch.* schließt den Widerstand *R* im Regelbetrieb kurz. Beim Auslösen des Maschinenschalters oder Ansprechen eines Meßwerkes des Maschinenschutzes wird *Sch.* stromlos und hebt dadurch den Kurzschluß von *R* auf. Dadurch wird die

Erregung herabgedrückt. Eine besondere Schaltung bringt gleichzeitig den vollen Widerstand des Erregerreglers zur Wirksamkeit. Die Spannung sinkt hierbei innerhalb einer Zeit von 3 bis 5 s auf 50 bis 60 vH und dann in etwa 1 min bis auf die magnetische Restspannung. Abb. 319 zeigt hierfür ein Oszillogramm. Die magnetische Restspannung beträgt 20 bis 30 vH der Maschinen-Nennspannung. Das genügt zumeist schon allein

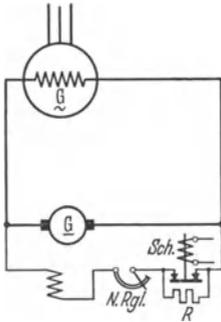


Abb. 318. Selbsttätige Entregung einer Drehstromsynchronmaschine durch Feldschwächung der Eigenerregermaschine.

der Zeit nach nicht, um den gewollten Erfolg zu erzielen. Daher wird diese Schaltung nur bei kleineren Maschinen und in der Hauptsache zur Vermeidung der Spannungserhöhung bei unzulässiger Drehzahlsteigerung angewendet.

Bei großen Maschinen mit Eigenerregung erfolgt die Entregung mit Hilfe eines Schwingungswiderstandes im Ankerstromkreis der Erregermaschine nach Abb. 320. Der Wirkwiderstand R_1 ist im ungestörten Betrieb der Maschine wiederum durch den Schalter *Sch.* kurzgeschlossen. Tritt eine innere Störung ein, so wird durch die diese Störung erfassende Schutzvorrichtung oder auch durch Druckknopf von Hand der Schalter *Sch.* geöffnet und die Spannung der Erregermaschine schnell zum Abklingen gebracht. Da der Widerstand R_1

einen bestimmten Widerstand für den Nebenschlußkreis der Erregermaschine bedingt, dieser aber je nach der Stellung des Nebenschlußreglers der Erregermaschine verschieden sein kann, wird mit dem Ansprechen des Schalters *Sch.* der Nebenschlußregler gleichzeitig kurzgeschlossen und der feste Widerstand R_2 eingeschaltet. Die Zeit bis zum vollen Entregen der Maschine dauert etwa 1 bis 2 s (Abb. 321). Bei dieser Schaltung verschwindet auch der Restmagnetismus der Erreger-

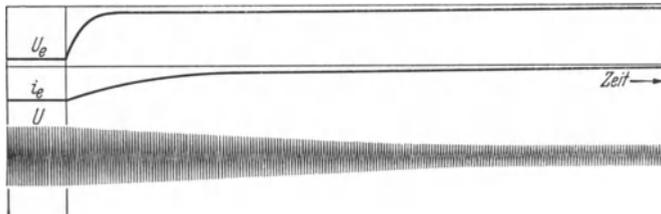


Abb. 319. Oszillogramm für den Verlauf des Erregerstromes, der Erregerspannung und der Drehstromspannung bei der Entregung nach Abb. 318.

maschine fast vollständig. Er muß beim erneuten Inbetriebsetzen des Stromerzeugers durch kurzes Erregen aus einer Gleichstromhilfsquelle wiederhergestellt werden.

Für Erregermaschinen mit Fremderregung wird die gleiche Schaltung nur mit der Änderung angewendet, daß zuerst durch einen selbsttätigen Schalter die Erregermaschine auf Selbsterregung umgeschaltet und dann der Entregungsvorgang nach Abb. 320 durchgeführt wird.

Mit dem Schalter *Sch.* wird häufig gleichzeitig der Auslösestromkreis des Maschinenschalters verbunden, so daß die Maschine auch sofort vom Netz oder von den Sammelschienen getrennt wird.

Das Wiedereinschalten des Schalters *Sch.* kann von Hand oder durch Fernbetätigung erfolgen. Dabei muß darauf geachtet werden, daß bei Neuerregen der Erregermaschine die Hilfsstromquelle nur kurzzeitig in Anspruch genommen wird und der Erregerregler in seiner Endstellung steht, um eine zu starke Leistungsentnahme aus der Hilfsstromquelle zu verhindern.

Besonders bei der Kurzkupplung zwischen Stromerzeuger und Umspanner ist diese Schnellentregung erforderlich, weil beim Ansprechen des Leistungsschalters auf der Hochspannungsseite und vollbelasteter Gruppe der hochoerregte Stromerzeuger auf den dann plötzlich leerlaufenden Umspanner arbeitet, und dadurch gefährliche Überspannungen auftreten können. Diese entstehen infolge der hohen und beim Schalterfall noch gesteigerten Sättigungsverhältnisse des Umspanners, die eine stark verzerrte Magnetisierungskennlinie und daraus eine stark verzerrte Spannungskennlinie zur Folge haben. Die in letzterer enthaltenen Oberwellen hoher Frequenz erzeugen starke Spannungsspitzen und so-

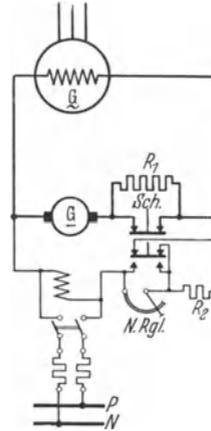


Abb. 320. Selbsttätige Schnellentregung einer Drehstrom-Synchronmaschine mit Eigenerregermaschine.

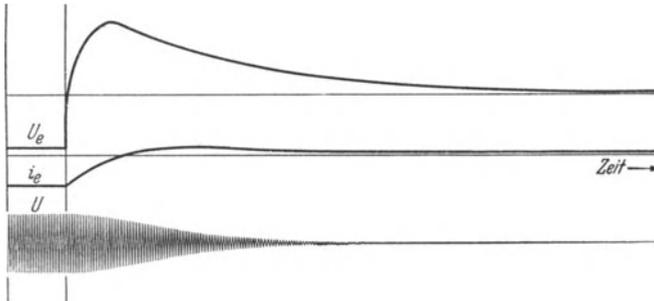


Abb. 321. Oszillogramm für die Aufnahme des Erregerstromes, der Erregerspannung und der Drehstromspannung bei der Schnellentregung nach Abb. 320.

mit eine Gefährdung der Isolation gegen Erde. Die hohen Frequenzen können auch Eigenschwingungen der Wicklungsteile hervorrufen, die zur Spannungsresonanz führen und die Isolation zwischen den Windungen überbeanspruchen.

Der Schutz gegen Wicklungsschluß soll einen solchen Fehler schon im Entstehen erfassen, und dadurch eine größere Zerstörung der Wicklung infolge der vollen Ausbildung des Kurzschlusses mit Lichtbogen, den damit verbundenen Eisenbrand des Blechpaketes und einen

inneren Maschinenbrand verhindern. Es wird hierfür der Strom-Vergleichsschutz nach dem Schaltbild Abb. 315 verwendet. In jede Phasenleitung der Wicklung nach dem Sammelschienenanschluß und nach dem Nullpunkt bei Sternschaltung zu wird ein Stromwandler eingebaut. Die Sekundärwicklungen werden in Reihe geschaltet und liegen über Meßwerke in einer Brückenschaltung.

Im störungsfreien Betrieb sind die Ströme in den Sekundärstromkreisen der zusammengehörigen Wandler im Meßwerk entgegengesetzt gerichtet und induzieren gleiche elektromotorische Kräfte. Daß Meßwerk bleibt stromlos, solange I_1 und I_2 gleich groß und in Phase miteinander sind. Durch einen Wicklungsschluß wird dieses Verhältnis gestört. Der

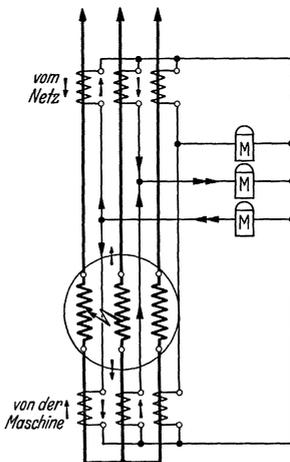


Abb. 322. Wicklungsschluß und Arbeitsweise des Strom-Vergleichsschutzes.

Fehlerstrom bringt das in seinem Stromkreis liegende Meßwerk oder sein Anreeglied zum Ansprechen und bewirkt dadurch die Abschaltung der Maschine von den Sammelschienen, sowie eine sofortige Entregung und gegebenenfalls auch die sofortige Auslösung einer Brandlöscheinrichtung. Abb. 322 zeigt den Stromlauf bei einem zweiphasigen Wicklungsschluß.

Für diesen Schutz ist weiter die Ansprechempfindlichkeit besonders bestimmend, die etwa als genügend bei einem Fehlerstrom von 15 bis höchstens 20 vH des Nennstromes angesehen werden kann. Da das Abschalten der fehlerhaften Maschine so schnell als praktisch möglich erfolgen soll, andererseits die Ansprechempfindlichkeit des Vergleichsmeßwerkes nach der Zeit nicht fein eingestellt werden kann, um Fehlauselösungen zu vermeiden, wird der Strom-Vergleichsschutz noch mit einem Zeitmeßwerk versehen, das mit einer Auslöseverzögerungszeit von etwa 0,25 s den Schalter und die Feldschwächung, oder die Entregung zum Ansprechen bringt. Eine Verkürzung dieser Zeit ist sehr erwünscht, aber praktisch schwer ausführbar. Das Zeitmeßwerk soll vor Fehlauselösungen bei ungleichen Sättigungen der Wandler z. B. bei einem zweipoligen Dauerkurzschlußstrom schützen.

Werden die Wandler am Leistungsschalter so weit an die Schaltanlage gerückt, daß die Anschlußleitung von der Maschine zu letzterer einbegriffen ist, so kann auch ein Fehler in dieser Anschlußleitung mit dem Vergleichsschutz erfaßt werden.

Bei der Kurzkupplung Stromerzeuger—Umspanner ist dieser Schutz über den Umspanner mit auszudehnen, und dann der Schutz mit Sperrmeßwerken als stabilisierter Strom-Vergleichsschutz zu benutzen. Diese Schaltung muß auch angewendet werden, wenn die Ansprechempfindlichkeit größer als etwa 5 bis 10 vH des Nennstromes sein, oder die Auslösung ohne Zeitverzögerung erfolgen soll.

Aus Sicherheitsgründen ist die dreipolige Ausrüstung zu empfehlen.

Die Ersparnisse bei der zweipoligen Schaltung sind betrieblich nicht zu vertreten. Doppelerdschlüsse können mit der zweipoligen Schaltung nicht erfaßt werden.

Den Vergleichsschutz beim Parallelbetrieb mehrerer Maschinen eines Kraftwerkes durch Energieichtungs-Meßwerke zu ersetzen wird nicht mehr angewendet, weil diese Meßwerke nicht immer zuverlässig arbeiten. Wie bereits gesagt sind sie von der Spannung stark abhängig, und das ist unerwünscht, weil bei plötzlichen Spannungsschwankungen Fehlauflösungen vorkommen können, oder die Meßwerke zu unempfindlich eingestellt werden müssen und dann ihren Zweck verfehlen.

Der Schutz gegen Körperschluß (Erdschlußschutz)¹. Wird die Isolation der Wicklung an irgendeiner Stelle durchbrochen, so erhält die Wicklung Körperschluß oder Erdschluß, d. h. ein Strom fließt über die Fehlerstelle nach Erde. Beträgt dieser Strom nur etwa 1 bis 2 A, und wird der Erdschluß sofort bemerkt, so bleibt die Wicklungsbeschädigung nur gering und ist verhältnismäßig leicht zumeist in kurzer Zeit zu beheben. Die Maschine soll aber möglichst schnell aus dem Betrieb genommen werden. Wird der Fehler nicht bemerkt, so wird der Isolationsdurchbruch sehr bald größer, der Erdschlußstrom immer höher, bis an der Fehlerstelle ein Lichtbogen solcher Größe entsteht, daß die benachbarten Wicklungen mit erfaßt werden. Die damit verbundene Zerstörung der Wicklung und des Eisenkörpers kann oft in überraschend kurzer Zeit zu einer vollständigen Zerstörung der Maschine führen. Ein Erdschlußstrom über 5 A genügt zumeist schon zu schweren Schäden. Liegt die Maschine im Parallelbetrieb mit anderen Maschinen, so kann die Speisung der durch die Wicklungszerstörung herbeigeführten Kurzschlußstelle aus dem Netz den Schaden noch wesentlich erhöhen. Abb. 323 zeigt einen Wicklungs- und Eisenschluß, und Abb. 324 die vollständige Zerstörung eines Turbostromerzeugers aus Ursache eines Erdschlusses.



Abb. 323. Wicklungszerstörung durch Körperschluß (Erdschluß).

Für die Sicherheit des Betriebes im weitesten Sinn wird daher ein Erdschlußschutz verlangt, der für alle möglichen Fälle so einwandfrei arbeitet, daß keine Gefahren aus dem Erdschluß entstehen können. Wie das Folgende zeigen wird, sind aber die Erdschlußmöglichkeiten so man-

¹ Bütow, Dr.-Ing. W.: Die Entwicklung des Erdschlußschutzes für Stromerzeuger. AEG-Mitt. 1937 Heft 7 S. 233. Diesendorf, Dr., u. Dr. E. Gross: Zur Theorie der Pohlischen Nullpunktsverlagerung für vollständigen Gehäuse-schluß. Elektrotechn. u. Maschinenb. 1936 S. 253. Bopp, E.: Gestellschlußschutz f. Generatoren. Siemens-Z. 1936 Heft 11 S. 457.

nigfaltig und teilweise auch so verwickelter elektrischer Natur, daß ein allen Anforderungen entsprechender Schutz heute noch nicht auf dem Markt ist, wengleich durch Sonderschaltungen und Sonderausführungen schon ein hoher Grad der Zuverlässigkeit erreicht wird. Es mag hierzu der Hinweis aus dem Betrieb genügen, daß die Fehlauslösung einer Maschine durch den Erdschlußschutz, abgesehen von der Störung der Stromlieferung, an sich zu größter Beunruhigung führt und sorgfältigster Messungen bedarf, um die Auslösung als Fehlauslösung sicher festzustellen. Aus diesem Grund ist bei der Entscheidung über den Einbau eines Erdschlußschutzes und dann ganz besonders bei der Auswahl des Schutzes selbst mit besonderer Vorsicht vorzugehen.

Da eine in Stern geschaltete Wicklung im Nullpunkt mit Erde verbunden werden muß, um die Körperschlußbahn zu erhalten, in der das Schutzmeßwerk ein-



Abb. 324. Infolge Erdschlusses zerstörte Maschine.

zugliedern ist, ergeben sich die verwickelten Verhältnisse einmal daraus, ob die Maschine auf Sammelschienen arbeitet, von denen ohne oder mit Umspannern Freileitungen oder Kabel abgehen, oder ob die Maschine mit ihrem Umspanner kurzgekuppelt ist, wenn ein Netzerdschluß auftritt. Weiter kann der Isolationsdurchbruch am Anfang oder am Ende

oder an einer beliebigen Stelle der Wicklung liegen. Dann kann der Körperschluß zuerst schleichend sein, d. h. ganz geringe Bedeutung haben oder sofort einen hohen Wert aufweisen. Schließlich darf ein Netzerdschluß den Erdschlußschutz der Maschine nicht auslösen, und ein Doppelerdschluß in einer Maschine und einer Netzstelle nur das Meßwerk der gefährdeten Maschine zum Ansprechen bringen.

Hat die Wicklung Erdschluß, dann soll sie wie gesagt so schnell als möglich vom Netz getrennt werden. Um die Ausbreitung des Fehlers zu verhindern, wird die Maschine sofort entregt. Zur Löschung eines aus der Wärmeentwicklung durch den Erdschlußstrom entstehenden Wicklungsbrandes wird zugleich mit der Entregung bei großen Maschinen noch eine Brandlöscheinrichtung in Tätigkeit gesetzt.

Auf die einzelnen Ausführungsformen des Erdschlußschutzes kann nicht näher eingegangen werden. Es sollen daher nur die grundsätzlichen Schaltungen kurz zur Besprechung kommen. Feinheiten wie Schutz gegen Oberströme u. dgl. (Siebketten) werden nicht behandelt. Sie gehören aber zur Beurteilung eines guten, sicher arbeitenden Schutzes.

Arbeitet die Maschine unmittelbar auf Sammelschienen allein oder im Parallelbetrieb mit anderen Maschinen, so wird der Nullpunkt jeder Maschine über einen Stromwandler kurz an Erde gelegt. Beim Erdschluß wird der Nullpunkt um die Phasenspannung gehoben. Die Erdschlußleistung = Nullpunktspannung $U_0 \times$ Nullpunktstrom I_0 wird einem Leistungsmeßwerk M (Abb. 325) zugeführt, das beim Ansprechen die vorgenannten Schalthandlungen einleitet. Da I_0 der Spannung U_0 verhältnismäßig ist, I_0 und U_0 ferner von der Lage des Fehlers in der Wicklung abhängen, ist die Erdschlußleistung am größten bei Klemmenschluß (Punkt 1 in Abb. 325) und am kleinsten, wenn der Fehler in der Nähe des Nullpunktes liegt (Punkt 3 in Abb. 325). Die Leistung nimmt quadratisch mit abnehmender Entfernung von den Klemmen ab. Mit dieser einfachen Schaltung können etwa 90 vH der Wicklung geschützt werden, da in der Nähe des Nullpunktes die Leistung zur Betätigung des Meßwerkes zu klein und damit zu unsicher wird. Um noch weiter zu kommen, werden besondere Maßnahmen erforderlich so z. B. Verwendung von spannungsabhängigen Widerständen, wie sie ähnlich beim Überspannungsschutz benutzt werden, die den Arbeitsstrom für das Meßwerk annähernd unverändert halten.

Der Schutz in dieser Form ist unvollständig, da er bei einem Erdschluß im Netz zum Ansprechen kommen kann, auch wenn kein Körperschluß in der Maschine vorhanden ist, denn dann tritt ebenfalls ein Strom über den Nullpunkt in die Maschine, der eine Verlagerung des Nullpunktes und damit eine Nullpunktspannung zur Folge hat. Um daher Fehlauflösungen zu verhüten, werden in die Maschinenzuleitungen zum Leistungsschalter und möglichst nahe an diesen herangerückt zur besonderen Stromüberwachung Stromwandler eingeschaltet. Da die Summe der Ströme in den Phasen einer Maschine im ungestörten Zustand gleich Null ist, so ist im Erdschlußfall diese Summe gleich dem Fehlerstrom.

Nach einer Unsymmetrieschaltung von Holmgreen, bei der diese Stromwandler gegensinnig mit dem Auslösewandler im Maschinen-erdschlußkreis zusammengeschaltet sind, sperrt der Erdschlußstrom eines Netzerdschlusses das Meßwerk. Tritt dagegen ein Körperschluß auf, so

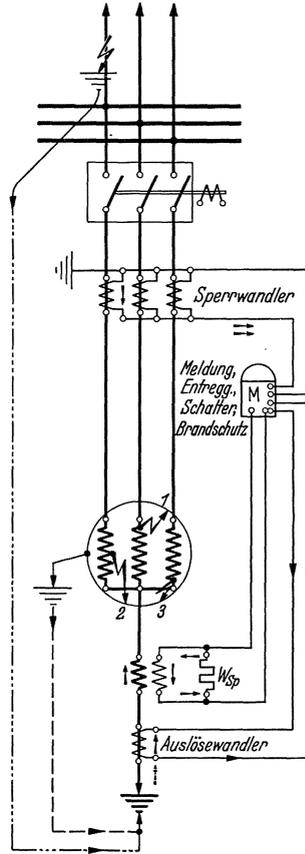


Abb. 325. Erdschlußschutz für eine Drehstrom-Synchronmaschine.

1, 2, 3 Lage des Isolationsfehlers in der Wicklung.

wird das Meßwerk durch den Strom des Auslösewandlers zusammen mit der Nullpunktspannung des Spannungswandlers zum Ansprechen gebracht. Durch Wahl des Übersetzungsverhältnisses der Wandler kann noch eine verhältnismäßig kleine Erdschlußleistung erfaßt werden. Eine vollständige Sicherheit ist mit diesem Schutz aber auch nicht zu erreichen.

Bei der Kurzkupplung zwischen Maschine und Umspanner kann das Leistungsmeßwerk nicht verwendet werden, weil ein Erdschlußstrom im Netz trotz der galvanischen Trennung durch den Umspanner infolge der kapazitiven Kopplung auch zum Maschinennullpunkt fließen, hier eine Nullpunktverlagerung herbeiführen und dann eine Fehlauslösung bringen kann (Abb. 326). Daher wird für diese Maschinenschaltung der Nullpunkt über einen Widerstand geerdet, in die Erdleitung ein Strommeßwerk verbunden. Der Erdungswiderstand muß dann wiederum ein spannungsabhängiger Widerstand sein. Auch diese Schaltung gibt nicht für alle Fälle die zu fordernde Sicherheit, sie erfaßt zudem nur einen Teil der Wicklung. Auf erweiterte Schaltungen soll nicht mehr eingegangen werden, nur muß erwähnt werden, daß schließlich durch die von Pohl angegebene Schaltung mit einer Zusatzstromquelle eine vollständige Überwachung der Wicklung möglich ist¹.

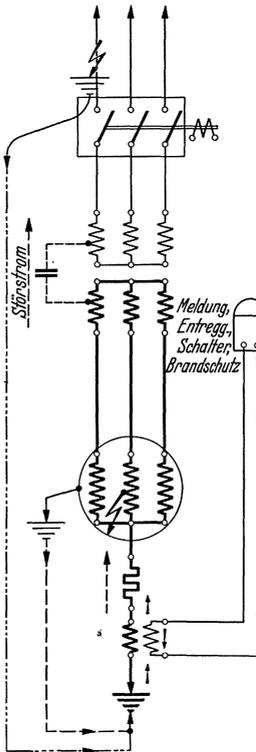


Abb. 326. Erdschlußschutz für einen mit Umspanner kurzgekuppelten Maschinensatz.

Wenn vorher bereits auf die verwickelten Verhältnisse hingewiesen wurde, die zu beachten sind, so ist weiter darauf aufmerksam zu machen, daß alle bisher behandelten Ausführungen des Schutzes nicht in Wirksamkeit treten, wenn eine mit Körperschluß behaftete Maschine angefahren wird. Soll auch ein solcher Fehler-schutz vorhanden sein, so bedarf das weitere Maßnahmen.

Ist das Netz durch Erdschlußspulen geschützt, wobei wiederum zu unterscheiden ist zwischen geschützten Leitungen, die an den Sammelschienen liegen, auf die die Maschinen unmittelbar arbeiten, und der Maschinenschaltung mit Umspannern, so wird der Erdschlußschutz der Maschinen kaum noch ausführbar oder in seiner Gesamtanordnung für den Betrieb unerwünscht umständlich und schwer zu überwachen. Eine besondere Abstimmung ist dann zwischen den Erdschlußschutzspulen des Netzes und dem Ansprechstrom der Körperschlußmeßwerke erforderlich.

¹ Siehe Fußnote S. 373.

Der Schutz gegen Windungsschluß. Schließlich ist auch noch diese Schutzvorrichtung kurz zu behandeln. Bei einem Schluß zwischen zwei Windungen der Ständerwicklung einer Phase wird ein gewisser, nach der Lage der Fehlerstelle bestimmter Teil der Wicklung kurzgeschlossen. Er fällt für die Erzeugung der Phasenspannung aus, und die Maschine wird ebenfalls gefährdet.

Die Wirkungsweise dieses Schutzes beruht wiederum auf der Verlagerung der Sternpunktspannung durch die Verkleinerung der einen Phasenspannung. Der Spannungsunterschied wird meßtechnisch durch ein Spannungsmeßwerk erfaßt, das beim Auftreten des Fehlers eine Anzeigevorrichtung oder auch den Leistungsschalter betätigt. Abb. 327 zeigt eine einfache Schaltung. Ein Spannungswandler wird zwischen den Maschinensternpunkt und den Sternpunkt einer Drossel (Stütz-

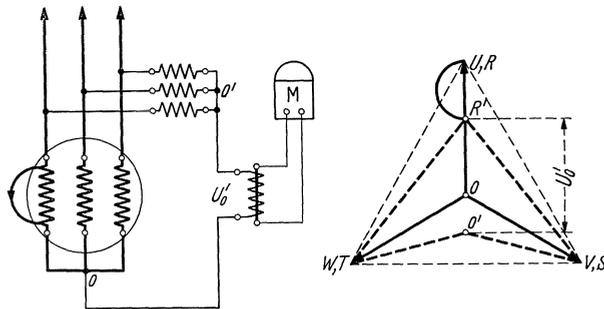


Abb. 327. Schaltbild für einen Schutz gegen Windungsschluß.

drossel) gelegt, mit dem die Spannungsverlagerung am Wicklungssternpunkt unmittelbar gemessen wird.

Die Anwendung dieses Schutzes hat zur Voraussetzung, daß die Wicklung symmetrisch aufgebaut ist. Sind Ungleichheiten in der Wicklung vorhanden, so treten sowohl bei Leerlauf als auch bei Belastung Verlagerungsspannungen auf, die den Schutz zum Ansprechen bringen können und daher durch entsprechende Einstellung die Empfindlichkeit und damit den Schutzwert beeinträchtigen. Auch die Ströme der Oberwellen insbesondere der dritten Harmonischen können den Schutz beeinflussen. Ihre Fernhaltung erfolgt durch eine Drosselkette, die nur für die Ströme mit Betriebsfrequenz durchlässig ist. Auch ungleiche Phasenbelastungen und zweipolige Kurzschlüsse können bei einer ungleichmäßigen Wicklung Verlagerungsspannungen hervorrufen. Ist der Schutz gegen Windungsschluß in den gesamten Maschinenschutz eingebaut worden, die Meßwandler und Steuerleitungen also gegenseitig benutzt, so hat ein Erdschluß in diesen Anlagen ebenfalls ein Ansprechen des Windungsschlußschutzes zur Folge, ohne daß ein Fehler in der Maschine vorliegt. Es ist hiergegen wieder ein besonderer Schutz notwendig.

Ist die Ständerwicklung mit zwei oder mehr parallelen Zweigen je Phase ausgeführt, wird die Schutzschaltung noch verwickelter, weil jetzt jeder Zweig erfaßt werden muß. Es kann hier nur ein Vergleichs-

schutz ähnlich der Ausführung und Arbeitsweise für parallele Leitungen angewendet werden unter Umständen in Verbindung mit Richtungsmeßwerken.

Aus diesen Erörterungen geht hervor, daß der Schutz gegen Windungsschluß nur mit großer Vorsicht brauchbar ist. Er wird daher auch nur selten benutzt. Die Gefahr von Fehlauflösungen ist besonders groß. Vor Inbetriebsetzung eines mit einem solchen Schutz ausgestatteten Stromerzeugers muß erst eine sehr sorgfältige Prüfung des Schutzes und Einstellung der Meßwerke durch Versuche mit Kurzschluß, Erdschluß, schiefer Belastung und im Leerlauf stattfinden, und auch dann noch ist die Unsicherheit seines Arbeitens für den Betrieb nicht behoben, ganz besonders wenn mehrere Maschinen parallel arbeiten.

Der Vollständigkeit wegen zeigt Abb. 328 den Stromerzeugerschutz für eine Maschine, wie er heute zusammengebaut und mit allen Überwachungseinrichtungen versehen zur Verwendung kommt.

Ein besonderer Läuferchutz wird kaum eingebaut. Er könnte sich erstrecken auf den Schutz gegen Erdschluß und Windungsschluß. Bei der geringen Spannung, mit der die Erregung arbeitet, ist mit Fehlern dieser Art äußerst selten zu rechnen, wenn nicht die Überbeanspruchung durch unzulässig hohe Abnahme von Erregerleistung (S. 77) die Isolation der Erregerwicklung beschädigt.

Nur bei Ljungström-Maschinen sind Schutzzeineinrichtungen dieser Art am Platz und werden auch zumeist gewählt. Besonders der Windungsschlußschutz ist zweckmäßig und läßt Fehler in einem der beiden Läufer leicht erkennen. Es ist zu beachten, daß die Erregung für beide Teilmaschinen von nur einer Erregermaschine erfolgt. Ist die Erregung nicht für beide Teile gleich, entstehen Ausgleichströme, weil die beiden Läuferwicklungen an den Schleifringen nicht mehr gleiche Spannung aufweisen. Zur Anzeige wird ein Kippmeßwerk benutzt, das bei einem Windungsschluß infolge der verschiedenen Spannungen zum Ansprechen kommt und eine Meldung veranlaßt.

m) Löschvorrichtungen gegen Maschinenbrand. Bei sehr großen Maschinen, die mit besonderer Belüftung gebaut werden müssen, und bei Turbostromerzeugern für große und größte Leistungen sind die bei Wicklungsdurchschlägen auftretenden Feuererscheinungen imstande, einen Brand innerhalb der Maschinen herbeizuführen, der, wie bereits gesagt, verheerende Zerstörungen zur Folge haben kann. Erfahrungen und Betriebsvorgänge der jüngsten Zeit zeigen, daß zur Verhütung solcher inneren Maschinenbrände Löscheinrichtungen notwendig sind.

Die Brandursache liegt zum größten Teil in den hohen Kurzschlußströmen, die auftreten können. Namentlich in Betrieben mit häufigen Kurzschlüssen besteht diese Gefahr besonders. Der starke Luftzug durch die Maschine entfacht den Lichtbogen bzw. einen örtlichen Brandherd, entzündet die Isolation und wächst sich in außerordentlich kurzer Zeit zu einem vollständigen Brand aus. Kurzschlüsse z. B. zwischen den Spulenköpfen führen zu Rundfeuer und zum Überschlagen der Flamme auf das Innere der Maschine.

Eine Löschvorrichtung in ihrer Gesamtheit muß folgende Bedingungen erfüllen:

- sofortiges Schließen der Belüftungsklappen,
- sicheres Arbeiten des Branderstickungsmittels,

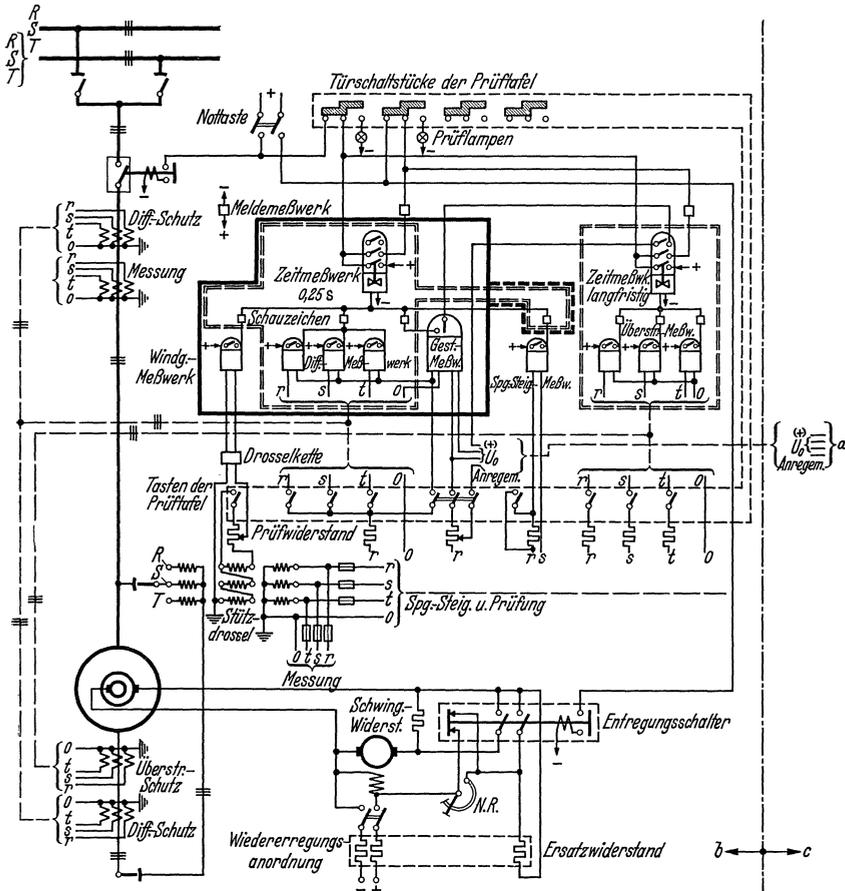


Abb. 328. Grundsätzliches Schaltbild eines vollständigen Schutzes für die Ständerwicklung von Drehstrommaschinen. Maschine ist unmittelbar an Sammelschiene angeschlossen.

a zur gemeinsamen Erdungswiderstandseinrichtung mit an die Sammelschiene angeschlossener Gestell-drossel bzw. zur gemeinsamen Erdschluß-Spannungswandlereinrichtung, b Geräte je Maschine, c Geräte für sämtliche parallelarbeitenden Maschinen gemeinsam.

keine schädliche Einwirkung des letzteren auf Isolation, Eisen, Kupfer und auf die Gesundheit der Bedienung.

Ist in der Maschine ein Brand entstanden, so ist zunächst erste Bedingung, daß die Maschine von den Sammelschienen abgeschaltet und entregt wird. Das erfolgt durch die besprochenen Schutzvorrichtungen gegen innere Störungen. Ferner ist sofort dafür zu sorgen, daß die Frischluftzuführung aufhört. Die Erfüllung dieser Bedingung ist mit prakti-

schen Schwierigkeiten verbunden, weil bei sehr großen Maschineneinheiten auch sehr große Luftklappen zu bewegen sind. Es ist daher bei der Ausgestaltung der Abschlußvorrichtungen von vornherein hierauf entsprechend Rücksicht zu nehmen (motorischer Antrieb). Drehbar in den Kanälen gelagerte Drosselklappen ermöglichen einen schnelleren Schluß. Daß die Abschlußvorrichtungen vollständig dicht schließen müssen, ist selbstverständlich.

Für die Löschung sind eine ganze Anzahl von Einrichtungen in Vorschlag gebracht worden, über deren Brauchbarkeit genügende Betriebserfahrungen nicht vorliegen. Auch gehen die Ansichten über die Zweckmäßigkeit der einen oder anderen Löscheinrichtung stark auseinander.

Ein in Deutschland bisher wohl ausschließlich angewendeter Brandschutz ist die Löschung durch einströmende Kohlensäure. Wenngleich naturgemäß dieses Gas an sich sehr geeignet ist, so bestehen aber doch eine Reihe von Nachteilen. Da das Gas verflüssigt in Stahlflaschen benutzt werden muß, ist dafür zu sorgen, daß beim schnellen Öffnen der Kohlensäureventile eine Vereisung der Austrittsdüsen nicht eintritt. Infolgedessen kann das Gas nur langsam einströmen. Da außerdem Kohlensäure schwerer als Luft ist, können die Einströmstellen nicht im unteren Teil des Maschinengehäuses liegen, um die Wirkung nicht zu beeinträchtigen. Ferner müssen stets genügend große Gas mengen angewendet werden, was wiederum Schwierigkeiten in der Beschaffung und in der dauernden Prüfung der Gasbehälter bringen kann. Besonders ist darauf hinzuweisen, daß Kohlensäure außerordentlich giftig ist. Schon eine sehr geringe Menge vom menschlichen Körper aufgenommen kann den Tod herbeiführen. Für die Isolation, das Eisen usw. ist das Gas ungefährlich.

Die Betätigung der Löschvorrichtung erfolgt entweder von den Meßwerken der verschiedenen Schutzvorrichtungen gegen innere Störungen oder von Hand auf Grund von Temperaturmeldegeräten. Es ist zu empfehlen, daß im Maschinenraum und an der Hauptschaltstelle Druckknöpfe für die Auslösung des Brandschutzes zugleich mit den entsprechenden Anzeigevorrichtungen so vorhanden sind, daß aller schnellste Betätigung gewährleistet ist, wenn keine Schutzvorrichtungen gegen innere Störungen vorhanden sind. Aber auch bei deren Vorhandensein muß einem Versagen der selbsttätigen Auslösung durch die Handbetätigung vorgebeugt werden.

Besonders wesentlich ist eine leichte Betriebsüberwachung der Gesamtanlage mit einer Prüfmöglichkeit ohne Störung des Betriebes. Dazu wird neuerdings Druckluft benutzt, damit der Kohlensäurevorrat nicht angegriffen zu werden braucht. Die Kohlensäurebehälter müssen mit Druckmessern ausgerüstet sein, um ihren Inhalt überwachen zu können. Die Rohranlagen sollen an die Druckluftanlage angeschlossen werden, um sie leicht reinigen und überprüfen zu können. Infolge der Giftgefahr muß die Bedienung gegen jede Gefährdung sicher geschützt sein.

Sind im Kraftwerk andere Räume vorhanden, die ölgefüllte Anlage-

teile enthalten, wie Umspanner- und Ölschalträume, so ist deren Anschluß an die Löscheinrichtung zu empfehlen.

Abb. 329 zeigt den Aufbauplan einer solchen Kohlensäure-Löschvorrichtung und Abb. 330 die Kennlinie für einen Löschvorgang.

Als zweites Gas ist Stickstoffgas in Vorschlag gebracht worden. Es ist bisher aus den Betrieben über eine Stickstoffflöschung keine Mitteilung bekannt und daher auf Erfahrungen auch nicht hinzuweisen.

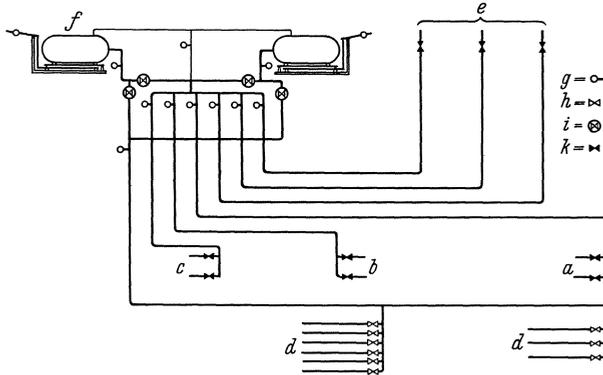


Abb. 329. Kohlensäurelöschvorrichtung für ein Kraftwerk.

a, b, c zu den Hauptmaschinen, *d* zu den Umspannern, *e* zu den Nebenanlagen, *f* CO₂-Behälter, *g* Fernsteuerventil, *h* Standventil, *i* Umschaltventil, *k* Schutzventil.

Stickstoff kann nicht flüssig, sondern nur gasförmig in Behältern gelagert werden, die selbst bei hohen Drücken sehr große Abmessungen erhalten müssen, um die erforderlichen Gasmengen sicher zur Verfügung zu haben. Schon dieser Umstand und dann die Fortleitung unter hohem Druck mit allen Steuereinrichtungen, Anschlüssen, Verteilern usw. macht eine Löscheinrichtung dieser Art für den praktischen Betrieb kaum anwendbar. Zudem muß eine besondere Stickstoffherzeugungsanlage vorhanden sein, während die Kohlensäure aus Kohlensäurewerken bezogen werden kann.

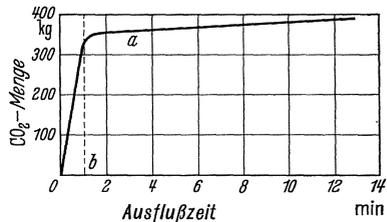


Abb. 330. CO₂-Löschvorgang.
a CO₂-Menge, *b* Schließen des Hauptventils, Beginn des Nachblasens.

Eine ältere Ausführung bei Turbostromerzeugern sieht die Löschung durch Dampf vor. Zu diesem Zweck sind im Inneren des Maschinengehäuses eine Anzahl von Düsen eingebaut, aus denen der Dampf einströmt. Bei den großen Räumen größerer Maschinen ist eine recht beträchtliche Dampfmenge erforderlich, um tatsächliche Erfolge zu erzielen. Es muß dann geprüft werden, ob diese Menge im Kraftwerk bei hochgespanntem Dampf unter entsprechender Abspannung sofort verfügbar steht, selbst wenn der Betriebsdampf des gestörten Maschinen-

satzes herangezogen wird. Die amerikanische Praxis will, soweit bisher bekannt geworden ist, befriedigende Ergebnisse erzielt haben.

Diese Form der Löschung verlangt eine besonders gute Ausführung der Dampfventile, die auf ihren vollständig dichten Abschluß ständig zu überwachen sind, damit im ungestörten Betrieb keine Dampfschwaden in die Wicklung gelangen. Dadurch kann der Isolationswert der Wicklung stark vermindert werden. Es müssen außerdem in jedem Fall besondere Entlüftungseinrichtungen und Sammler für das Kondenswasser vorgesehen werden. In deutschen Großkraftwerken ist diese Form bisher nicht benutzt worden.

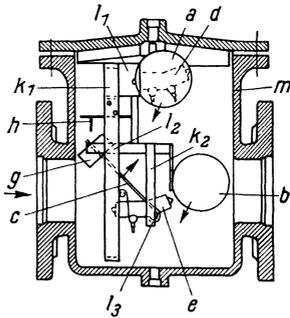


Abb. 331 a. Schnitt durch das Siemens-Buchholz-Meßwerk.

a Warnschwimmer, *b* Auslöseschwimmer, *c* Auslöseklappe, *d* Warnschaltstück, *e* Auslöseschaltstück, *g* Zusatzgewicht, *h* Winkelblech, *k*₁ Traggerüst, *k*₂ Hebelgestänge der Auslösevorrichtung, *l*₁ Drehpunkt des Warnschwimmers, *l*₂ Drehpunkt des Auslöseschwimmers, *l*₃ Drehpunkt der Auslöseklappe, *m* Meßwerkgehäuse. Der Pfeil vor dem Meßwerkgehäuse gibt die Ölströmungsrichtung an, die Pfeile im Meßwerkgehäuse dagegen die Bewegungsrichtung der einzelnen Ansprechglieder beim Übergang von der Ruhe- in die Ansprechlage.

n) Der Umspannerschutz. Auch für die Umspanner sind innere und äußere Störungsursachen wie bei den Stromerzeugern zu unterscheiden.

Ein besonderer Schutz gegen innere Störungen wird nur bei großen Umspannern und hohen Spannungen eingebaut. Die heutige bauliche Durchbildung aller Umspanner ist so gut, daß Störungen aus inneren Ursachen zu den Seltenheiten gehören. Der Schutz erstreckt sich wieder auf die Überwachung der Temperatur und auf innere Isolationsbeschädigungen.

Für die Temperaturüberwachung werden Temperaturzeiger in den Ölkessel eingebaut, die mit Meldeschaltstücken versehen sind. Überschreitet die Öltemperatur die zulässige Grenze, so wird eine Meldevorrichtung betätigt, die die Bedienung auf die Gefahr aufmerksam macht und zu entsprechenden Schaltungen oder Betriebsanweisungen veranlaßt.

Zur Meldung von Isolationsbeschädigungen wird der Buchholzschutz fast durchweg benutzt. Er hat sich vorzüglich bewährt. Seine Arbeitsweise beruht kurz darauf, daß jede Isolationsbeschädigung eine Gasblasenbildung im Öl des Umspanners zur Folge hat. Diese Gasblase steigt im Öl bis zu einer Stelle hoch, an der sie austreten kann. Diese Stelle wird durch den Buchholzschutz (Abb. 331 a/b) künstlich geschaffen. Aus der Färbung des Öles oder des Gases in einem Schauglase sind Rückschlüsse auf die Art des inneren Schadens möglich. Die Gasblase löst in diesem Meßgerät entweder nur eine Meldevorrichtung (Warnung) oder aber ein Schaltstück aus, das den Auslöser der zugehörigen Schalter zum Ansprechen bringt.

Die Ansichten des Betriebes über die Schaltung des Buchholzschutzes auf Meldung oder Auslösung sind geteilt. Bei unbesetzten Anlagen wird die Auslösung gewählt. Damit kann dann aber eine oft un-

nötige Stromunterbrechung für die Abnehmer eintreten. In besetzten Anlagen hat der Betrieb der Werke des Verfassers noch keinen Fall ergeben, bei welchem die Schaltung nur auf Warnung nicht ausreichte, um den kranken Umspanner abzuschalten, durch Umschaltungen Betriebsstörungen für die Stromverteilung zu vermeiden und trotzdem die Fehlerstelle nicht größer werden zu lassen. Auf das im Band I hierzu Gesagte ist aufmerksam zu machen.

Eine andere Form des Schutzes gegen die Ausbreitung innerer Störungen ist der Strom-Vergleichsschutz, wie er bereits als Maschinenschutz erläutert worden ist. Es gilt hinsichtlich der Arbeitsweise grundsätzlich das dort Gesagte ebenfalls.

Auf einen besonderen Umstand ist hinzuweisen, der den einfachen Vergleichsschutz nur mit Vorsicht anzuwenden gestattet und zwar hier besonders auf die verschiedene bauliche Ausführung der Stromwandler ober- und unterspannungsseitig bei niedriger und hoher Umspannung. Dadurch kann leicht das genaue Übersetzungsverhältnis bei allen primären Strombelastungen infolge des unterschiedlichen Sättigungsverlaufes jedes Wandler schon um ein geringes gestört werden, selbst bereits durch Abweichung der einzelnen Leerlaufströme. Fehlauflösungen sind wiederholt vorgekommen. Auf die betrieblichen Folgen wurde bereits hingewiesen. Aus diesem Grund wird der einfache Strom-Vergleichsschutz bei Umspannern nicht angewendet.

Um diesen Schwierigkeiten zu begegnen, wird nur der stabilisierte Vergleichsschutz benutzt. Das Meßwerk wird erst bei tatsächlichen Stromunterschieden infolge von Windungsschluß freigegeben und schaltet dann praktisch ohne jede Verzögerung die Schalter ober- und unterspannungsseitig aus.

Gegen Überbeanspruchungen aus äußeren Ursachen werden die Umspannerschalter mit Meßwerken für unabhängige Strom-Zeit-auslösung oder neuerdings auch mit Wärme-Meßwerken versehen. Es gilt hierfür das bei den Stromerzeugern Gesagte in gleicher Weise.

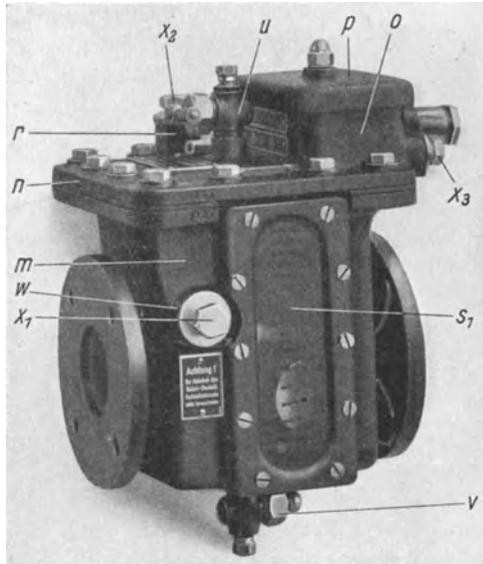


Abb. 331b. Gesamtansicht des Buchholz-Meßwerkes, Bauart SSW.

m Meßwerkgehäuse, *n* Meßwerkdeckel, *o* Klemmenkasten, *p* Klemmenkastendeckel, *r* mechanische Prüfeinrichtung, *s₁* Schauglas, *u* Entlüftungshahn mit Verschlußschraube, *w* Ölverlustumsteller, *x₁*, *x₂*, *x₃* Verschlußschrauben, *v* Öl- ablaßbahn mit Verschlußschraube.

Wird für den Umspanner ober- und unterspannungsseitig je ein Leistungsschalter gewählt, so ist die Schaltung zweckmäßig so vorzunehmen, daß beim Ansprechen oder Ausschalten des Schalters in der Richtung der Stromabgabe auch der Schalter auf der anderen Seite gleichzeitig fällt. Das Zuschalten dagegen muß für jeden Schalter ohne gegenseitige Abhängigkeit einzeln vorgenommen werden können.

Kleine Streckenumspanner werden auch mit Sicherungen versehen, wozu noch Leistungstrennschalter kommen. Hierzu ist Besonderes nicht zu bemerken.

o) Ein Schutz in den Sammelschienen des Kraftwerkes ist beim Parallelarbeiten mehrerer Stromerzeuger oft erforderlich, um auch hier eine Eingrenzung bei Kurzschlußstörungen zu erzielen.

Ein Kurzschluß in den Sammelschienen ist außerordentlich gefährlich. Es muß daher schon bei der Baudurchbildung dieses Anlageteiles, wie später bei der Behandlung der Schaltanlagen besonders besprochen wird, betrieblich größter und entscheidender Wert darauf gelegt werden, daß diese Störung nicht auftreten kann. Immerhin wird bei einer größeren Zahl parallel arbeitender Maschinen in die Sammelschienen eine Blocktrennung mit einem Schalter eingebaut, der mit Schnellauslösung arbeitet, um eine gewisse Eingrenzung zu erhalten.

Ist zur schnellen Leistungsverschiebung bei Doppelsammelschienen ein Kuppelschalter vorzusehen, so ist dieser ebenfalls mit Meßwerken für Schnellauslösung auszurüsten, damit beim fehlerhaften Parallelschalten sofortige Ausschaltung des Schalters eintritt.

16. Die Schutzvorrichtungen gegen Überspannungen.

a) Die Art der Überspannungen. Unter Überspannungen ganz allgemein versteht man Spannungserhöhungen zwischen zwei Leitern verschiedener Phase oder zwischen Leiter und Erde, welche die Betriebsspannung um einen solchen Betrag überschreiten, daß dadurch die Isolation der Maschinen, Umspanner, Schaltgeräte, Kabel, Isolatoren gefährdet wird. Ausgelöst werden sie als Schwingungen (Wanderwellen) durch Störung des elektrischen und magnetischen Gleichgewichtszustandes der Anlage. Sie können die Ursache oft ungeahnter Zerstörungen von Teilen einer Starkstromanlage werden. Infolge der eingehenden theoretischen und praktischen Untersuchungen und Betriebserfahrungen der letzten Jahre kann die Überspannungsgefahr durch den Einbau richtiger Schutzvorrichtungen an richtiger Stelle wirksam und mit großer Zuverlässigkeit beseitigt werden. Eine Ausnahme hiervon bilden nur die atmosphärischen Entladungen bei unmittelbaren Blitzschlägen, deren Wirkungen man auch heute noch nicht völlig sicher unschädlich zu machen in der Lage ist.

Die Überspannungserrscheinungen häufen sich mit der Höhe der Betriebsspannung und wachsender Ausdehnung der Freileitungsanlagen. Sie sind auf drei grundsätzliche Ursachen zurückzuführen und zwar auf:

- atmosphärische Vorgänge,
- Betriebsvorgänge innerhalb der Anlage,
- Resonanz.

Ferner unterscheidet man zwischen äußeren und inneren, ruhenden und schwingenden, vorübergehenden und dauernden Überspannungen.

Die Überspannungen infolge atmosphärischer Entladungen treten nur in Anlagen mit Freileitungen auf, während die beiden anderen Ursachen in allen Kraftübertragungsanlagen vorkommen.

Jede Überspannung sucht sich entweder zwischen den Leitern oder nach Erde an einer Stelle auszugleichen, an der die Isolation der Anlage am schwächsten ist, also über einen Isolator, zwischen zwei Adern eines Kabels u. dgl. Bei der ruhenden Überspannung ist nur die Höhe der Spannung maßgebend. Ein gleichzeitiger Durchschlag der Isolation an mehreren Stellen ist nur dann möglich, wenn mehrere gleich schwache Stellen vorhanden sind. In der Mehrzahl der Fälle wird indessen die erste Ableitung nach Erde schon so stark sein, daß die noch übrigbleibende Spannung (Restspannung) nicht imstande ist, eine zweite Isolationsstelle zu durchbrechen. Erfolgt der Ausgleich von Leiter zu Leiter, so ist das gleichbedeutend mit einem Kurzschluß an der Überschlagstelle. Der Vorgang des Isolationsdurchbruches gestaltet sich etwa folgendermaßen. An der gefährdeten Stelle tritt zuerst Glimm- oder Büschellicht auf, und die Entladungen gehen als sog. „dunkle Entladungen“ vor sich. Durch diese wird eine Ionisierung der umgebenden Luft bewirkt. Es folgen Glimm- oder Büschelentladungen, die schließlich einen völligen Durchbruch der Isolation in Form einer Funkenentladung herbeiführen.

Bei der schwingenden Überspannung ist nicht nur die Höhe der Spannung, sondern auch die Dauer und die ihr innewohnende Energie für ihre Gefährlichkeit von Bedeutung. Diese Überspannungen haben die Gestalt von „Wanderwellen“ (Sprungwellen), die über die Leitung verlaufen und ihrer Höhe nach durch die Wellenform mit mehr oder weniger steiler Stirn bestimmt werden. Die Dauer hängt von der Art der Erregung ab (Schaltvorgang, Erdschluß), die Energie neben der Höhe der Spannung von der Kapazität und der Selbstinduktion des Stromkreises.

Als Kenngrößen für die Wanderwelle gelten entsprechend den „Leitsätzen für Überspannungsschutzgeräte in Starkstromanlagen“ VDE 0675/I. 38 nach Abb. 332:

die Stirn des Spannungsstoßes = ansteigender Teil der Spannungswelle, der Rücken des Spannungsstoßes = abfallender Teil der Spannungswelle,

Stirnsteilheit = Spannungsanstieg in Kilovolt je Mikrosekunde bei halbem Scheitelwert,

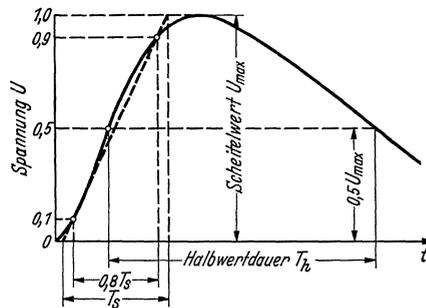


Abb. 332. Kenngrößen für eine Wanderwelle (VDE 0675/I. 38).

Stirndauer T_s = der mit 1,25 vervielfachten Zeitspanne, in der die Welle vom 0,1fachen auf den 0,9fachen Betrag ihres Scheitelwertes ansteigt,

Halbwertdauer T_h = Zeit, während der die Spannung die Hälfte des Scheitelwertes überschreitet.

Der zeitliche Verlauf des Spannungsstoßes wird gekennzeichnet durch den Scheitelwert U_{\max} , die Stirndauer T_s und die Halbwertdauer T_h . Stirndauer und Halbwertdauer werden in Mikrosekunden gemessen ($1 \mu s = 10^{-6} s$).

Die Stirndauer T_s einer natürlichen Wanderwelle beträgt etwa 1 bis $10 \mu s$ bei einer Steilheit bis zu $1000 \text{ kV}_{\max}/\mu s$ und mehr, die Halbwertdauer T_h etwa 5 bis $50 \mu s$. Beträgt die Dauer einer Wanderwelle $100 \mu s$, so ist ihre räumliche Ausbreitung etwa gleich einer Leitungslänge von rund 30 km.

Die Prüfung von Überspannungsableitern soll nach den Leitsätzen mit $T_s = 1 \mu s$ und $T_h = 25$ bis $50 \mu s$ vorgenommen werden. Das entspricht der genormten Stoßwelle und kommt den bei Gewittern am häufigsten auftretenden Verhältnissen am besten gleich.

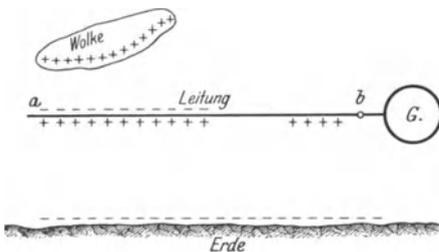


Abb. 333. Induktionswirkung einer elektrisch geladenen Wolke auf eine Freileitung.

entspricht der genormten Stoßwelle und kommt den bei Gewittern am häufigsten auftretenden Verhältnissen am besten gleich.

b) Die atmosphärischen Vorgänge. Als solche kommen in Betracht:

- elektrostatische Induktion,
- allmähliches Laden der Leiter durch die umgebende Luft,
- Ladung durch Schneiden von Niveauflächen,
- unmittelbare Blitzschläge,

Induktionswirkungen durch seitlich der Leiter niedergehende Blitze.

Alle diese Erscheinungen sind die Ursache zum Auftreten der äußeren Überspannungen und zwar teils ruhender, teils schwingender Natur.

Die elektrostatische Induktion. Aus der Lehre der Elektrostatik ist bekannt, daß ein mit Elektrizität geladener Kondensator auf einen anderen in seine Nähe gebrachten zweiten Kondensator derart induzierend wirkt, daß auf den dem ersten Kondensator benachbarten Teilen des zweiten die Ladung mit entgegengesetztem Vorzeichen und auf den entgegengesetzten Teilen solche mit gleichem Vorzeichen auftritt. Dieser Fall tritt ein, wenn eine elektrisch geladene Wolke über oder in der Nähe einer Freileitung steht (Abb. 333). Hat die Wolke positive Elektrizität (+), so wird in dem Teil der Leiter, welcher der Wolke am nächsten ist, negative Elektrizität induziert, während auf der anderen Seite des Leiters positive Elektrizität auftritt. Die positive Elektrizität sucht sich mit der negativen der Erde auszugleichen. Es herrscht also ein Potentialunterschied zwischen dieser und den Leitern. Die Höhe dieser Überspannung ist von dem Isolationswert der Anlage abhängig und kann unter Umständen einen recht beträchtlichen Wert erreichen. Sie

entsteht allmählich, da die Wolke wandert, und wird durch Ausstrahlung über alle spitzen Winkel, Kanten usw., oder über die Isolatoren abgeleitet. Letzteres ist unerwünscht und verlangt Erdung der Isolatorenträger bei Holzmasten. Daher sind für ihre künstliche Beseitigung besondere Geräte, wie Erdungswiderstände und Erdungsdrosselspulen erforderlich. Diese Überspannung ist ruhender Art und zwar eine Gleichspannung, die sich über die Betriebsspannung überlagert. Bei gewaltsamem Ausgleich an einer schwachen Isolationsstelle geht sie in eine schwingende Überspannung über.

Allmähliches Laden der Leiter durch Reibung der umgebenden Luft. Diese zweite Ladungserscheinung beruht darauf, daß an schwülen Tagen, wenn, wie man sagt, die Luft mit Elektrizität geschwängert ist, die elektrisch geladenen Luftteilchen (Staub- und Wasserteilchen) bei ihrem Vorbeistreichen an den Leitern ihre Ladung zum Teil an diese abgeben. Weiter kann eine elektrische Aufladung der Leiter dadurch hervorgerufen werden, daß feiner Sand, Schnee, Hagel, Eisnadeln, Sturm, Nebel beim Vorbeitreiben an den Leitern durch Reibung Elektrizität erzeugen (Reibungselektrizität). Namentlich in solchen Gegenden, wo Flugsand auftritt, ist die Ladung der Leiter oft beobachtet worden. Über die Höhe der dabei auftretenden Spannungen gegen Erde und die vorhandenen Elektrizitätsmengen können Zahlen nicht angegeben werden. Jedenfalls aber sind die Elektrizitätsmengen um so größer, je länger die Leitung ist und je größere Oberfläche die Leiter besitzen. Die Höhe der Spannung richtet sich wiederum nach dem Isolationszustand der Leitung und weist um so größere Werte auf, je vorzüglicher die Isolation ist.

Auch diese Überspannung ist ruhender Natur und ihrer Eigenart nach gleich der durch statische Induktion. Zu ihrer künstlichen Ableitung werden die gleichen Geräte benutzt.

Ladung durch Schneiden von Niveauflächen. Da die Erde als ein elektrisch geladener Körper angesehen wird, gehen von ihr Kraftlinien aus, die ihr Ende entweder auf Wolken mit entgegengesetztem Potential oder im Unendlichen haben. Die zu diesen Kraftlinien senkrechten Flächen, die alle Punkte gleichen Potentials miteinander einschließen, heißen Niveau- oder Äquipotentialflächen. Wird eine solche von einem Leiter geschnitten, so wird letzterer elektrisch geladen.

Für Leitungen, die durch ebenes oder annähernd flaches Gelände führen, kann diese Ladungsursache bei gutem Wetter unberücksichtigt bleiben. Sind dagegen Gewitterwolken in der Nähe, oder ist die Luft sonst stark mit Elektrizität geschwängert, so treten starke Verschiebungen in den Äquipotentialflächen auf, und die Leiter können dann oft recht beachtenswerte Ladungen erhalten. Durch Beobachtungen ist festgestellt worden, daß das Spannungsgefälle in der Ebene zwischen 50 bis 250 V auf einen Meter schwankt. Ganz besonders ist diese Ursache von Überspannungen dort von Bedeutung, wo die Leitungen über Anhöhen führen, weil hier ein engeres Zusammendrängen der Äquipotentialflächen stattfindet, so daß Ladespannungen bis zu 10 kV und mehr gegen Erde auftreten können.

Diese Überspannung ist ebenfalls ruhend und mit Erdungsdrosseln u. dgl. abführbar.

c) **Die Gewitterwirkungen**¹, die schwingende Überspannungen hervorrufen, sind in den letzten Jahren Gegenstand sehr eingehender Forschung gewesen. Die Ergebnisse haben beste Erfolge für die Störbeseitigung der Blitzeinschläge in die Freileitungen gebracht, so daß heute auch diese Gefahren wirksam bekämpft werden können.

Hinsichtlich der Art der Gewitter wird unterschieden zwischen:

Wärmegewittern, die sich an sehr heißen und feuchten Tagen über solchen Gebieten bilden, in denen die Temperatur mit zunehmender Höhe über dem Erdboden so stark absinkt, daß sich die aufsteigenden Luftmassen adiabatisch abkühlen können;

Gebirgsgewittern, bei denen die am Gebirgshang stark erwärmte Luft oder auch die gegen den Hang angetriebene feuchte Luft unter der Aufwindwirkung bis zur Kondensationsgrenze nach oben getragen wird;

Kaltluftgewittern, die entstehen, wenn auf warme, feuchte Luftmassen kalte polare Luft trifft. Auf der Vorderseite der Kaltluft wird eine kräftige Aufwärtsbewegung der warmen Luftmassen hervorgerufen, wodurch sich eine Gewitterwolke bildet;

Warmluftgewittern, die entstehen, wenn warme Luftmassen auf kalte stoßen. Es zeigen sich zuerst Cirrus-Wolken, dann Cirro-Stratus-Wolken und darauffolgend Nimbus- und Cumulus-Wolken. Die Stirn der warmen Luftmassen ist einige hundert Kilometer lang, so daß das eintretende Gewitter schon lange vorausgesagt werden kann.

Wenn für ein Gebiet die Art der hier vorherrschenden Gewitter bekannt ist, lassen sich unter Umständen gewisse Schlußfolgerungen für die Führung von Hochspannungsleitungen ziehen.

Aus dieser Zusammenstellung ist zu ersehen, daß manche Gegenden mit verhältnismäßig kurzen Zwischenräumen über einen größeren Teil des Jahres mit dem Auftreten von Gewittern rechnen müssen. In Ergänzung der Angaben in Band II ist es zweckdienlich, vor dem Beginn neuer Hochspannungsleitungen aus den Beobachtungen der Bevölkerung, der Landeswetterwarten und sonstigen Stellen wie Postverwaltungen, Brandversicherungsgesellschaften u. dgl. Unterlagen nach dieser Richtung zu sammeln, um die Gewitterhäufigkeit, Gewitternester, Zugrichtung der Gewitter festzustellen.

Dr.-Ing. Lehmann² hat durch umfangreiche Untersuchungen er-

¹ Grünwald, H.: Neuere amerikanische Untersuchungen über Gewittereinflüsse auf Kraftübertragungsanlagen. ETZ 1937 Heft 45 S. 1213 mit Literaturzusammenstellung. Müller-Hillebrand, Dr.-Ing.: Gewitterstörungen in Mittelspannungsnetzen nach statistischen Ermittlungen. ETZ 1934 Heft 6 S. 133. Zwanziger, W.: Nachweis der Ursache von Gewitterstörungen auf den 100-kV-Leitungen der V. E. Westfalen A. G. und Mittel zu ihrer Bekämpfung. ETZ 1935 Heft 17 S. 474. Matthias, A.: Modellversuche über Blitzeinschläge. ETZ 1937 Heft 32, 34, 36.

² Lehmann, G.: Über die Ursachen der Häufung von Blitzeinschlägen. Dokt.-Diss. 1932 und ETZ 1932 S. 980. Baumeister, W.: Der unmittelbare Blitzschlag bei Hochspannungs-Freileitungen und Erfahrungen mit Wünschelrutenuntersuchungen. ETZ 1939 Heft 30 S. 892. Fritsch, V.: Nachweis von Blitznestern durch Rutengänger. ETZ 1938 Heft 52 S. 1397.

mittelt, daß auch die Grundwasser- und geologischen Verhältnisse der Leitungsstrecke (Gebirge, Erzvorkommen, Wasseradern) für die Blitzgefährdung der Freileitungen insofern mitbestimmend sind, als Grundwasser und Erzadern den Blitz anziehen.

Bei vorhandenen Leitungen ist betrieblich eine bis ins einzelne gehende statistische Verfolgung aller Gewitterstörungen auf den Leitungen notwendig, um daraus Maßnahmen für ihre Eindämmung oder Beseitigung zu treffen¹.

Schlägt ein Blitz in einen Leitungsmast unmittelbar ein (Abb. 334), so kann der Blitzstrom über diesen Mast unschädlich nach Erde abgeleitet werden, wenn der Widerstand der Masterdung² so gering ist, daß die Spannung, die der Mastkopf bei dem auftretenden Blitzstrom annimmt, niedriger ist als die Stoßüberschlagsspannung der Isolatoren der Leiter. Beträgt der Blitzstrom z. B. 40 kA und der Widerstand der Masterdung 30 Ohm, so tritt eine Spannung von 1200 kV auf. Ist die Leitung als 100-kV-Leitung mit 7 Hängeisolatoren ausgerüstet, deren Stoßüberschlagsspannung zwischen 650 und 820 kV (Phasenspannung) beträgt, so wird die Kette nach dem Leiter zu überschlagen und kann so stark beschädigt werden, daß sie schnellstens ausgewechselt werden muß, um den sicheren Betriebszustand wiederherzustellen. Der Widerstand der Masterdung ist in diesem Fall zu groß gewesen. Es tritt unter der hohen Spannung, unter der der Mastkopf steht, ein rückwärtiger Überschlag ein. Hieraus geht hervor, daß dem Widerstand der Masterdung größte Bedeutung beizumessen ist³. Es gehört demnach zur Pflege der Leitungsstrecken aller Art, den Widerstand der Masterdung laufend zu überwachen und rechtzeitig für seine Verbesserung Sorge zu tragen. Für neu zu bauende Leitungen ist von vornherein auf beste Masterdung zu achten. Es ist erst in letzter Zeit gelungen, einigermaßen sichere Unterlagen über die Höhe der Blitzströme zu gewinnen; diesem Umstand ist es in erster Linie zuzuschreiben, daß der guten und sicheren Masterdung nun die ihr zukommende volle Bedeutung beigemessen wird.

Sehr wesentlich für die Gütebestimmung des Masterdungswiderstandes ist die Stärke des Blitzstromes⁴. Es sind durch Beobachtungen Werte bis etwa 200 kA Scheitelwert festgestellt worden. Für deutsche Verhältnisse wird im allgemeinen mit einer Blitzstromstärke von 30 bis



Abb. 334. Unmittelbarer Blitzschlag in einen Leitungsmast.

¹ Gewittermessungen an Hochspannungsleitungen in der Schweiz. ETZ 1936 Heft 36 S. 1029.

² Baatz, H.: Über den wirksamen Widerstand von Erdern bei Stoßbeanspruchungen. ETZ 1938 Heft 47 S. 1263.

³ Dworeck, O.: Verbesserung der Masterdungswiderstände von Hochspannungsleitungen. ETZ 1938 Heft 8 S. 185.

⁴ Zaduk, H.: Neuere Ergebnisse der Blitzstromstärkenmessungen an Hochspannungsleitungen. Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen. ETZ 1935 Heft 17 S. 475; auch Grünwald, H.: ETZ 1934 S. 505.

70 kA gerechnet und dementsprechend der Masterdungswiderstand mit Rücksicht auf die Isolation der Leitung bemessen.

Wird ein Teil der Leitung vom Blitz getroffen, so wird durch die Änderung des bisherigen elektrischen Zustandes eine Wanderwelle ausgelöst, die sich mit Lichtgeschwindigkeit vom Entstehungsort nach beiden Seiten über die Leiter ausbreitet. Es ist:

$$v_w = \frac{1}{\sqrt{L_i \cdot C_i}} \text{ km/s.} \quad (171)$$

L_i = Selbstinduktion des Leiters in H/km,

C_i = Kapazität des Leiters in F/km,

v_w = Geschwindigkeit der Wanderwelle in km/s.

Dann wird dem Leiter eine Spannung aufgedrückt, die sich aus dem Wellenwiderstand des Leiters und der Blitzstromstärke ergibt. Ist die Höhe der Wanderwellenspannung durch den Wellenwiderstand der Strombahn größer als die Stoßüberschlagsspannung der Isolation der Leiterstrecke¹ oder einer im Zuge liegenden Schaltanlage, so wird je nach den Verhältnissen z. B. der Leiter über die Isolatorreihe des benachbarten Mastes an Erde gelegt. Es entsteht der einphasige Erdschluß mit Lichtbogen. Ist die Anlage mit der später behandelten Erdschlußlöschung versehen, so bringt diese Gewitterwirkung zumeist für den Betrieb keine Störung. Entsteht aber auf der Leitung ein Phasenkurzschluß, so folgt dem Überschlag der Kurzschlußstrom der Kraftwerke. Dieser kann sehr umfangreiche Zerstörungen herbeiführen. Gleichbedeutend mit dem Leiterüberschlag ist die Durchbrechung der Isolation in einer angeschlossenen Schaltanlage.

Ist die Isolation einer Strecke nicht gleichmäßig hoch etwa durch verschiedene Isolatorbauformen nach Zahl und Stoßüberschlagsspannung, so ist die Höhe der Überspannungswelle entsprechend zu ermitteln. Bei Holzmastleitungen und nicht geerdeten Isolatorenträgern kann der Wert der Stoßspannung wesentlich höher liegen als an einem in einer solchen Leitung liegenden eisernen Gittermast, oder an einem Holzmast mit geerdeten Isolatorenträgern. Es entsteht dann an dieser Stelle ein rückwärtiger Überschlag. Der Blitzstrom kann den Holzmast auch vollständig zersplittern (Abb. 335) oder in Brand setzen, weil sein Widerstand ohne Erdung außerordentlich groß ist.

Es ist also nach der Stoßüberschlagsspannung der Freileitungsisolation die Spannung einer Gewitterwanderwelle festzustellen, und diese der Wahl oder der Beurteilung der Schaltanlagenisolation nach der dort vorhandenen Stoßüberschlagsspannung zugrunde zu legen.

Die Höhe der Stoßüberschlagsspannung der Isolation hängt von der Formgebung, dem Oberflächenzustand, der Luftbeschaffenheit und dem Polaritätsvorzeichen² — z. B. Leiter positiv, Stütze positiv oder Leiter

¹ Rebhan, J.: Die Sicherheit elektrischer Anlagen gegen Stoßspannungen. ETZ 1937 Heft 44 S. 1177.

² Müller, H.: Das Verhalten der Isolatoren gegen Überspannungen verschiedenen zeitlichen Ablaufes. Mitt. d. Hermsdorf-Schomburg-Isolatoren G. m. b. H. 1930 Heft 53/54 und 1931 Heft 57/58.

positiv, Stütze negativ — ab. Bei negativer Polarität ist die Stoßspannung größer. Da aber alle diese Einzelheiten fortgesetzt schwanken, ist es praktisch ohne Bedeutung, sie genauestens zu beachten. Es ist vielmehr ein Mittelwert für etwa anzustellende Berechnungen zugrunde zu legen. Überschläge aus Überspannungsursachen auf der Strecke wird man — vorerst jedenfalls — noch nicht vermeiden können, damit muß der Betrieb rechnen und daher nur alle vorbeugenden Maßnahmen treffen, die die Gefährdungen weiter einschränken. Dazu gehört das Erdseil ganz über der Strecke oder mindestens auf 800 bis 1000 m vor den Schaltanlagen verlegt, die Ausrüstung der Freileitungsisolations höherer Spannung etwa von 60 kV an mit Parallelfunkenstrecken, die fortgesetzte Überwachung der Erdübergangswiderstände, das Reinhalten stark der Verschmutzung ausgesetzter Isolatoren.

Da Überschläge mit stehendem Lichtbogen im Leitungsnetz heute noch nicht verhindert werden können, sind die aus diesen folgenden Erdschlüsse durch Erdschlußlöschspulen zu bekämpfen, die weiter unten behandelt sind.

Induktionswirkungen durch seitlich der Leitung niedergehende Blitze als mittelbare Gewittereinwirkungen (Abb. 336)¹ (elektrostatische Induktion, Influenz). Aus den bisherigen Untersuchungen über die Natur des Blitzes kann über die Form der Entladung heute Bestimmtes schon angegeben werden. Im allgemeinen erfolgen mehrere, kurz aufeinanderfolgende Entladungen von einer positiv zu einer negativ geladenen Wolke oder nach der negativ geladenen Erde. Da nun jeder Stromkreis sowohl Wirkwiderstand als auch Selbstinduktion und Kapazität besitzt, werden beim Niedergehen eines Blitzes in der Nähe der Leitung oder bei einem Blitzschlag zwischen zwei über den Leitungen befindlichen Wolken Veränderungen in dem bis dahin bestehenden elektrischen Zustand der Leiter hervorgerufen, die freie Schwingungen auslösen. Auf den Verlauf und die Wirkung dieser Schwingungen wird weiter unten näher eingegangen werden. Sie haben jedenfalls auch starke Überspannungen im Gefolge.

Da Blitze ferner oftmals sehr weitreichende Verästelungen aufweisen, die in einem Umkreis bis 100 m und mehr um den Hauptstrahl beobachtet worden sind, tritt auch eine Induzierung durch solche Seitenentladungen ein. Schließlich ist noch auf die dynamische Wirkung



Abb. 335. Durch unmittelbaren Blitzschlag zerstörter Holzmast.

¹ Binder, L. Prof. Dr.-Ing.: Das Verhalten von Erdungsanordnungen bei Blitzschlägen. Sondertagung über Blitzschutzfragen 1933. Herausgegeben vom Verband Sächsischer Elektrizitätswerke e. V. Dresden.

hinzuweisen, da mit dem Blitz als einer elektrischen Strömungserscheinung das Auftreten von Kraftlinien verbunden ist, die je nach der Richtung der Entladung zu den Leitern größere oder kleinere EMKe in letzteren hervorrufen.

Auch diese Überspannungen sind schwingender Natur. Die Höhe dieser Blitzüberspannungen ist im allgemeinen nur für Nieder- und



Abb. 336. Hauptblitzstahl mit weit verzweigten Verästelungen.

Mittelspannungsnetze bis etwa 30 kV Betriebsspannung gefährlich. Darüber hinaus reicht die Isolation der Anlage zumeist aus, um Überschläge zu vermeiden.

Norinder¹ hat neueste praktische Messungen über die mittelbaren Blitzüberspannungen durchgeführt und dabei festgestellt, daß diese Höchstescheitelwerte von der Größenordnung 400 kV für eine Leitung ohne Rückwurf an einem offenen Ende und 600 bis 800 kV am offenen

¹ Norinder, H.: Indirekte Blitzüberspannungen auf Kraftleitungen. ETZ 1938 Heft 5 S. 105.

Leitungsende erreichen können. Über die Dauer liegen indessen noch keine Auswertungsergebnisse vor. Bei unmittelbaren Blitzentladungen kann die Höhe der einziehenden Überspannungswelle bis zu 5000 kV betragen.

Blitzschäden kommen auch bei Erdkabeln vor und zwar dort, wo die Kabel in elektrisch schlecht leitendem Boden liegen,

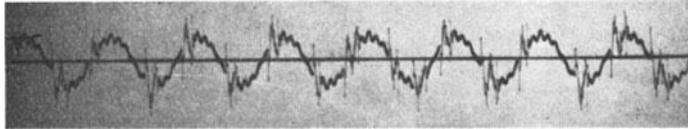


Abb. 337. Überspannungen.

also in Bodenschichten, die trocken und leicht wasserdurchlässig sind. Nach Ansicht von G. Lehmann¹ tastet ein niedergehender Blitz dicht über dem Erdboden die Erdkruste nach geeigneten gut leitenden Stellen ab, um über diese die Blitzenergie nach Erde abzuleiten. Da die vorgenannten Bodenbeschaffenheiten elektrisch schlecht leitend sind, bilden die Übergangsstellen geringeren Widerstandes neben feuchten Stellen und grundwasserführenden Spalten die Erdkabel mit Eisenbewährung, Bleimantel und schließlich den Leitern. Nach Zerstörung der Isolation fließt die Blitzenergie über das betroffene Kabel an einer feuchten Erdstelle ab. Kabel in gut leitendem also feuchtem Erdreich werden vom Blitz nicht getroffen. Es ist daher auch für die Auswahl der Kabelstrecken auf diese Gefährdungsmöglichkeiten zu achten.

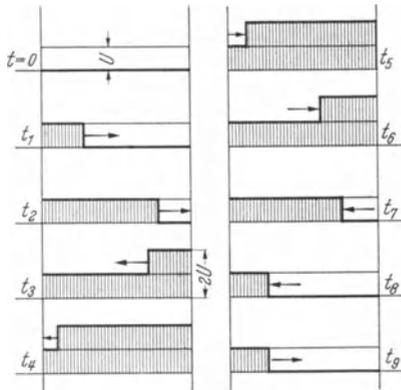


Abb. 338. Spannungsschwingungen (Wanderwellenverlauf) beim Einschalten einer unbelasteten Wechselstromleitung.

d) **Innere Überspannungen** (Abb. 337) entstehen, wenn Hochspannungsmotoren, Umspanner und Kabel unter voller Spannung eingeschaltet werden, bei plötzlichen Kurz- und Erdschlüssen und deren Unterbrechung, beim plötzlichen Unterbrechen belasteter Stromkreise durch Ansprechen von Selbstschaltern oder Sicherungen, kurz wenn eine Anlage mit Wirkwiderstand, Selbstinduktion und Kapazität von einem herrschenden in einen neuen Betriebszustand übergeführt wird. Der Übergang von dem einen in den anderen Betriebszustand geht dann elektrisch nicht unvermittelt vor sich, sondern es bilden sich freie Schwingungen aus. In Abb. 338 ist dieses für den Fall, daß eine strom- und spannungslose, unbelastete

¹ Lehmann, G.: Gewitterstörungen an Erdkabeln. VDE-Fachberichte Bd. 9 (1937) S. 46.

Leitung plötzlich an eine Stromquelle mit Wechselfpannung U gelegt wird, hinsichtlich des Verlaufes der Spannung für die ersten Augenblicke gezeichnet. Eine Sprungwelle von der Höhe der Spannung U und von steiler Front dringt in den Leiter ein, eilt mit Lichtgeschwindigkeit nach dem Ende und wird dort durch Rückwurf auf den doppelten Betrag erhöht ($2U$). In dieser Höhe kehrt sie zum Anfang zurück und wogt nun hin und her, bis sie durch die dämpfende Wirkung des Leiters allmählich auf den Wert U abklingt. Befindet sich am Ende des Leiters die Hochspannungswicklung eines unbelasteten Umspanners oder ein Hochspannungsmotor, so dringt diese Welle in die Wicklung ein, denn letztere kann, da sie sowohl Selbstinduktion und Wirkwiderstand als auch Kapazität besitzt, als Fortsetzung eines Leiters oder eines Kabels angesehen werden. Da die Wellenhöhe gleich der Betriebsspannung ist, tritt eine Gefährdung der Wicklungsisolations gegen Erde nicht ein. Wohl aber wird die Lagenspannung benachbarter Spulen wesentlich erhöht, weil der steile Spannungssprung an der Wellenfront fortlaufend alle Teile der Wicklung trifft, und infolgedessen an allen Stellen der Spule volle Phasenspannung zwischen zwei benachbarten Windungen herrscht. Hierzu kommen nun noch die Wirkungen der Induktion und Kapazität der Wicklungen, die einen Schwingungskreis für sich bilden und zu besonderen Schwingungen angestoßen werden.

Die Dauer der Beanspruchung ist indessen so kurz und die Leistung, die der Ladewelle folgen kann, so gering, daß der Isolationsbaustoff zwischen nebeneinander liegenden Windungen nicht sofort überanstrengt wird, wie etwa bei einem annähernd ebenso großen dauernden Spannungsunterschied. An schwachen Stellen der Isolation werden daher zunächst nur punktförmige Durchlöcherungen der Isolationsschichten eintreten (Punktierungen), die im ständigen Betriebszustand lange unbemerkt bleiben oder nur zwischen einzelnen Windungen einer Spule zum Kurzschluß führen können (Kurzschlußwindungen). Bei weiterem häufigen Ein- und Ausschalten also bei zahlreichen Wiederholungen der Sprungwellenbeanspruchung kann dann schließlich ein völliger Isolationsdurchbruch und damit eine schwere Beschädigung des Umspanners, Kabels usw. die Folge sein.

Beim Umspanner oder Motor bewirken die Wirbelströme eine fast plötzliche Dämpfung der Überspannungswelle, die Steilheit und die Höhe der fortschreitenden Wellenfront nimmt ab, und in den folgenden Windungen ist daher die Beanspruchung der Isolation geringer. Aus diesem Grund werden die den Anschlußklemmen zunächstliegenden Hochspannungswindungen der Umspanner, Stromerzeuger und Motoren mit verstärkter Isolation oder mit besonderen Kapazitätseinrichtungen (Schutzkondensatoren) versehen, damit sie der bei Schaltvorgängen auftretenden Sprungwellenbeanspruchung standhalten können¹.

¹ Zaduk, H.: Kathodenstrahl-oszillographische Untersuchungen über das Eindringen von Wanderwellen in Wicklungen. ETZ 1937 Heft 12 S. 320. Neuhaus, H., und R. Strigel: Der Verlauf von Wanderwellen in elektrischen Maschinen und deren Anschluß von Freileitungen. Arch. Elektrotechn. Bd. 29 (1935) Heft 10.

Unter Umständen besonders gefährdet sind auch die Nullpunktssenden der Wicklungen, weil an diesen der Rückwurf der Sprungwelle und somit unter Umständen eine wesentlich höhere Spannung entsteht.

Ähnliche Erscheinungen treten auf, wenn der augenblickliche Zustand des Netzes durch andere Ursachen verändert wird z. B. durch plötzliche Spannungsschwankungen, atmosphärische Entladungen, Kurzschlüsse, Erdschlüsse (Funkenentladungen vom Leiter nach Erde über ein beschädigtes Kabel, einen Durchführungsisolator, einen zersprungenen Isolator auf der Strecke, Berührung mit Baumzweigen u. dgl.). Bei einem Kurzschluß entsteht je Phase eine Überspannung in der Höhe:

$$U_{ii} = \pm I_K \sqrt{\frac{L_i}{C_i}} \text{ kV}, \quad (172)$$

und zwar durch Umwandlung der vorhandenen magnetischen Energie $\frac{1}{2} L_i \cdot I^2$ in elektrische Energie $\frac{1}{2} C_i \cdot U^2$. Diese Überspannungen erhalten eine um so gefährlichere Höhe, je plötzlicher der Stromkreis unterbrochen wird. Da bereits im 14. Kap. über die Arbeitsweise der Sicherungen und Selbstschalter in Gleich- und Wechselstromanlagen gesprochen worden ist, erübrigt es sich, hier noch weiter darauf einzugehen. Alle Richtungsänderungen im Zuge der Leitung, alle Durchführungsisolatoren, die Wicklungen der Stromwandler, Auslösespulen unmittelbar eingebauter Meßwerke, schließlich diejenigen der Stromerzeuger, Umspanner usw. geben also Staustellen, an denen die Wanderwelle teilweise oder ganz zurückgeworfen und dabei etwa auf den doppelten Betrag ihrer Spannung ähnlich Abb. 338 gebracht wird.

Tritt infolge der Stromkreisbeschaffenheit mehrfacher Rückwurf ein, so kann die Höhe der Überspannung weit über den doppelten Wert der Betriebsspannung ansteigen, was naturgemäß mit einer ganz besonderen Gefährdung der Anlageteile verbunden ist. Namentlich wenn Einzelteile einer Anlage stark voneinander abweichende Kapazitätswerte besitzen wie beim Übergang von Kabel auf Freileitung oder umgekehrt, kommt mehrfacher Rückwurf vor.

Die ausgelösten Schwingungen hängen in ihrem Scheitelwert von der Höhe der Betriebsspannung ab, während die Frequenz derselben durch die Kapazität und Selbstinduktion des ganzen Stromkreises bestimmt wird. Von ganz besonderer Bedeutung ist dabei der Eintritt der Resonanz der Frequenz der freien Schwingungen mit der Betriebsfrequenz, die weitgehendst verhindert werden muß.

e) Die Überspannungsschutzgeräte haben die Aufgabe, einmal an bestimmten Stellen der Anlage schwächer isolierte Punkte zu schaffen, an denen die Höhe der Spannung also die Steilheit der Wander- oder Sprungwelle durch Verbindung nach Erde abgesenkt wird, so daß die einzelnen Teile der Anlage selbst nicht mehr gefährdet werden, zweitens die elektrische Energieform der Überspannungen in Wärme umzuwandeln. Demnach müssen sie einer Reihe von Anforderungen genügen, damit die beabsichtigte Wirkung zuverlässig eintritt und zwar sind das:

jederzeitige Betriebsbereitschaft auch nach mehrmaligem kurz auf-

einanderfolgenden Ansprechen, ohne daß Instandsetzung oder Auswechslung von Teilen erforderlich ist,

richtig bemessene Empfindlichkeit je nach der Art und Beschaffenheit der zu schützenden Isolation,

schnellste Beseitigung der Überspannungen,

möglichst geringe Beeinflussung der Anlage selbst beim Ansprechen,

Verhütung von Überspannungsbildungen durch das Gerät selbst.

Der VDE hat für diese Geräte die „Leitsätze für Überspannungsschutzgeräte in Starkstromanlagen“ VDE 0675/1938 aufgestellt.

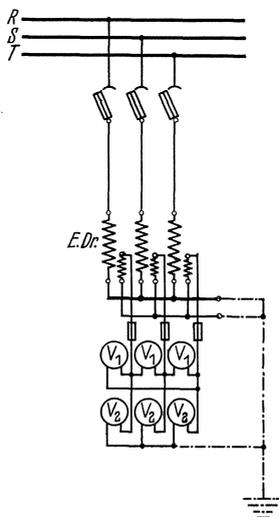


Abb. 339. Erdungsdrosselspule an den Sammelschienen mit Spannungsmessern für Netzspannungs- und Erdschlußanzeige.

Die Überspannungsschutzgeräte haben in den letzten Jahren eine völlig neue Durchbildung erfahren. Der gesamte Aufbau eines Überspannungsschutzes ist wesentlich und glücklich für den Betrieb vereinfacht worden und hat bessere betriebliche Ergebnisse gebracht als vordem. Die Leitsätze geben klare Bestimmungen über die Begriffe zur Beurteilung eines Schutzgerätes und Prüfvorschriften, so daß die Hersteller ihre Angaben nach diesen Leitsätzen machen müssen, und die Beurteilung oder die Auswahl für den Betrieb sehr vereinfacht ist.

Die Schutzvorrichtungen gegen äußere ruhende Überspannungen. Die bekanntesten und am häufigsten benutzten Schutzvorrichtungen dieser Art sind Erdungswiderstände und Erdungsdrosselspulen. Sie sollen die statischen Ladungen nach Erde ableiten also einen dauernden Stromweg nach Erde herstellen, und kommen demnach nur für Freileitungen in Frage. Diese Form der Ableitung bedingt von selbst, daß auch ein Teil des Maschinenstromes ständig

nach Erde abfließt. Es muß dieser Strombetrag daher in engsten Grenzen gehalten werden, damit der Verlust nicht unwirtschaftlich groß wird. Die Geräte werden infolgedessen derart gebaut, daß sie nur etwa 0,1 bis 0,5 A im Höchstfall durchlassen; sie müssen also einen sehr hohen Wirk- oder Blindwiderstand besitzen.

Der Erdungswiderstand besteht aus Widerstandsdraht auf Porzellan gewickelt (Emailwiderstand), Karborundum oder einem ähnlichen Baustoff geringer Leitfähigkeit. Er wird für Spannungen bis 6 kV benutzt und ist induktionsfreier Art. Dieser Schutz ist nur in Anlagen mit geringen Leistungen zu verwenden, zumal er einen verhältnismäßig hohen Stromverlust aufweist.

Die Erdungsdrosselspule ähnelt einem Umspanner. Sie besteht aus einer Drahtwicklung mit Eisenkern, die in einem Ölkessel liegt. Gegen gefährliche Ölerhitzung bei schadhafter Wicklung empfiehlt sich der Einbau von Temperaturzeigern mit Schaltstück zur Betätigung von Meldevorrichtungen, oder von abschaltbaren Sicherungen. In letzterem

Fall können die sonst zur Abtrennung notwendigen Trennschalter fortfallen.

Die Erdungsdrosselspulen setzen bei Wechselstrom dem Betriebsstrom einen sehr hohen induktiven Blindwiderstand entgegen, während der Gleichstrom der statischen Ladungen auf den Freileitungen ohne beachtenswerte Spannungsaufstauung durchfließen kann. Ein Nachteil dieses Schutzgerätes besteht gegenüber dem Erdungswiderstandsgerät darin, daß er die Ableitung schwingender Entladungen nicht zuläßt, weil der Scheinwiderstand mit der Frequenz zunimmt. Die Erdungsdrosselspule kann daher durch Überspannungen letzterer Art gefährdet werden.

Versieht man die Drosselspule noch mit einer zweiten Wicklung, so kann an diese ein Spannungsmesser in Verbindung mit Meldeeinrichtungen angeschlossen und auf diese Weise Erdschluß angezeigt werden.

Als besonderer Vorteil der Erdungsdrosselspulen gegenüber den induktionsfreien Widerständen ist zu nennen, daß sie einen geringeren Wattverbrauch aufweisen. Zu benutzen sind sie bei Spannungen über 6 kV.

Sowohl die Erdungswiderstände, als auch die Erdungsdrosselspulen werden entweder an die Sammelschienen (Abb. 339) oder an den Nullpunkt der Maschinen und Umspanner angeschlossen (Abb. 340). Sie bedingen für ihre Anwendung allgemein, daß die Anlage sonst nicht betriebsmäßig gerdet ist.

Sind im Netz Erdschlußlöschspulen im Nullpunkt der Umspanner oder Maschinen vorhanden, so sind diese besonderen Erdungswiderstände oder Drosseln nicht mehr erforderlich.

Die unmittelbare Erdung des Nullpunktes von Maschinen und Umspannern ist ebenfalls als Überspannungsschutz anzusehen, worauf bereits hingewiesen wurde, und zwar für alle Ladungen, welche eine Spannung gegen Erde besitzen. Insbesondere kann sie die durch Erdschluß ausgelösten sehr unangenehmen Überspannungen zum Teil dadurch ungefährlich machen, daß sie den Erdschluß in einen Kurzschluß überführt und durch Ansprechen des Maschinenschutzes den Stromerzeuger abschaltet, oder bei entsprechender Schaltung den Schalter in der gestörten Leitung zum Ansprechen bringt. Nicht dagegen schützt die Nullpunktserdung gegen die beim Unterbrechen eines Kurzschlusses, bei Schaltvorgängen u. dgl. auftretenden Überspannungen, kurz gegen solche, die keine Spannung gegen Erde haben und die schwingender Natur sind, da der hohe induktive Blindwiderstand der Wicklungen entgegensteht. Ferner ist sie beim Parallelbetrieb mehrerer Maschinen nicht ohne weiteres anwendbar, da infolge der Ungleich-

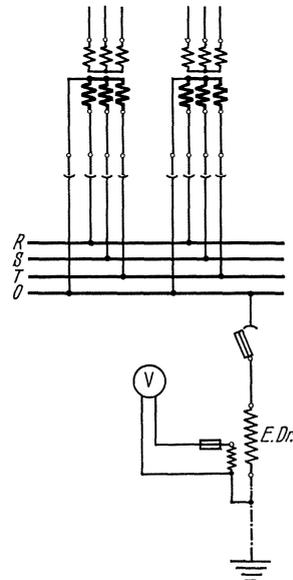


Abb. 340. Erdungsdrosselspule an Umspanner-Nullpunkten.

heit der Spannungen gegen Erde hervorgerufen durch ungleiche Teilkapazitäten der Leitungsanlagen starke Ausgleichströme höherer Frequenz auftreten, die die Wicklungen der einzelnen Phasen unzulässig belasten können. Das gilt sowohl für Stromerzeuger als auch für Umspanner. Das Erden über ausreichend bemessene Wirkwiderstände bringt zwar Besserung, beeinträchtigt den Schutzwert aber wieder durch die Begrenzung der Spannung zwischen den Leitern und Erde.

Als weiterer Nachteil ist die Störung aller Fernmeldeanlagen zu erwähnen, sofern diese mit Erde arbeiten. In deutschen Kraftübertragungen ist daher die betriebsmäßige Nullpunktserdung bisher nicht zur Abwendung gekommen.

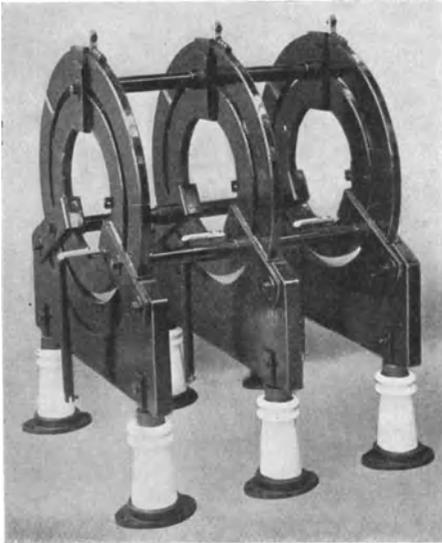


Abb. 341. Dreipolige Überspannungs-Schutzdrosselspule (veraltete Ausführung).

zeitig auftretende Überspannungen genügend gesichert. Bei Überspannungen von längerer Dauer dagegen, wie sie besonders bei Erdschlüssen auftreten, ist trotz dieses Sicherheitsgrades in der Isolation doch mit gefährlichen Überbeanspruchungen letzterer und mit Durchbrüchen derselben zu rechnen, weil die hohe Frequenz der Überspannungen allmählich zerstörend wirkt. Bei allen Maschinen und Umspannern lassen sich die aus vielen nebeneinander liegenden Windungen bestehenden Spulen praktisch nicht derart stark isolieren, daß Windung gegen Windung die doppelte Betriebsspannung aushält. Das würde zu unmöglichen, jedenfalls wirtschaftlich nicht brauchbaren Bauformen führen. Die zum Schutz dieser Anlageteile bisher verwendeten Schutzgeräte insbesondere die Drosselspulen nach Art der Abb. 341 sind heute vollständig verlassen worden.

Für die durch Schaltvorgänge entstehenden Sprungwellen genügt die heutige Isolierung der Anlageteile, wenn sie nach der VDE-Gleichung

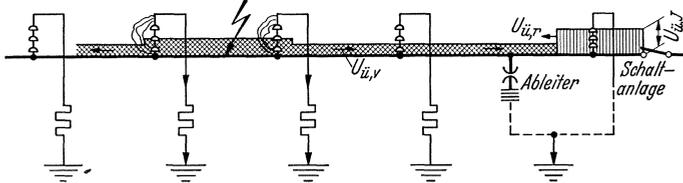
Die Schutzvorrichtungen gegen innere und äußere schwingende Überspannungen. Da ein großer Teil der schwingenden Überspannungen eine Spannungshöhe gleich der doppelten Betriebsspannung aufweist, würde es im allgemeinen genügen, die Isolation aller Anlageteile der doppelten Betriebsspannung entsprechend vorzunehmen. Das geschieht bereits, denn nach den Vorschriften des VDE sind alle Hochspannungsgeräte und Leitungsanlagen über bestimmte Zeiten mit mehr als der doppelten Betriebsspannung bei der Betriebsfrequenz zu prüfen. Sie sind daher für kurz-

($2,2 \cdot U + 20$) kV gewählt ist, zumeist vollständig. Außerdem werden die Eingangs- und Nullpunktswindungen der Stromerzeuger, sowie die Umspannerwicklungen, wie bereits erwähnt, durch einen besonderen Sprungwellenschutz geschützt¹.

Es werden daher besondere Schutzgeräte als Sprungwellenschutz nicht eingebaut, zumal die Schutzgeräte gegen Überspannungen aus Gewittereinwirkungen gleichzeitig den Schutz gegen Sprungwellen übernehmen.

Am gefährlichsten sind die Gewitterüberspannungen, denen daher heute bei der Ausdehnung und Vermaschung der Netze die größte Beachtung zugewendet werden muß.

Die durch die Gewittereinwirkungen ausgelöste Überspannungswelle läuft, wie schon kurz gesagt, von ihrer Entstehungsstelle in Form einer



342. Wanderwellenverlauf auf einer Leitung mit offenem Ende.

Wanderwelle (Sprungwelle) mit Lichtgeschwindigkeit nach beiden Seiten über die Leiter bis zu einem offenen Leitungspunkt (Abb. 342). An dieser Stelle wird die vorwärtslaufende Spannungswelle zurückgeworfen und dabei auf den doppelten Spannungsbetrag gebracht.

Es ist die Höhe der Überspannung je Leiter für die Bemessung der Isolation nach Abb. 342:

$$U_{\ddot{u},J} = U_{\ddot{u},v} + U_{\ddot{u},r} = 2 U_{\ddot{u},v} \text{ kV}, \quad (173)$$

$U_{\ddot{u},v}$ = vorwärtslaufende Teilspannung in kV,

$U_{\ddot{u},r}$ = rückwärtslaufende Teilspannung in kV,

und für die Teilwellen:

$$U_{\ddot{u},v} = Z \cdot i_v \text{ kV}, \quad U_{\ddot{u},r} = -Z \cdot i_r \text{ kV}, \quad (174)$$

worin:

Z den Wellenwiderstand des Leiters in Ohm für die durchlaufene Strecke,

i_v den vorwärtslaufenden Teilstrom in kA,

i_r den rückwärtslaufenden Teilstrom in kA

bezeichnet.

Der Wellenwiderstand ist:

$$Z = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}} \text{ Ohm/Phase}. \quad (175)$$

¹ Stadahl, K.: Schwingungsfreie und oberwellenfremde Umspanner. AEG-Mitt. 1937 Heft 3.

Es ist mit praktisch hinreichender Genauigkeit für die meisten Fälle für Freileitungen $Z = 375$ bis 500 Ohm bei Drehstromleitungen und 750 Ohm bei Einphasenleitungen, und für Kabel mit Papierisolation $37,5$ bis 50 bzw. 75 Ohm anzunehmen.

Leitungs- und Isolationswiderstand bewirken, daß die Strom- und Spannungswellen allmählich abgedämpft werden. Die elektromagnetische Energie der Welle wird durch Umwandlung in Wärme ebenfalls durch die Leitungswiderstände verzehrt. Die Höhe der Überspannung $U_{\dot{u},J}$ bringt die Gefährdung der Schaltanlage, auf die die Wanderwelle aufläuft und zurückgeworfen wird. Die Höhe der Überspannung für verschiedene Fälle ergibt sich aus dem Wanderwellenverlauf, für dessen

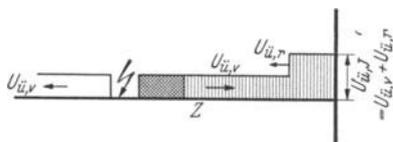


Abb. 343. Wanderwellenverlauf auf einer Einfachleitung mit Kopfanlage.

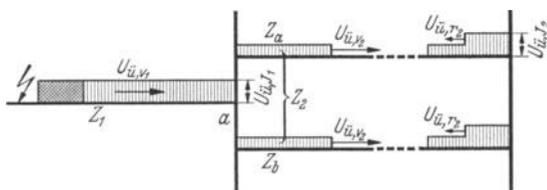


Abb. 344. Wanderwellenverlauf auf einer Einfachleitung mit Durchgangsanlage und abgehenden Leitungen.

rechnerische Beurteilung die Brechungs- und Rückwurfgesetze für elektrische Wanderwellen gelten.

Für eine Einfachleitung, die in einer Kopfanlage mit offenem Schalter endet, ist nach Abb. 343 für die Schaltanlage und die Isolation des Leiters:

$$U_{\dot{u},J} = U_{\dot{u},v} + U_{\dot{u},r} = 2 \cdot U_{\dot{u},v} \text{ kV}, \quad (176)$$

da:
$$U_{\dot{u},v} = -U_{\dot{u},r},$$

und der Strom:

$$\frac{U_{\dot{u},v}}{Z} - \frac{U_{\dot{u},r}}{Z} = \frac{2U_{\dot{u},v}}{Z} = \frac{U_{\dot{u},J}}{Z} \text{ kA}. \quad (177)$$

Läuft die Wanderwelle auf eine Durchgangsanlage nach Abb. 344 mit abgehenden Leitungen auf, so tritt am Knotenpunkt α , da die Wanderwelle nunmehr in den abgehenden Leitern nach dem Gesetz paralleler Widerstände zum Teil weiterläuft, eine Spannungserhöhung von:

$$U_{\dot{u},v_2} = U_{\dot{u},v_1} + U_{\dot{u},r_1} \text{ kV} \quad (178)$$

ein, und für den Strom gilt:

$$\frac{U_{\dot{u},v_1}}{Z_1} - \frac{U_{\dot{u},r_1}}{Z_1} = \frac{U_{\dot{u},v_2}}{Z_2} \text{ kA}, \quad (179)$$

worin Z_2 den Wellenwiderstand der abgehenden Leitungen bezeichnet. Durch Umrechnung ergibt sich:

$$2 \cdot U_{\dot{u},v_1} = U_{\dot{u},v_2} \cdot \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right) \text{ kV} \quad (180)$$

und somit:

$$U_{\ddot{u},v_2} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{\ddot{u},v_1} = \frac{2}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} \cdot U_{\ddot{u},v_1} \text{ kV}, \quad (181)$$

$$U_{\ddot{u},r_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{\ddot{u},v_1} = \frac{1 - \frac{Z_1}{Z_2}}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} \cdot U_{\ddot{u},v_1} \text{ kV}, \quad (182)$$

$$i_{v_2} = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot i_{v_1} \text{ kA}, \quad i_{r_1} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot i_{v_1} \text{ kA}. \quad (183)$$

Für den Fall (Abb. 344) bei 2 abgehenden Freileitungen je mit annähernd dem gleichen Wellenwiderstand $Z_a = Z_b = Z_1$ wie die ankommende Freileitung ergibt sich, da:

$$\begin{aligned} Z_2 &= \frac{1}{2} Z_1 \text{ Ohm}, \\ U_{\ddot{u},v_2} &= \frac{2 \cdot \frac{1}{2}}{1 + \frac{1}{2}} \cdot U_{\ddot{u},v_1} = \frac{2}{3} \cdot U_{\ddot{u},v_1} \text{ kV}, \\ U_{\ddot{u},r_1} &= -\frac{1}{3} \cdot U_{\ddot{u},v_1} \text{ kV}; \\ i_{v_2} &= 1,333 \cdot i_{v_1} \text{ kA}, \\ i_{r_1} &= \frac{1}{3} \cdot i_{v_1} \text{ kA}. \end{aligned}$$

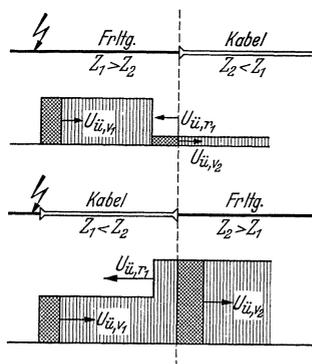


Abb. 345. Wanderwellenverlauf auf einem zusammengesetzten Leitungsstück bei voneinander abweichenden Wellenwiderständen.

Liegt im Zuge der Freileitung ein Kabelstück¹ nach Abb. 345 mit dem Wellenwiderstand Z_2 , so folgt nach Gl. (181) am Knotenpunkt bei $Z_1 = 500$ und $Z_2 = 50$:

$$\left. \begin{aligned} U_{\ddot{u},v_2} &= \frac{2}{1 + 10} \cdot U_{\ddot{u},v_1} = 0,182 \cdot U_{\ddot{u},v_1} \text{ kV} \\ U_{\ddot{u},r_1} &= \frac{1 - 10}{1 + 10} \cdot U_{\ddot{u},v_1} = -0,82 \cdot U_{\ddot{u},v_1} \text{ kV} \end{aligned} \right\} \text{ für Freileitung-Kabel}$$

und im umgekehrten Fall:

$$\left. \begin{aligned} U_{\ddot{u},v_2} &= \frac{2}{1 + \frac{1}{10}} \cdot U_{\ddot{u},v_1} = 1,82 \cdot U_{\ddot{u},v_1} \text{ kV} \\ U_{\ddot{u},r_1} &= \frac{1 - \frac{1}{10}}{1 + \frac{1}{10}} \cdot U_{\ddot{u},v_1} = +0,82 \cdot U_{\ddot{u},v_1} \text{ kV} \end{aligned} \right\} \text{ für Kabel-Freileitung}$$

oder in Worten: durch das Kabelstück mit nur dem zehnten Teil des Wellenwiderstandes der Freileitung wird die Überspannung stark herabgesetzt, im umgekehrten Fall stark erhöht. Ein Kabelstück kann daher je nach seiner Lage im Zuge der Wanderwelle eine große Änderung der

¹ Neuroth, K.: Beitrag zur Frage des Überspannungsschutzes von Stationen mit Kabelstrecken. ETZ 1938 Heft 12 S. 306. Boll, Dr.-Ing. G.: Schutz gegen Überspannungen durch Kondensatoren und Kabel. BBC-Nachr. 1934 Heft 1, S. 55.

Höhe der Spannung der fortlaufenden und der am Knotenpunkt zurückgeworfenen Welle herbeiführen.

Für andere Fälle läßt sich nach Gl. (181) und (182) die Höhe der weiterziehenden und der zurückgeworfenen Welle berechnen.

Aus dieser kurzen Betrachtung folgt, daß die Kopfanlage der größeren Gefahr ausgesetzt ist. Die Durchgangsanlage bringt eine

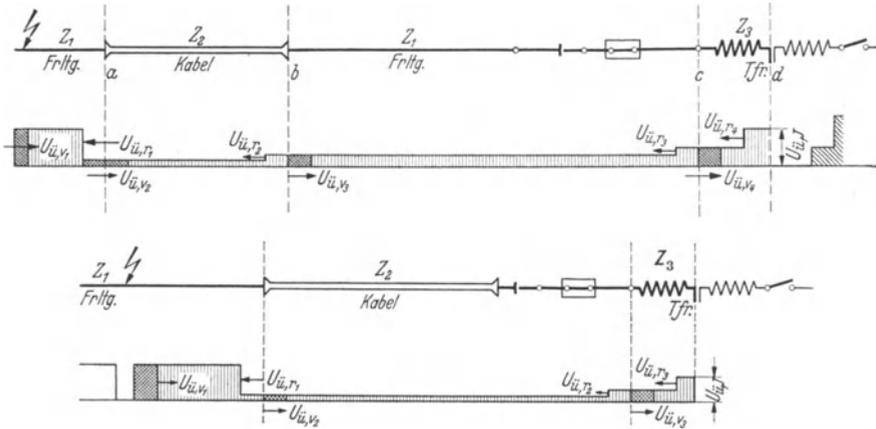


Abb. 346a und b. Wanderwellenverlauf auf einer Einfachleitung mit zwischengeschaltetem Kabelstück und Umspanner in der Kopfanlage.

Herabsetzung der Beanspruchung; die Änderung des Wellenwiderstandes am Knotenpunkt kann nach der einen oder anderen Richtung die Gefahrenhöhe beeinflussen.

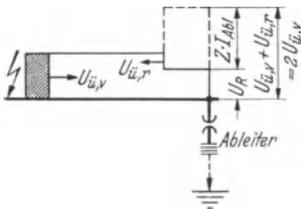


Abb. 347. Verlauf einer Überspannungswelle auf einem Leiter mit spannungsabhängigem Ableiter vor der Kopfanlage.

Besteht aber die Möglichkeit, daß die Durchgangsanlage zur Kopfanlage wird, wenn während eines Gewitters zu beiden Seiten der Anlage ein Schalter fällt, dann tritt die Beanspruchung einer Kopfanlage ein. Dieser ungünstigste Fall sollte stets besonders beachtet und überprüft werden.

Nicht unbeachtet darf bleiben, daß bei Durchgangsanlagen auch von zwei oder mehr Leitungen Gewitterüberspannungswellen gleichzeitig einziehen können. Das hängt von den Gebieten ab, durch die die einzelnen angeschlossenen Leitungen führen.

Da der kleine Wellenwiderstand der Kabel die Höhe der Überspannungswelle stark herabsetzt, bringt die Leitungseinführung mit Kabel schon bei einer Länge von 500 bis 1000 m gewisse Vorteile. Allerdings sollen dann aber Kabel für höhere Spannungen gewählt werden, damit die Überspannungswelle keinen Kabelisolationsdurchschlag herbeiführen kann, oder es müssen Ableiter am Knotenpunkt eingebaut werden.

Abb. 346a und b zeigen noch den Wanderwellenverlauf auf einer

Einfachleitung mit Kabelstück und Umspanner bei einer Kopfanlage, deren Unterspannungsschalter offen ist. Auf die Gefährdung des Umspanner-Nullpunktes ist bereits hingewiesen worden. Unter Umständen wird auch durch Umspannung der Schalter oder die Unterspannungswicklung des Umspanners gefährdet¹.

23. Beispiel: Es ist zu untersuchen, auf welche Höhe die Spannung im Umspanner-Sternpunkt zurückgeworfen wird, wenn die in Abb. 346a und b gezeichneten Leiteranordnungen gegeben sind. Es betrage hierbei je Phase:

$$Z_1 = 500 \text{ Ohm}$$

$$Z_2 = 50 \text{ Ohm}$$

$$Z_3 = 2000 \text{ Ohm.}$$

Höhe der in die Freileitung je Phase einziehenden Spannungswelle 800 kV.

Es ist: für Knotenpunkt *a*:

$$U_{\bar{u},v_2} = 0,182 \cdot U_{\bar{u},v_1} = 800 \cdot 0,182 \simeq 145 \text{ kV,}$$

$$U_{\bar{u},r_1} = -0,82 \cdot U_{\bar{u},v_1} = -800 \cdot 0,82 \simeq -655 \text{ kV;}$$

für Knotenpunkt *b*:

$$U_{\bar{u},v_3} = 1,82 \cdot U_{\bar{u},v_2} = 1,82 \cdot 145 \simeq 264 \text{ kV,}$$

$$U_{\bar{u},r_2} = +0,82 \cdot U_{\bar{u},v_2} = +0,82 \cdot 145 \simeq 119 \text{ kV;}$$

für Knotenpunkt *c*:

$$U_{\bar{u},v_4} = 1,6 \cdot U_{\bar{u},v_3} = 1,6 \cdot 264 \simeq 422 \text{ kV,}$$

$$U_{\bar{u},r_3} = 0,6 \cdot U_{\bar{u},v_3} = 0,6 \cdot 264 \simeq 158 \text{ kV;}$$

für Knotenpunkt *d*:

$$U_{\bar{u},J} = U_{\bar{u},v_4} + U_{\bar{u},r_4}; \quad U_{\bar{u},v_4} = U_{\bar{u},r_4},$$

$$U_{\bar{u},J} = 844 \text{ kV.}$$

Dieser Phasenspannung ist die Isolation des Umspanners nicht gewachsen. Bei der in Abb. 346b gezeichneten Leitungsausführung erhält man für die zurückgeworfene Spannung rd. 566 kV, die die Isolation des Umspanners aushalten dürfte.

Als Schutzmittel für die Ableitung von Gewitterüberspannungen² kommen erstlich spannungsabhängige Ableiter zur Verwendung. Für deren Wirkungsweise gilt zunächst allgemein folgendes:

Läuft eine Überspannungswelle $U_{\bar{u},v}$ auf eine Kopfanlage auf, und befindet sich an dem Leiter ein Ableiter nach Erde (Abb. 347) so ist:

$$2 \cdot U_{\bar{u},v} = U_{\bar{u},J} = U_{\bar{u},R} + I_{Abt} \cdot Z \text{ kV,} \quad (184)$$

worin $U_{\bar{u},R}$ die Restspannung in der Anlage in kV und I_{Abt} in kA den vom Ableiter aufzunehmenden Wanderwellenstrom bezeichnet. Um also

¹ Wellauer, M.: Die Übertragung von Überspannungen von der Oberspannungs- auf die Unterspannungswicklung von Transformatoren. BSVE 1939 Nr. 5 S. 124. Biermanns, J.: Blitzschutz von Freileitungen. Forschung und Technik. S. 234. Berlin: Julius Springer 1930.

² Frühauf, G.: Schutzwertbestimmung von Überspannungsableitern. AEG-Mitt. 1932 Heft 10. Groß, E.: Gewitterschutz durch Überspannungsableiter. Elektrotechn. u. Maschinenb. 1936 S. 87.

die Wanderwellenspannung abzusenken, muß der mit dem Wanderwellenwiderstand Z behaftete Strom abfließen. Aus Gl. (184) folgt:

$$I_{Abl} = \frac{2 \cdot U_{a,v} - U_{\dot{u},R}}{Z} = \frac{U_{\dot{u},J} - U_{\dot{u},R}}{Z} \text{ kA.} \quad (185)$$

Soll die Restspannung $U_{\dot{u},R}$ unverändert bleiben, so muß, da Z als unveränderlich angesehen werden kann, mit zunehmender Wanderwellenspannung der vom Ableiter aufgenommene Strom ebenfalls zunehmen. Wird Gl. (184) in der Form geschrieben:

$$\frac{U_{a,R}}{I_{Abl}} = \frac{U_{a,R} \cdot Z}{U_{a,J} - U_{a,R}} \text{ Ohm/Phase,} \quad (186)$$

so ist daraus zu erkennen, daß der Dämpfungswiderstand $\frac{U_{\dot{u},R}}{I_{Abl}}$ des Ableiters mit zunehmendem Strom I_{Abl} abnehmen muß, d. h. der Ableiter

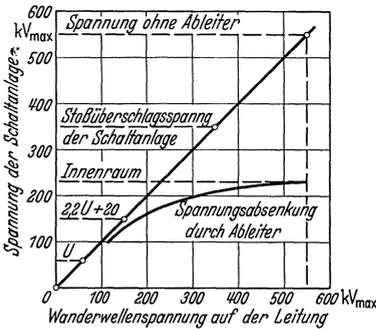


Abb. 348. Spannungsverlauf für das Absenken der Wanderwellenspannung durch spannungsabhängige Ableiter.

muß einen Strom-Spannungsverlauf besitzen, der spannungsabhängig ist. Da die Wanderwellenvorgänge außerordentlich schnell verlaufen, muß die Spannungsabhängigkeit verzögerungsfrei vor sich gehen. In Abb. 348 ist dieser Spannungsverlauf gekennzeichnet. Für die Spannungsabhängigkeit ist weiter zu berücksichtigen, daß beim Verschwinden der Überspannung der Ableiterstrom sehr schnell einen sehr kleinen Wert annehmen muß, um sichere Stromunterbrechung und Lichtbogenlöschung zu ermöglichen.

Für eine Durchgangsanlage mit den Wellenwiderständen Z_1 und Z_2 , sowie dem Ableiterwiderstand R_{Abl} erhält man für die auf dem Leiter mit Z_2 vorwärtslaufende Wanderwellenspannung:

$$U_{\dot{u},v_2} = \frac{U_{a,R} + 2 \cdot \frac{R_{Abl}}{Z_1} \cdot U_{\dot{u},v_1}}{1 + R_{Abl} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right)} \text{ kV.} \quad (187)$$

Die zurückgeworfene Spannung auf dem Leiter 1 ist dann:

$$U_{\dot{u},r_1} = \frac{U_{a,R} - U_{\dot{u},v_1} \cdot \left[1 + R_{Abl} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) \right]}{1 + R_{Abl} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right)} \text{ kV,} \quad (188)$$

und der Strom im Ableiter:

$$I_{Abl} = \frac{\frac{2}{Z_1} \cdot U_{\dot{u},v_1} - U_{a,R} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right)}{1 + R_{Abl} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right)} \text{ kA.} \quad (189)$$

Für andere Wellenwiderstände durch Kabel, Gerätewicklungen, Umspannerwicklungen, Drosselspulen wird die Rechnung umständlich.

Die Überspannungsschutzgeräte haben nun die Aufgabe, diese Überspannungen so stark abzusenken, daß die Isolation der durch sie geschützten Anlagen nicht mehr gefährdet wird. Das erfüllen sie dadurch, daß sie bei einer bestimmten Überspannungshöhe durch Spannungsüberschlag nach einer Erdelektrode eine besondere Verbindung nach Erde schaffen. Sie erzeugen dann einen künstlichen Erdschluß, müssen dabei aber so gebaut sein, daß kein Lichtbogen von Dauer auftritt, damit kein Maschinenstrom nach Erde folgen kann, der durch die Betriebsspannung verursacht wird. Der Widerstand der neueren Schutzgeräte für die Verbindung nach Erde beträgt etwa 100 bis 120 Ohm, hat aber dazu noch die besonderen spannungsabhängigen Eigenschaften, auf die bereits hingewiesen worden ist.

Die bis vor wenigen Jahren benutzten Überspannungsschutzgeräte in Form von Hörnerfunkenstrecken mit Öl- oder anderen Widerständen sind heute aus allen Anlagen verschwunden. Sie haben sich nur selten bewährt, zumeist wohl deshalb nicht, weil ihr Widerstand wesentlich zu hoch bemessen war, und sie daher in der Mehrzahl der Gefahrenfälle nicht zum Ansprechen kommen konnten. Besondere Widerstandsumschaltungen im Sinn einer gewissen Spannungsabhängigkeit hatten bessere Ergebnisse, aber auch diese genügen den heutigen Anforderungen nicht mehr. Es kann daher davon abgesehen werden, auf diese Schutzgeräte und ihre Schaltungen einzugehen.

Von den neuesten Schutzgeräten sollen kurz der Kathodenfallableiter der SSW und der SAW-Ableiter der AEG erläutert werden, mit denen nach den bisherigen Erfahrungen im Betrieb befriedigende Ergebnisse erzielt worden sind¹.

Die Wirkungsweise des SSW-Kathodenfall-Ableiters beruht auf dem Stromdurchgang durch Halbleiter-Platten, die mit sehr kleinen Zwischenräumen übereinander gestapelt sind. Die Zwischenräume werden mit zunehmender Größe des Wanderwellenstromes mehr und mehr durch stromstarke Glimmentladungen ausgefüllt, so daß der wirksame Widerstand des Ableiters mit zunehmendem Strom stark abnimmt. Der Widerstand der Halbleiter-Platten nimmt gleichfalls mit zunehmendem Entladestrom stark ab. Infolgedessen nimmt die Spannung am Ableiter mit zunehmendem Entladestrom nur um ein geringes zu.

Ist die Überspannung bis annähernd auf die Betriebsspannung abgesunken, so wird der Entladestrom ventilartig unterbrochen. Ein Nachfließen von Betriebsstrom wird mit Sicherheit unterbunden.

Diese Ableiter werden für Betriebsspannungen von 1,5 bis 200 kV gebaut.

Den Aufbau der Hochspannungsableiter zeigt Abb. 349. Vom Leiteranschluß bis zur Erdanschlußschraube sind eine Vorschaltfunkenstrecke,

¹ Borries, B. v.: Die Bewährung der Überspannungsableiter im Elektrizitätswerksbetrieb. ETZ 1937 Heft 19 S. 493. Estorff, W.: Beitrag zur Frage des elektrischen Sicherheitsgrades. ETZ 1937 Heft 20 S. 525.

eine Löschfunkenstrecke und die Ableitersäule in Reihe geschaltet. Diese 3 Ableiterelemente sind bei den Freiluftausführungen in einem luftdicht abgeschlossenen Gehäuse eingebaut. Die innere Isolation ist bei allen Freiluftableitern sehr reichlich bemessen, da eine Vorfunknestrecke mit großem Kriechweg die übrigen Ableiterelemente von der Betriebsspannung trennt. Alle Dichtungen sind mit doppelter Sicherheit ausgeführt. Einfach aufgesetzte Kapfen sind vermieden.

Aus den Schutzwertkennlinien Abb. 350 bis 352 ist der Ausgleich der Isolation in Kopf- und Durchgangsanlagen zu ersehen. Sie sind durch

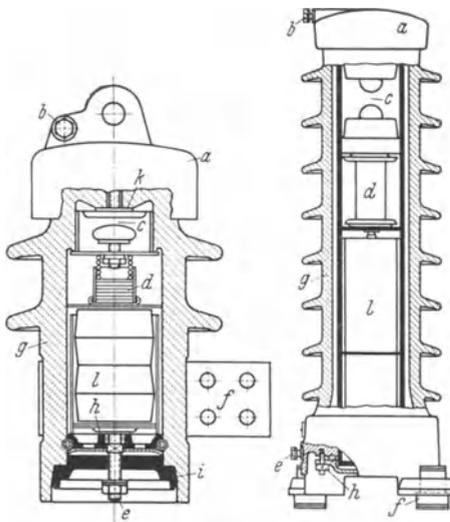


Abb. 349. Schnittzeichnungen des Kathodenfall-Ableiters (SSW).

a obere Kappe, *b* Anschlußschraube, *c* Vorschaltfunkenstrecke, *d* Löschfunkenstrecke, *e* Erdanschluß, *f* Befestigung, *g* Porzellangehäuse, *h* Bruchsicherung, *i* Abdichtung, *k* Gummidichtung, *l* Widerstand (Ableitersäule).

Versuche an Leitungen mit einem Wellenwiderstand von 500 Ohm aufgenommen, entsprechen also dem ungünstigen Fall des einphasigen Ansprechens. Die angegebenen Spannungswerte mit Kathodenfall-Ableitern sind Höchstwerte, die kurzzeitig unmittelbar nach dem Ansprechen auftreten. Abb. 353 zeigt eine oszillographische Aufnahme von Wanderwellenschwingungen und ihre Begrenzung durch diesen Ableiter.

Der SAW-Ableiter der AEG¹ besteht aus den zwei Hauptteilen, dem spannungsabhängigen Widerstand und der Löschfunkenstrecke, die auch hier in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht sind (Abb. 354).

Der elektrische Wert des spannungsabhängigen Widerstandes ändert sich im umge-

kehrten Verhältnis zur dritten Potenz der Spannung. Er beträgt z. B. bei doppelter Spannung nur noch $\frac{1}{8}$ seines ursprünglichen Wertes, d. h. er läßt den 8fachen Strom durch. Da bei der Ableitung von Überspannungen hohe Spannungswerte auftreten, können also sehr erhebliche Ströme abgeleitet werden, während andererseits der bei Betriebsspannung vorliegende hohe Ohmwert des Widerstandes die sichere Löschung nach beendetem Ableitervorgang in weniger als 0,015 s gewährleistet.

Die Löschfunkenstrecke trennt im gewöhnlichen Betriebszustand den SAW-Widerstand von der Leiterspannung. Erst bei Überschreitung der doppelten Nennspannung spricht sie an und schaltet den Widerstandskörper zwischen Leiter und Erde. Die einzelnen Elektroden der

¹ AEG-Mitt. 1937 Heft 10 S. 350.

als Vielfachfunkenstrecke ausgebildeten Säule sind so gestaltet, daß das elektrische Feld zwischen ihnen vollständig gleichmäßig ist. Hierdurch

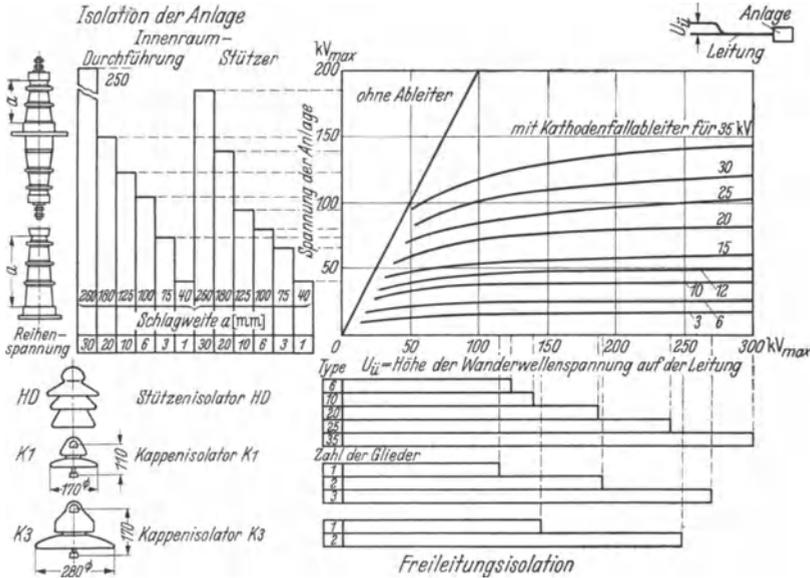


Abb. 350. Ausgleich der Isolation von Freileitungen und Kopfanlagen durch Kathodenfall-Ableiter von 3 bis 35 kV.

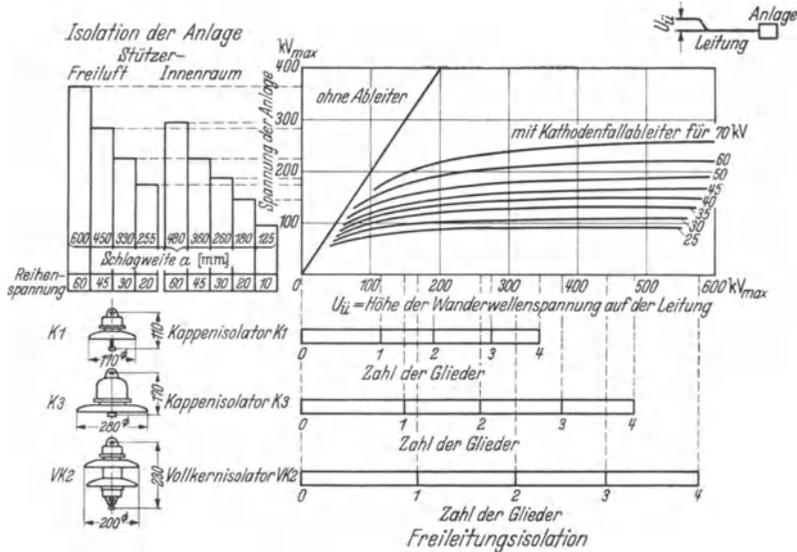


Abb. 351. Ausgleich der Isolation von Freileitungen und Kopfanlagen durch Kathodenfall-Ableiter von 25 bis 70 kV.

ist ein praktisch verzögerungsfreies Ansprechen bei einem Stoßwert von nur etwa 1,05 gewährleistet.

Der Ableiter unterbricht fehlerlos in längstens $\frac{1}{2}$ Periode. Nach dem Verschwinden der Überspannung unterbricht die Funkenstrecke den Stromfluß spätestens beim ersten Nulldurchgang der Betriebsspannung.

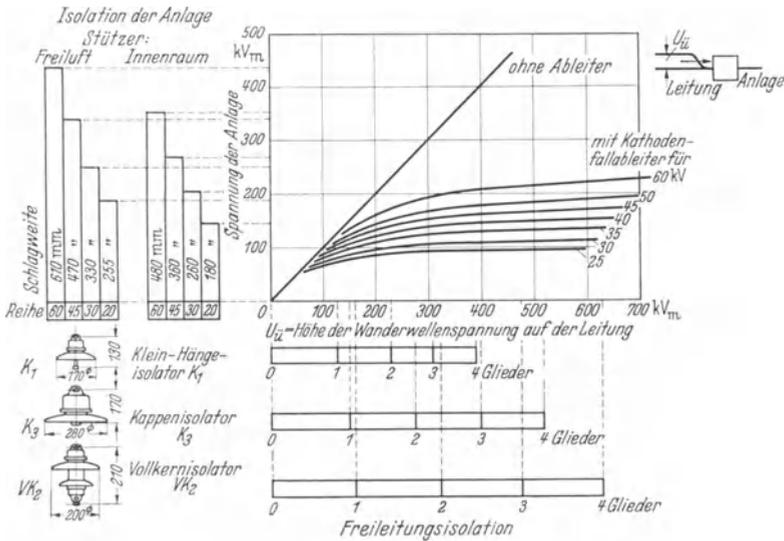


Abb. 352. Ausgleich der Isolation von Freileitungen und Durchgangsanlagen durch Kathodenfallableiter von 25 bis 60 kV.

Die SAW-Ableiter werden in dieser Form zur Zeit für Spannungen von 1 bis 200 kV ausgeführt. Die äußere Umhüllung besteht bei den Freiluft-

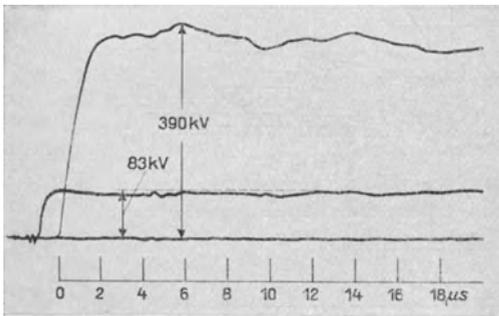


Abb. 353. Zeitlicher Verlauf einer Wanderwelle in einer Anlage ohne und mit Ableiter für 20 kV Nennspannung.

ableitern aus einem Porzellankörper, der bis zu 30 kV aus einem einzigen Stück hergestellt ist. Ein luftdichter Abschluß verhindert das „Atmen“ des Körpers, der außerdem mit einem künstlich getrockneten, neutralen Gas gefüllt ist, um jede Kondenswasserbildung unmöglich zu machen. Ableiter für trockene Innenräume sind in einem Hartpapiermantel eingebaut; sie sind im Preis niedriger als die entsprechenden Ableiter der Freiluftausführung.

Die Schutzwertkennlinien haben den gleichen Verlauf wie in Abb. 350 bis 352. Abb. 355 zeigt den Rückwurf einer Überspannungswelle auf 600 kV und ihr Abklingen gegenüber dem Spannungsverlauf mit SAW-Ableiter.

24. Beispiel (Abb. 351). Zu schützen sei die 30-kV-Schaltanlage eines Innenraumumspannwerkes als Kopfanlage. Die Isolation der Freileitung besteht aus 2 Vollkernisolatoren *VK 2*; die Kette hat eine Stoßüberschlagsspannung von etwa 320 kV_{max}. Die Isolation der Schaltanlage entspricht der Reihe 30 mit einer Stoßüberschlagsspannung von etwa 185 kV_{max} für Stützer und 260 kV_{max} für die Durchführungen. Bei einer Spannungshöhe der Wanderwelle von 320 kV_{max} wird die Isolation des Leiters noch nicht durchbrochen. Die in die Anlage einziehende Welle mit dieser Spannung würde einen sofortigen Überschlag über Stützer und Durchführungen herbeiführen. Durch den Überspannungsschutz wird die Wellenspannung schon beim Auftreffen auf die Schaltanlage auf etwa 110 kV abgesenkt, und somit jede Gefährdung beseitigt.

Wirtschaftlich ist noch besonders darauf hinzuweisen, daß auch dann der Zweck dieser Ableiter als erreicht angesehen werden kann, wenn ein Schutzgerät durch zu große Belastung bei Blitzeinschlag in den Leiter, oder in der Nähe der Schaltanlage zerstört wird, sofern nur die Isolation des Leiters oder der Schaltanlage nicht in Mitleidenschaft gezogen wurde. Die Instandsetzungskosten der Geräte sind dann jedenfalls zumeist wesentlich geringer als die einer zerstörten Schaltanlage, ganz abgesehen von der mit letzterer verbundenen Betriebsunterbrechung insgesamt.

Für die Auswahl der geeigneten Einbaustelle in die Leitung oder die Schaltanlage gilt der Grundsatz, daß der Ableiter möglichst nahe an den zu schützenden Anlagenteil herangebracht werden soll. Kurze Leitungsstücke zwischen Ableiter und Werk, kurze Anschlußleitung zum Ableiter selbst und kurze Verbindungsleitung zur Erde sind anzustreben, damit eine zusätzliche Verzögerung vermieden wird. Längen von 15 bis 20 m schränken die Schutzwirkung noch nicht ein.

In Kopfanlagen kann der Ableiter mit gleicher Wirkung an die Einleitungsklemmen oder an die Sammelschiene angeschlossen werden.

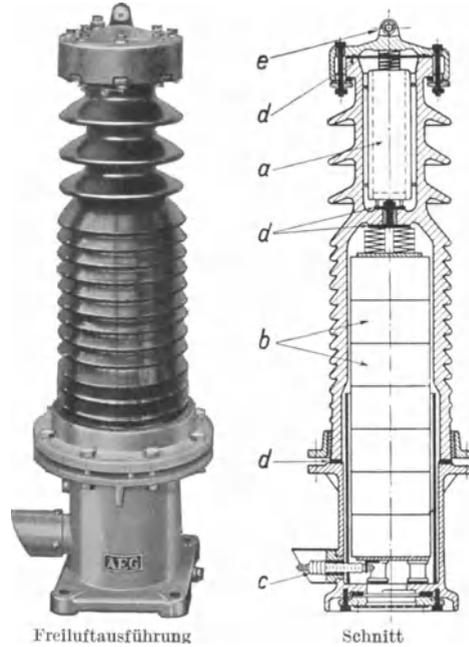


Abb. 354. SAW-Ableiter für 30 kV Nennspannung (AEG).

a Löschfunkenstrecke, *b* Widerstände, *c* Anschluß für Erdung und für Ansprechzähler, *d* Sonderdichtung, *e* Spannungsanschluß.

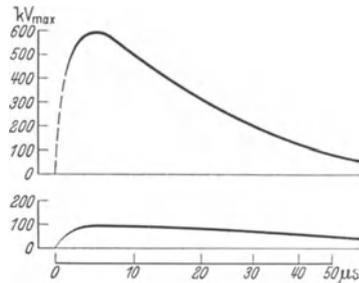


Abb. 355. Vergleich zwischen dem Wanderwellenverlauf ohne Ableiter mit Rückwurf auf 600 kV und dem Spannungsverlauf bei eingebautem SAW-Ableiter.

Auch der Endmast vor dem Werk eignet sich hierzu in manchen Fällen. Die Abb. 356 bis 358 zeigen Ausführungsbeispiele, zu denen Besonders nicht zu bemerken ist.

Bei Durchganganlagen mit mehreren abgehenden Leitungen ist folgendes zu beachten: Bei Anschluß der Ableiter an die Sammelschienen

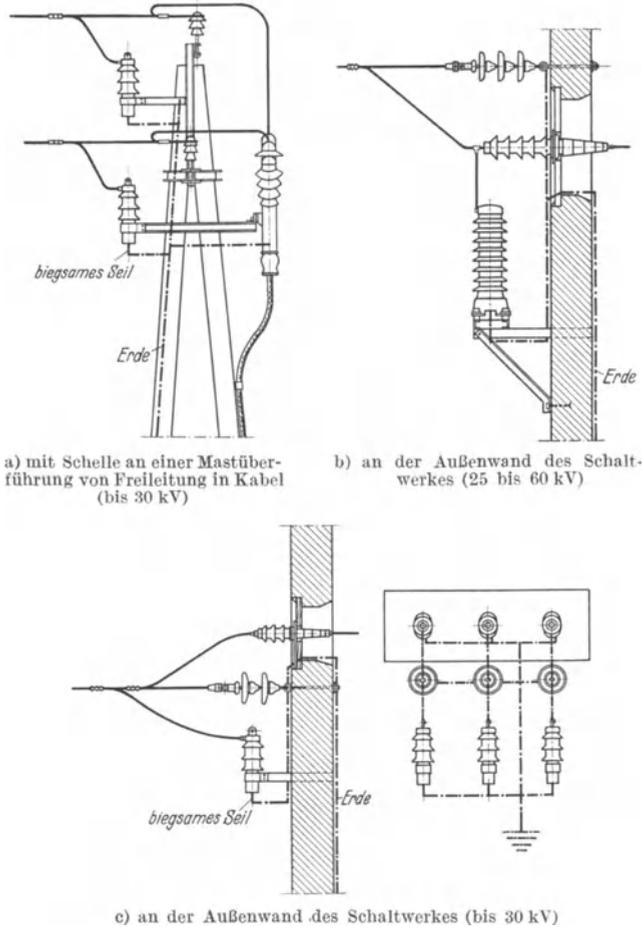


Abb. 356 a bis c. Ableitereinbauten verschiedener Ausführungsform.

genügt zwar ein einziger Ableitersatz für das ganze Werk, beim Öffnen von Leitungsschaltern bleiben jedoch die Leitungsenden, im wesentlichen also der eine Pol der Einführungstrennschalter ungeschützt. Soll auch dies noch vermieden werden, so ist jede Leitungseinführung mit einem Satz Ableiter zu versehen.

Auf eine einwandfreie niedrigohmige Erdung ist besonders zu achten, da sich der Erdungswiderstand zu dem des Ableiters addiert und den Schutzwert verringert. Es soll daher die Ableitererde leitend mit der

allgemeinen Hochspannungsschutzerdung des Werkes verbunden werden, wodurch der Erdwiderstand überhaupt ausgeschaltet wird.

Besonders zu erwähnen ist noch der Ansprechzähler für Überspannungsableiter. Er wird in die Erdleitung des Ableiters eingeschaltet und gestattet unmittelbare Ablesung der Ansprechhäufigkeit. Um jede Abhängigkeit des Zählvorganges von Form, Dauer und Energie der Überspannung zu vermeiden, wird das Zählmeßwerk von einer Hilfsspannung (Trockenbatterie) betätigt. Der Strom im Ableiter hat also den Zählvorgang nur auszulösen, nicht aber das Zählwerk selbst zu schalten. Das Zählwerk kann getrennt auch in die Schaltwarte eingebaut und zusätzlich mit einer Zeitaufzeichnung versehen werden.

Elektrische Maschinen, die ohne Zwischenschaltung von Umspannern an Freileitungen angeschlossen werden, sind ebenfalls durch diese Überspannungsschutzgeräte zu sichern. Als zulässige Stoßüberschlagsspannung an den Maschinenklemmen ist mit Rücksicht auf die Alterung der Isolation nur der Höchstwert der Prüfwechselspannung der Maschine nach den REM-Bestimmungen anzunehmen.

Die Schutzgeräte sind entweder an die Maschinenklemmen oder besser noch an jede Freileitung anzuschließen. Empfohlen wird ferner, Ableiter auch zwischen Maschinensternpunkt und Gehäuse anzuordnen. Der Sternpunkt muß dann aus der Maschine herausgeführt werden. Die ersten Maste vor dem Kraftwerk sind besonders gut zu erden, und die Leitungen mit Erdseilen auf einer Entfernung von etwa 500 bis 1000 m zu versehen (Abb. 359). Bei Holzmasten sind die Isolatorenträger oder die Isolatorenstützen ebenfalls gut zu erden.

Die Nennspannung des Ableiter zwischen Leiter und Erde ist gleich der Betriebsspannung des an die Maschinen angeschlossenen Netzes, die Nennspannung des Ableiters am Sternpunkt gleich dem 0,8fachen dieser Spannung zu wählen¹.

Besondere Schutzkondensatoren zusätzlich an den Maschinenklemmen werden heute selten eingebaut, da die Kabelverbindung zu den Sammelschienen zumeist einen gleichwertigen Schutz bietet.

Außer zur unmittelbaren Absenkung von Überspannungen in Kopf-

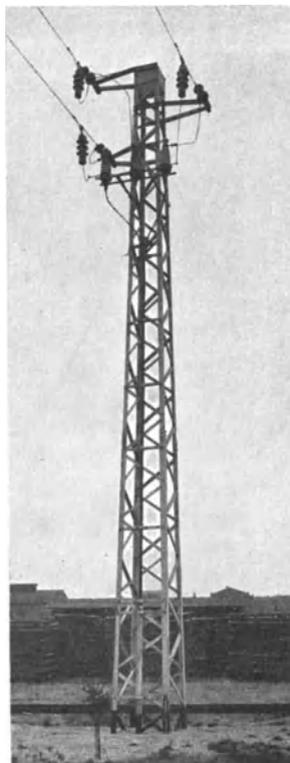


Abb. 357. Kathodenfallableiter am Abspann- und Kabelüberführungsmast einer 10-kV-Leitung.

¹ Arbeitet die Anlage mit Erdschlußlöschspulen, so ist das auf S. 427 Gesagte zu beachten.

und Durchgangsanlagen können diese Ableiter auch in einer Reihe anderer Fälle mit Nutzen verwendet werden. Die Nullpunktschwingungen von Umspannern in Stern-Schaltung¹, die bei unmittelbaren Blitzüberspannungen eine gewisse Höhe erreichen können, wirken sich meist nur in ungefährlichen Überschlägen aus, da keine Netzleistung

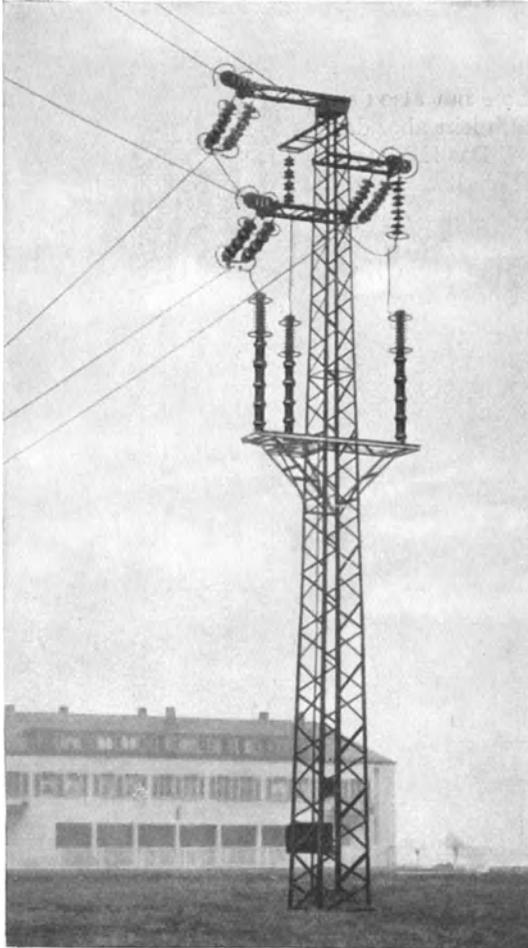


Abb. 358. SAW-Ableiter mit Ansprechzähler am Endmast einer 110-kV-Leitung.

nachfolgt. Zur völligen Beseitigung dieser Störungen hat sich der Anschluß eines für entsprechend kleinere Spannung bemessenen Ableiters zwischen Sternpunkt und Erde bewährt. In hohem Maß sind die Reihenwicklungen von Zusatz-Umspannern durch Sprungwellengefährdet. Da sie im Zug der Leitung liegen, müssen sie entlang der Zusatzwicklung die volle Stoßhöhe aushalten, was leicht zu Wicklungsschäden führt. Überbrückt man die Reihenwicklung durch einen passend ausgelegten Ableiter, so wird die Stoßwelle an der Wicklung vorbeigeleitet. In gleicher Weise können auch andere Reihenwicklungen z.B.

Strombegrenzungsdrosseln u. dgl. geschützt werden. Die Spannungsbegrenzung ist so außerordentlich wirkungsvoll, daß auch ältere, schwache Umspanner weitgehend

vor Überspannungsstörungen bewahrt bleiben. Die für die Umspanner besonders gefährlichen Spannungsschwingungen von Leitungen, Kabeln u. dgl. (Erregung von Eigenschwingungen der Umspannerwicklung) werden durch die Ableiter ebenfalls unterdrückt.

¹ Frühauf, G.: Nullpunktsüberspannungen an Transformatoren und ihre Bekämpfung. VDE-Fachberichte 1936 S. 156.

Die beim Betrieb von Gleichrichteranlagen unerwünschten Überspannungen, die bei hohen Überlastungen, insbesondere bei niedriger Temperatur des Gleichrichtergefäßes auftreten können, werden durch

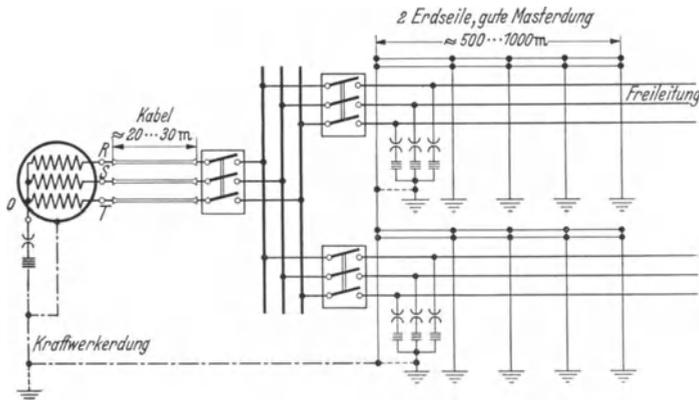


Abb. 359. Überspannungsableiter und Erdseile als Schutz der Maschinen bei unmittelbarem Freileitungsanschluß an die Sammelschienen.

Ableiter zwischen Umspannerklemme und -nullpunkt unschädlich gemacht. Schließlich sind diese Ableiter im Bahnbetrieb mit 16% Hz, und zwar in Verteilungsanlagen wie in elektrischen Lokomotiven anwendbar.

Auch in Gleichspannungsnetzen für die meist gebrauchten Spannungen 750 und 1500 V sind diese Ableiter benutzbar.

Zur weiteren Sicherung der Schaltgeräteisolatoren bei Spannungen von 50 kV aufwärts werden diese noch mit Parallelfunkenstrecken versehen, zwischen denen gegebenenfalls der Überschlag erfolgen soll, um die Isolatoren selbst vor Zerstörungen zu schützen. Auch diese Funkenstrecken müssen einwandfrei die Bedingung erfüllen, daß kein Lichtbogen nach dem Ansprechen stehenbleibt. Trotzdem keine besonderen Mittel zur Erfüllung dieser Bedingungen angewendet werden können, kommt den Parallelfunkenstrecken doch eine wesentliche Bedeutung zu. Mit der Erhöhung des Elektrodenabstandes solcher Funkenstrecken wird die Ansprechspannung heraufgesetzt und der Schutzwert vermindert¹.

Die selbstlöschende Schutzfunkenstrecke² (Löschrohrableiter) ist ein weiteres verbilligtes Schutzgerät, das in neuester Zeit

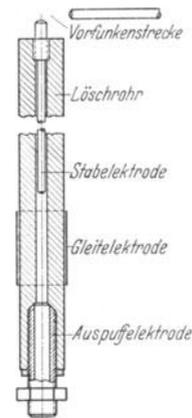


Abb. 360. Schnitt durch einen Löschröhrableiter.

¹ Frühauf, G.: Die Grenzen der Belastbarkeit von Überspannungsableitern unter Berücksichtigung direkter Blitzschläge. ETZ 1937 Heft 17 S. 441.

² Foitzik, R. Dr.-Ing.: Löschröhrableiter und ihre Anwendungsmöglichkeiten. ETZ 1939 Heft 9 S. 268.

Eingang auch in die deutschen Kraftübertragungsanlagen gefunden hat. Der Aufbau und die Wirkungsweise sind kurz folgende (Abb. 360).

Eine stabförmige Elektrode, die am oberen Ende eines Isolierrohres (Löschrohr) angebracht ist und dieses gleichzeitig abschließt, ragt weit in das Rohrinne hinein. Am unteren Ende des Isolierrohres sitzt eine Rohrelektrode (Auspuffelektrode), die an Erde angeschlossen wird.

Beim Ansprechen wird die Funkenstrecke überschlagen.

Nach dem Ansprechen erfolgt die Löschung des über den Funkenkanal nachfolgenden Betriebsstromes auf eine ähnliche Weise wie bei den alten Hochspannungs-Auspuffsicherungen. Der im Innern des Isolierrohres zwischen der Stab- und der Rohrelektrode brennende Lichtbogen macht wegen seiner hohen Temperatur aus der Wandung des Isolierrohres Gasmengen frei. Dadurch bildet sich im Rohrinne plötzlich ein

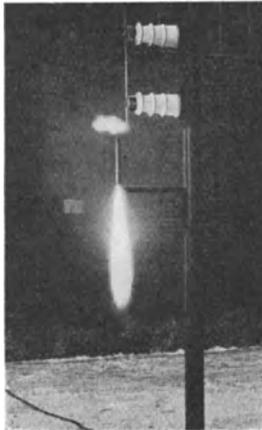


Abb. 361. Schaltfeuer beim Ansprechen des Löschrohrableiters.



Abb. 362. Freileitungs-Löschrohrableiter beim Ansprechen.

hoher Gasdruck aus, der sich im Stromnulldurchgang ausdehnt, wodurch eine Neuzündung des Lichtbogens verhindert wird. Der heiße Gasstrom tritt am unteren Ende des Löschrohres als Schaltfeuer aus (Abb. 361). Das Löschrohr ist für die Abgabe eines möglichst wirksamen, kräftigen Löschgasstromes besonders hergerichtet. Diese Schutzgeräte werden für Freileitungen und für Schaltwerke verwendet.

Ihr Einbau in die Freileitungen hat den Zweck, die Schutzzeineinrichtungen der Strecke, das sind Erdseil und Masterdung, zusätzlich zuverlässiger dadurch zu gestalten, daß sie parallel zu den Isolatorketten angebracht werden und einen Ausgleich der Überspannung nach Erde

herbeiführen. Damit können gegebenenfalls auf die Kosten¹ der Erdseilverlegung und der guten Masterdung verbilligt werden. Diese Schutzfunkenstrecken ersetzen die Hörnerfunkenstrecken an den Isolatorketten. Abb. 362 zeigt ein solches Schutzgerät in Wirksamkeit.

Für Mittelspannungsnetze bis 30 kV und Holzmaste mit nicht geerdeten Isolatorträgern, die an sich infolge des hohen Isolierwertes der Holzmaste verhältnismäßig sehr gewitterfest sind, sollen diese Schutzgeräte den Überspannungsausgleich an den eisernen Eck- und Kreuzungs- bzw. Abspannmasten herbeiführen. Diese Maste mit ihrer Isolation sind im Zuge dieser Art der Freileitungen stets besonders gefährdet.

Die Schutzwirkungen für Freileitungen lassen sich verhältnismäßig sicher erwarten, da die Stoßüberschlagsspannung der Isolation hoch ist.

Der Schutz der Schaltwerk-Isolation ist mit diesen Schutzgeräten schwieriger durchzuführen, denn Schutzwirkung und Löschvermögen stehen in entgegengesetzt wirkender Abhängigkeit. Mit der Verkürzung des Elektrodenabstandes wird bei einer bestimmten Betriebsspannung die Löschwirkung heraufgesetzt. Zur Beherrschung eines großen Bereiches für den nachfolgenden Erd- und Kurzschlußstrom darf aber der Abstand der Elektroden ein bestimmtes Verhältnis zur Betriebsspannung nicht überschreiten. Da ferner in deutschen Anlagen der Sternpunkt nicht fest geerdet wird, haben bei einem einpoligen Erdschluß die Funkenstrecken der beiden anderen Leiter die volle verkettete Spannung zu löschen. Das erfordert wieder einen größeren Elektrodenabstand, damit eine Erhöhung der Ansprechspannung, also eine Verschlechterung der Schutzwirkung. Es werden daher besondere Hilfsmittel zur Verbesserung der Schutzwirkung vorgesehen, so z. B. eine Vorfunkstrecke und eine Gleitelektrode bei der SSW-Bauart. Die Vorfunkstrecke allein hat eine Wechselüberschlagsspannung von rund dem 1,3fachen der Ableiternennspannung. Sie ist so bemessen, daß bei Überbrückung der inneren Funkenstrecke die volle verkettete Betriebsspannung von der äußeren Luftstrecke allein ausgehalten wird.

Die heutigen Ausführungen dieses Schutzgerätes lassen Kurzschlußströme bis zu 3 kA bei der verketteten Spannung beherrschen. Für Schaltwerke werden die Löschrohrableiter für Betriebsspannungen von 6 bis 100 kV gebaut.

Bei einer Eigenfrequenz des Netzes von rund 500 Hz und 0,34 kA Kurzschlußstrom erzeugen die ausgestoßenen Löschgase einen Feuerstrahl von etwa 1 m Länge. Bei großen Stoßströmen ist der Löschvorgang von einem lauten, scharfen Knall begleitet. Wegen der unangenehmen Eigenschaften beim Löschvorgang ist es empfehlenswert, Löschrohrableiter zum Schutz der Innenraumisolation nur in solche Anlagen einzubauen, in denen der Kurzschlußstrom Werte von 1 kA nicht wesentlich übersteigen kann. Man wird die Löschrohrableiter also vor allem in kleinen, von Speisepunkten entfernt liegenden Schaltwerken mit Vorteil verwenden, in denen sich ein Einbau der wertvollen Ventilableiter wegen des höheren Preises nicht lohnt. Bei der Durchbildung der

¹ Amerikanische Erfahrungen mit selbstlöschenden Funkenstrecken. ETZ 1939 Heft 27 S. 811.

Schaltanlage muß auf den Schutz gegen das Schaltfeuer besonders geachtet werden (Abb. 363).

Die bisherigen Erfahrungen für Schaltwerke mittlerer Spannung sind befriedigend, indessen können sie noch nicht so verallgemeinert werden, daß sie dieses verbilligte Schutzgerät für alle Fälle als empfehlenswert kennzeichnen. Auf die Lebensdauer, die leichte Auswechselung und die Unterhaltung ist besonders zu achten.

Für die Auswahl aller Überspannungsschutzgeräte ist das Verhältnis der Stoßüberschlagsspannung der Freileitungsisolation zu der der Schaltanlage-Isolation (Freiluft, Innenraum) bestimmend, wobei die ungünstigsten Verhältnisse auf der Freileitung und die Luft- und Isolationsbeschaffenheit der Schaltanlage berücksichtigt werden müssen¹.

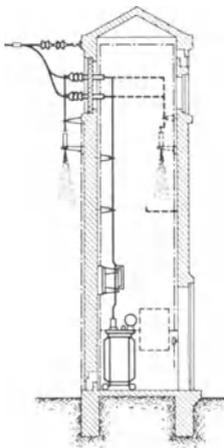


Abb. 363. Einbau von Löschrohrableitern an und in einem kleinen Umspannwerk

Für die Abstimmung der Isolation der Freileitungen zu der der Schaltanlagen sind eine Reihe von Vorschlägen gemacht worden, die gewiß große Vorteile bieten. Aber da in der Mehrzahl der Fälle ältere Anlagen mit neueren zusammengeschaltet werden müssen, und die Änderung der Isolation der älteren Anlagen zumeist ohne sehr erhebliche Kosten kaum durchzuführen ist, wird eine Isolationsabstimmung nur selten und nur für Neubauten in einer Form vorgenommen werden können, die allen zeitgemäßen Ansichten gerecht wird. Man muß sich dann durch den Einbau dieser Überspannungsschutzgeräte helfen.

f) **Der Erdschluß** gehört zu den häufigsten Störungsursachen in allen Hochspannungs-Freileitungsnetzen. Als Erdschluß bezeichnet man jede ungewollte leitende Verbindung einer isolierten Phase mit Erde. Da in Deutschland der Nullpunkt der Umspanner oder Maschinenwicklungen betriebsmäßig von Erde voll isoliert ist, können die mit

einem Erdschluß verbundenen Begleiterscheinungen — Überspannungen, starke Wärmeentwicklungen an der Erdschlußstelle, gefährliches Spannungsgefälle am Erdschlußpunkt für Mensch und Tier — den Netzbetrieb so stark beeinträchtigen, daß eine Abschaltung der erdschlußbehafteten Strecke oder Anlage notwendig wird. Der Betrieb muß also dem Erdschluß und seiner Bekämpfung — auch in Kabelnetzen, wie später gezeigt wird — ganz besondere Beachtung zuwenden.

Von den Ursachen für die Entstehung eines Erdschlusses sind herauszuheben diejenigen durch Fremdkörper und durch Isolationsbeschädigung. Erstere werden eingeleitet durch Äste, Baumzweige, Strohhalme, Drachenschnüre, Vögel und ähnliches, die die Verbindung eines Leiters nach Erde herstellen, letztere liegen in der Beschädigung der Isolatoren (Haarrisse, Durchschlag, Überschlag, Zertrümmerung, leitender Über-

¹ Der gegenwärtige Stand des elektrischen Sicherheitsgrades in Amerika. ETZ 1938 Heft 8 S. 197. Estorff, W. Dr. Ing.: Die Bemessung der Isolation elektrischer Hochspannungsanlagen. ETZ 1939 Heft 28 S. 825; Heft 29 S. 860.

zug, Leiter- oder Isolatorbruch) und der Wicklungsisolation der Maschinen und Geräte, bei der ein Stromübergang nach dem geerdeten Gehäuse stattfindet.

Zu unterscheiden ist ferner zwischen einem vorübergehenden, einem aussetzenden und einem dauernden Erdschluß. Der vorübergehende Erdschluß (Wischer) ist nur dann von besonderer Bedeutung, wenn er z. B. auf einer mit Bäumen bestandenen Strecke durch ungenügende Ausüstung fortgesetzt entsteht. Die Isolationsbeschädigung dagegen hat unter Umständen einen aussetzenden oder auch einen Dauererdschluß zur Folge, wobei unter aussetzendem Erdschluß ein solcher zu verstehen ist, der periodisch nach seiner Einleitung durch einen verlöschenden und wieder gezündeten Lichtbogen aufhört und neu entsteht.

Jeder Erdschluß hat infolge der Störung des bestehenden elektrischen Zustandes die Auslösung von Wanderwellen zur Folge. Am gefährlichsten ist der durch Funken- oder Lichtbogenbildung hervorgerufene aussetzende Erdschluß (Abb. 364). Je nach der Größe

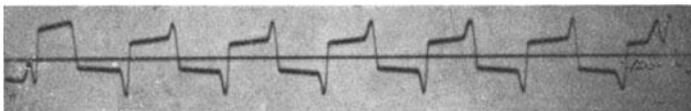


Abb. 364. Überspannungen bei einem aussetzenden Erdschluß über Lichtbogenbildung.

des Erdschlußstromes erlischt entweder der Lichtbogen selbsttätig beim Durchgang des Stromes durch Null, oder er wird stets neu gezündet, bleibt also gewissermaßen stehen. Nach Erfahrungen und Versuchen tritt das selbsttätige Erlöschen und nicht wieder Zünden des Lichtbogens bei einem Erdschlußstrom über etwa 5 A nicht mehr ein. Die durch den aussetzenden Erdschlußlichtbogen hervorgerufenen Überspannungen erreichen an den nicht vom Erdschluß betroffenen Phasen Werte bis zum 4,5fachen und an der erdgeschlossenen Phase bis zum 4fachen Betrag der Phasenspannung.

Der Vorgang in einem isolierten Netz bei Erdschluß an einem Isolator auf einer Freileitung ist kurz folgender: Schlägt ein Hängeisolator zwischen Klöppel und Kappe durch, so fließt ein Ladestrom nach Erde, der nur während eines kleinen Bruchteiles einer Periode besteht. Er hat einen viel höheren Wert als der Betriebsladestrom, weil er das Netz, wie weiter unten gezeigt wird, in sehr kurzer Zeit entladen muß. Sobald der Strom erloschen ist, ist auch die Verbindung dieser Phase mit Erde unterbrochen; sie wird also nicht mehr auf dem Erdpotential Null festgehalten. Die Spannung nach Erde schwingt nun im Takt eines Wechsels hinauf, bis der zum neuen Durchschlag erforderliche Wert erreicht ist. Jeder einzelne Durchschlag ist nichts anderes als ein Schaltvorgang. Erfolgt für jeden Wechsel ein Durchschlag, so bedeutet das, daß in 1 s 100 Wanderwellen mit steiler Stirn in das Netz gesendet werden. Dauert der Erdschluß längere Zeit

an, so daß die Fußpunkte des Lichtbogens an der Störungsstelle erhitzt werden, dann genügt infolge der Ionisierung der Luftstrecke eine geringere Spannung nach Erde, um den Lichtbogen immer erneut zu zünden.

Der Erdschlußlichtbogen ist wie bereits gesagt sehr beweglich und kann sich z. B. beim Überschlag einer Isolatorreihe zu großer Länge ausziehen. Das hat bei höheren Spannungen u. U. ein Überspringen auf die benachbarten Phasen zur Folge, wodurch nunmehr ein vollständiger Kurzschluß entsteht. Bei großer Maschinenleistung kann ferner die Energie des Lichtbogens den Isolator zertrümmern und den Leiter bei

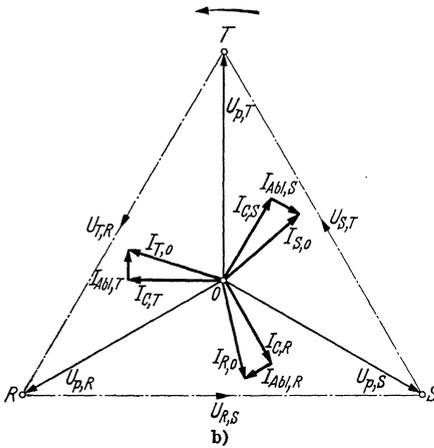
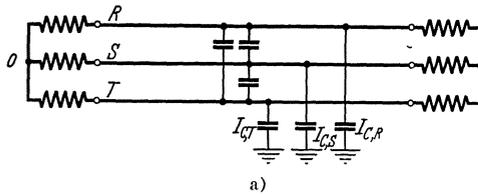


Abb. 365a und b. Ungestörter Netzzustand.

elektrischen Verhältnisse folgendermaßen: Jede mit Wechselstrom betriebene Leitung nimmt infolge der Kapazität Ladeströme auf, die von der Höhe der Spannung, der Länge der Leitung, der gegenseitigen Anordnung der Leiter, der Art der Leitungsausführung (Kabel oder Freileitung) und der Frequenz abhängig sind. Der Gesamt-ladestrom, der sich aus den Teilströmen infolge der Eigenkapazität und der gegenseitigen Kapazität zusammensetzt, ist bei ungestörtem Betrieb in jedem Augenblick Null. In Abb. 365a und b ist der Leitungszustand und das Spannungsdreieck für den ungestörten Betrieb einer in Stern geschalteten Drehstromanlage dargestellt. Die Phasen- oder Sternspannungen sind OR , OS , OT . Erhält nun die Phase T Erdschluß (Abb. 366a und b), so wird die Erdkapazität der Phase T durch den

Aluminium sofort verbrennen, bei Kupfer so stark schwächen, daß auch hier bei einer folgenden höheren mechanischen Beanspruchung durch Wind oder dgl. ein Leiterbruch herbeigeführt wird. Der auf dem Erdboden liegende Leiter hat dann Dauererdschluß zur Folge. Schlägt im Netz an irgendeiner Stelle eine zweite Phase nach Erde durch, so entsteht der Erdkurzschluß oder Doppelerdschluß, der besonders für Schwachstromanlagen mit geerdeter Rückleitung sehr gefährlich werden kann. Es ist hierüber im Band II bereits gesprochen worden. Erdschluß im isolierten Netz, Erdkurzschluß und Doppelerdschluß müssen sofort abgeschaltet werden.

Für den Erdschluß in einem isolierten Drehstromnetz gestalten sich die

Kurzschluß dieser Kapazität Null. Die beiden gesunden Phasen OR und OS nehmen gegen Erde die verkettete Spannung an. Die Ladeströme dieser beiden Phasen steigen auf den $\sqrt{3}$ fachen Wert. Nach den Angaben in Band II ist der Erdschlußstrom (im Band II = Fehlerstrom I_F) für eine einfache Drehstromleitung:

$$I_{E,C} = I_F = \sqrt{3} \cdot U \cdot \omega \cdot C_e \cdot 10^{-6} = \sqrt{3} \cdot U \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_e \cdot 10^{-6} \text{ kA/km}$$

$$= 3 \cdot U_{\varphi} \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_e \cdot 10^{-6} \text{ kA/km} \quad (190 \text{ a})$$

und überschläglich für eine Freileitung:

$$I_{E,C} = \frac{U \cdot l_F}{(325 \div 385)} 10^{-3} \text{ kA}$$

bei $f = 50$ Per/s,

für eine Kabelleitung (einfacher Drehstromkabel mit Rundleitern):

$$I_{E,C} = \frac{U \cdot 25 \cdot l_{Kab}}{(325 \div 385)} \cdot 10^{-3} \text{ kA}$$

bei $f = 50$ Per/s

(l_{Kab} Länge der Kabelleitung in km).

Für die Wahl des Zahlenwertes (325 bis 385) gilt das auf S. 74 Gesagte gleichfalls.

Wohl zu beachten ist für C_e auch die Zahl und Größe im Netz eingeschalteter Kondensatorbatterien, sowie betriebsmäßige Netztrennungen und sonstige C_e beeinflussende Betriebszustände.

An sich verläuft der Ladestrom jedes Leiters infolge der längs des Leiters verteilten Kapazität von seinem Höchstwert am Anfang des Leiters allmählich bis zum Wert Null am Ende des Leiters. Beim Erdschluß nimmt der Summen-Erdschlußstrom aller drei Phasen von beiden Seiten der Leitung nach der Erdschlußstelle allmählich zu (Abb. 366a), und zwar wird der Ladestrom von den gesunden Phasen aller Leitungen des Netzes, soweit sie metallisch verbunden sind, in die kranke Phase der fehlerhaften Leitung hineingeliefert. In Abb. 366a ist auch der anteilige Wirkstrom (Ableitungsstrom über die Isolationswiderstände, Verluststrom der Umspanner und dielektrische Verluste)

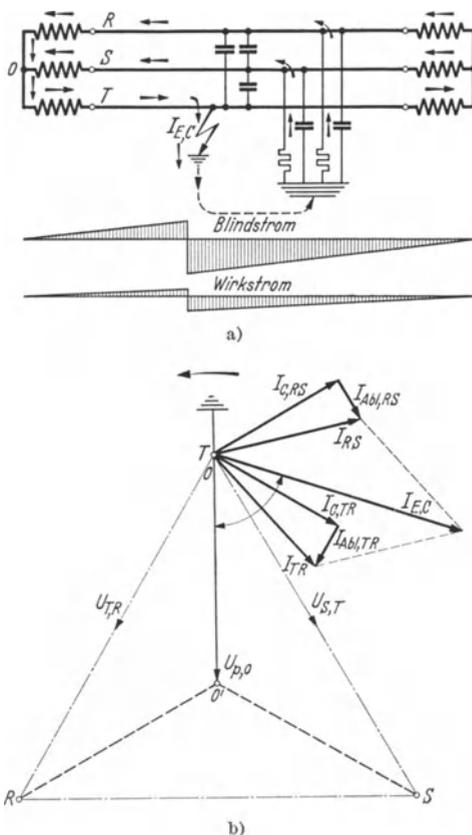


Abb. 366a und b. Erdschluß der Netzphase T , Verteilung des Blind- und Wirkstromes.

eingetragen. Da das Netz der Lieferer des kapazitiven Erdschlußstromes ist (nicht der Stromerzeuger), ändert sich mit der Fehlerstelle auch stets der Ausgangspunkt des Erdschlußstromes. Der Erdschlußstrom nach seinem Wirk- und Blindanteil hat beim isolierten Netz an der Erdschlußstelle seinen größten Wert.

Der einphasige Erdschlußstrom erzeugt eine über die Betriebsbelastung überlagerte einphasige Belastung der Umspanner und Stromerzeuger und bringt ferner eine Verzerrung der Strom- und Spannungsverhältnisse der Anlage hervor.

Bei ausgedehnten Hochspannungsnetzen höherer und höchster Spannungen kann der Fehlerstrom so groß werden, daß die Anlage stark gefährdet wird. Dann ist das Netz in ein oder mehrere Teile zu zerlegen, die durch Isolierumspanner mit dem Übersetzungsverhältnis 1 : 1 verbunden werden. Diese metallische Trennung begrenzt die Erdschlußströme auf ihre Teilgebiete. Beim Zusammenschluß großer Netze zum Verbundbetrieb muß oft auch aus Betriebsgründen eine solche Zwischenschaltung von Isolierumspannern vorgenommen werden. Dabei ist dann auf die Spannungsregelung besonders zu achten.

Die Erdschlußüberwachung¹. Da durch den Erdschluß auf einer Leitung die Spannungsverhältnisse geändert werden, und sich über den Betriebsstrom Kapazitätsströme überlagern, können diese beiden Zustandsänderungen zur Erdschlußüberwachung benutzt werden.

Die Änderung der Nullpunktspannung gegen Erde zeigt an, daß an irgendeiner Stelle des Netztes ein Erdschluß besteht. Legt man also in eine Drehstromleitung drei nach Erde geschaltete Spannungsmesser, so kann auf diese Weise ein Erdschluß und die erdgeschlossene Phase festgestellt werden. Allerdings gestattet diese einfache Erdschlußüberwachung nicht in einem Netz zu erkennen, welche Leitung den Fehler aufweist, weil nach dem bisher Gesagten die Spannungsverlagerung im ganzen Netz eintritt. Im Betrieb muß dann durch Netzauftrennungen und Leitungsabschaltungen die fehlerhafte Leitung herausgeschaltet werden. Das ist in größeren Netzen bei hohen Spannungen und bei Hauptspeise- und Verbindungsleitungen eine zumeist sehr umständliche, zeitraubende und sehr wenig geschätzte Betriebsmaßnahme, weil einmal im isolierten Netz der Erdschluß wegen seiner gefährlichen Nebenerscheinungen so schnell wie möglich abgeschaltet werden muß, andererseits die Stromlieferung für die gesunden Anlageteile nicht gestört werden darf.

Trotzdem diese Form der Erdschlußüberwachung den Betrieb nicht befriedigt, wird sie in der Mehrzahl aller Anlagen benutzt, weil sie sehr einfach ist. Die Spannungsmesser müssen einen Platz erhalten, der dem Schaltwärter die Beobachtung jederzeit gestattet. Besondere Anzeigevorrichtungen wie Fallklappen, Hupen, Lampen werden zumeist nicht verwendet, weil sie auch bei jedem vorübergehenden Erdschluß, also auch bei jedem Wischer und bei jeder größeren Spannungsänderung ansprechen und den Betrieb nur beunruhigen würden.

¹ Fleischhauer, W., Dr.-Ing.: Vorgänge bei Erdschluß in gelöschten und ungelöschten Netzen und die gebräuchlichen Relaischutzeinrichtungen. Siemens-Z. 1935 Heft 11.

Es sind aber auch Schaltungen und Meßwerke durchgebildet, die die Erdschlußanzeige auf einer Fallklappentafel melden. Dabei ist darauf aufmerksam zu machen, daß nur solche Meßwerke mit ihrer Schaltung betrieblich brauchbar sind, bei denen Fehlmeldungen jeder Art ausgeschlossen sind. Beruht die Arbeitsweise der Schaltung auf der Änderung der Nullpunktslage oder der Höhe der Verlagerungsspannung des Nullpunktes, so ist zu beachten, daß letztere auch bei Spannungsrückgang durch einen drei- oder zweipoligen Kurzschluß, beim ungleichmäßigen Schließen der Schaltstücke eines Drehstromleistungsschalters und bei besonderen Zustandsänderungen im Stromkreis auftreten kann. Bei solchen Ursachen, die also einen Erdschluß nur vortäuschen, darf die Erdschlußüberwachung nicht arbeiten, anderenfalls wird der Betrieb ohne eigentliche Ursache schwer gestört. Ist außerdem nicht durch eingehende Untersuchungen jedes solchen Störungsfalles einwandfrei festgestellt, daß eine Fehl Anzeige vorliegt, so müssen auch sämtliche Leitungen des Netzes durch die Leitungstrupps abgegangen und untersucht werden. Hieraus ist zu ersehen, welche Folgen das fehlerhafte Arbeiten eines Erdschlußanzeigers nach sich ziehen kann. Darum steht der Betrieb solchen besonderen Meßeinrichtungen zur Zeit jedenfalls im allgemeinen ablehnend gegenüber.

Meßwerke für Erdschlußanzeige, die auf die Leistungsschalter wirken und als Wahlschutz (Selektivschutz) arbeiten, werden nur selten benutzt. In geschlossenen und vermaschten Netzen müssen dazu Richtungsanzeigeglieder über Stromwandler zusätzlich verwendet werden, die sehr verwickelte Verhältnisse beherrschen müssen und daher nicht als in jedem Fall sicher arbeitend zu bezeichnen sind. Es kommen hierfür Vergleichs-Meßwerkschaltungen zur Verwendung, für die das auf S. 365 Gesagte in gleicher Weise gilt. Um ferner die Schalterauslösung bei leichten, vorübergehenden Erdschlüssen (Wischer) zu verhüten, müssen diese Meßeinrichtungen auch noch Zeitmeßwerke erhalten.

g) Die Erdschlußlöschung (Erdschlußkompensierung). Auf die Gefahren des Erdschlusses hat zuerst Petersen¹ hingewiesen. Zur Bekämpfung derselben dienen Erdschluß-Löschvorrichtungen und zwar:

die Erdschlußspule von Petersen (AEG),
die Dissonanzspule von BBC,
der Löschumspanner von SSW.

Der Zweck aller dieser Löschvorrichtungen ist der, den Erdschlußstrom möglichst vollständig zu unterdrücken, dadurch das Neuzünden des Lichtbogens zu verhindern und bei Dauererdschluß den Erdschlußstrom auf ein geringstes Maß zu begrenzen.

Grundsätzlich werden diese Aufgaben in folgender Weise erfüllt, wobei auf die Unterschiede der verschiedenen Ausführungen hingewiesen werden wird.

Von einer bei der Petersen- und BBC-Schaltung an den Nullpunkt der Stromerzeuger oder Umspanner gelegten besonderen Induktivität

¹ Petersen, W.: ETZ 1919 S. 5, 17.

(Erdschlußspule Abb. 368), bei der SSW-Schaltung durch einen besonderen Löschempinner mit Regeldrossel, der an den Sammelschienen liegt (Abb. 373 und 374), wird im Fall eines Erdschlusses ein nacheilender Blindstrom von annähernd derselben Größe aufgenommen wie der kapazitive Erdschlußstrom. Da dieser Blindstrom in der Schutzvorrichtung der Spannung um 90° nacheilt, der kapazitive Erdschlußstrom um

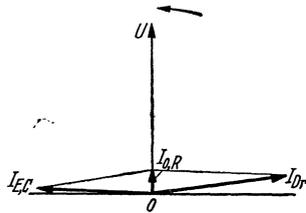


Abb. 367. Stromschaubild für die Erdschlußlöschung.

90° voreilt, kann eine fast restlose Aufhebung des Erdschlußstromes herbeigeführt werden. Abb. 367 zeigt das Vektorschaubild und läßt erkennen, wie sich der Wirkstrom $I_{0,R}$ (Reststromanteil) aus seinen Anteilen für den Erdschluß- und Spulenstrom zusammensetzt. $I_{0,R}$ beträgt bei Freileitungen etwa 10 bis 15 vH des Erdschlußstromes, bei Kabelnetzen wesentlich weniger. Bei nassem Wetter steigt der Wert

infolge des sinkenden Isolationszustandes. Eine solche Schutzvorrichtung saugt also den Erdschlußstrom gewissermaßen auf, bringt dadurch den aussetzenden Lichtbogen und infolgedessen das Entstehen von Erdschluß-Überspannungen sofort zum Verschwinden.

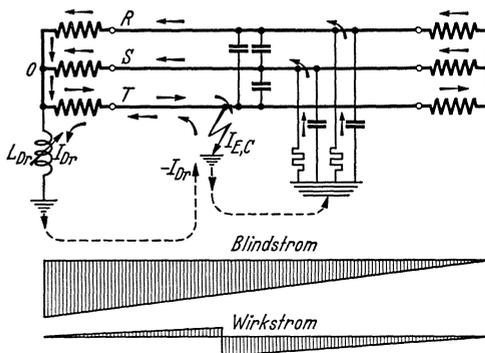


Abb. 368. Erdschluß der Netzphase T und Löschung durch Erdschlußspule; Verteilung des Erdschluß-Wirk- und Blindstromes.

des induktiven und kapazitiven Stromes infolge der ständig wechselnden Kapazitätsverhältnisse des Netzes nie vollständig erreicht werden können. Es verbleibt also der „Reststrom“ $I_{0,R}$, der infolge dieser Verstimmung in den Stromverhältnissen auch noch einen Blindanteil besitzt, der Voreilung aufweist, wenn der Spulenstrom zu klein und Nacheilung, wenn derselbe zu groß ist. Wird die Spannungs-kennlinie durch die Erdschlußverhältnisse verzerrt, so hat der Reststrom ferner Oberwellen; die durch diese bedingten Ströme erfaßt die Löschspule nicht. Sie gleicht nur die Grundwelle aus.

Dieser Reststrom fließt weiter durch den Erdschluß und muß so klein gehalten werden, daß eine Verminderung des Erdschlußstromes auf 5,

Nach den oben gemachten Angaben wird nun durch den induktiven Löschempinner der kapazitive Erdschlußstrom an der Erdschlußstelle aufgehoben (Abb. 368). Eine vollständige Beseitigung des Erdschlußstromes kann aber nach Abb. 367 nicht erreicht werden, weil der gesamte von der Löschempule aufgenommene Strom auch den durch die Wirkwiderstände im gesamten Erdschlußstromkreis bedingten Wirkanteil besitzt. Ferner wird praktisch die Übereinstimmung (Abgleichung)

höchstens 10 vH seiner vollen Größe eintritt, ihm dadurch jede Möglichkeit der Rückzündung genommen wird. Wie das mit Rücksicht auf die oft wechselnde Länge der Fernleitungen und der sich damit ändernden Größe des Erdschlußstromes bei den verschiedenen Schutzvorrichtungen erreicht wird, wird weiter unten angegeben werden. Jedenfalls geht schon hieraus hervor, daß stets eine sorgfältige Berechnung der Größe der Schutzvorrichtung notwendig ist, wobei neben der Kapazität der Leitungen auch die Kapazität der angeschlossenen Umspanner und Stromerzeuger berücksichtigt werden muß.

Die Stromverteilung im gelöschten Netz ist aus Abb. 368 zu sehen. Hier erreicht nur der Wirkstromanteil seinen größten Wert an der Erdschlußstelle, da dieser von der Löschung nicht beeinflusst wird,

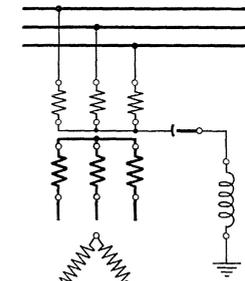


Abb. 369 a. Anschluß einer Erdschlußspule an einen Stern-Stern-Umspanner mit dritter Wicklung.

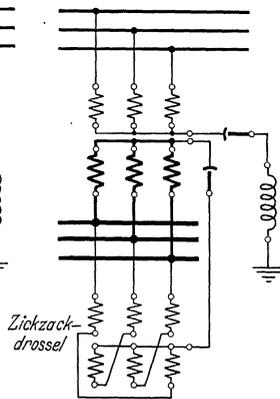


Abb. 369 b. Anschluß einer Erdschlußspule an einen Stern-Stern-Umspanner mit besonderer Nullpunktsschaltung im Niederspannungsnullpunkt.

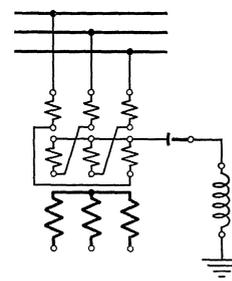


Abb. 369 c. Anschluß einer Erdschlußspule an einen Nullpunktumspanner (Zick-Zack-Drossel).

während der Blindstromanteil seinen größten Wert am Aufstellungsort der Löschspule aufweist.

Der von der Erdschlußspule aufzunehmende Strom ist:

$$I_{Dr} = \frac{U_p}{\omega \cdot L_{Dr}} = I_{E,C}, \quad (191)$$

worin L_{Dr} die Induktivität der Spule in Henry bezeichnet.

Die AEG- und BBC-Löschspule¹ wird in der Form eines Ölumspanners gebaut und ist betrieblich auch wie ein solcher zu behandeln.

Hinsichtlich des Anschlusses der Spule an die Umspanner muß in jedem Fall geprüft werden, ob die Wicklungsschaltung dieses zuläßt. Es kann nicht jede Wicklungsschaltung benutzt werden. Zunächst scheiden Mantelumspanner in Stern-Stern und drei zu einem Dreiphasensatz vereinigte Einphasenumspanner in Stern-Stern-Schaltung aus. Sie setzen dem Spulenstrom im Leerlauf den sehr hohen Leerlaufscheinwiderstand entgegen. Dagegen sind diese Umspanner nach Abb. 369 in Dreieck-

¹ Klein, R.: Theorie der Erdschlußkompensation langer Leitungen. Forsch. u. Techn. S. 215. Berlin: Julius Springer 1930. — Überspannungsschutz durch Erdschluß-Spulen. AEG-Druckschrift 1939.

Sternschaltung, in Stern-Sternschaltung mit Dreieckausgleichswicklung (dritte Wicklung), oder in Stern-Sternschaltung dann verwendbar, wenn bei Anschluß der Löserspule auf der Hochvoltseite der Niederspannungsnullpunkt mit dem Nullpunkt einer auf der Niederspannungsseite liegenden Zick-Zack-Drossel verbunden wird (Abb. 369b). Kern-

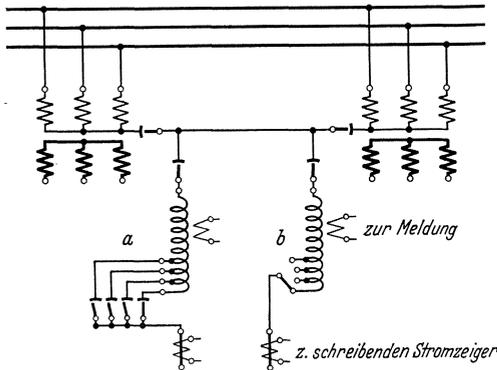


Abb. 370. Anschluß von Erdschlußlöschspulen an Kernumspanner mit Stern-Stern-Wicklung.

a = mit Spuleneinstellung durch Trennschalter,
b = mit Spuleneinstellung unter Last durch Lastschalter.

transformatorensind sowohl in Stern-Dreieck-, als auch in Stern-Sternschaltung geeignet (Abb. 370). Ist der Nullpunkt eines Umspanners nicht zugänglich, so kann er künstlich gebildet werden. Dazu eignen sich am besten Drosselspulen in Zickzack-schaltung (Abb. 369 c). Diese nehmen im ungestörten Betrieb als Leerleistung (höchstens) die Leerleistung eines Umspanners halber Scheinleistung auf. Bei einer Spulenleistung von beispielsweise 200 kVA belaufen sich die Leerverluste der zugehörigen Nullpunkt-Drosselspule auf etwa 1 kW, sind also sehr gering. Die Unterspaltung eines solchen Nullpunktsumspanners kann zum Anschluß des Eigenbedarfes herangezogen werden.

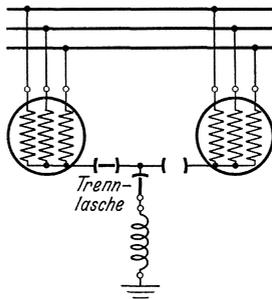


Abb. 371. Anschluß einer Erdschlußlöschspule an den Nullpunkt der Stromerzeuger-Ständerwicklungen.

Sind mehrere Umspanner vorhanden, oder genügt die Belastungsfähigkeit des Nullpunktes eines Umspanners für eine bestimmte Löserspulenleistung nicht, so sind die Nullpunkte über Trennschalter zu einer gemeinsamen Nullschiene zu führen, an die dann die Löserspule angeschlossen wird (Abb. 370).

Bei einer gegebenen Umspannerleistung ist die anzuschließende Spulenleistung durch die Höhe der im Fall der Belastung des Nullpunktes auftretenden zusätzlichen Wicklungs-, Eisen- und Wirbelstromverluste begrenzt. Das zulässige Maß dieser Verluste wird für Kernumspanner nicht überschritten, wenn die Umspannerleistung zur Spulenleistung:

bei Stern-Dreieck-Schaltung im Verhältnis 2:1,

bei Stern-Stern-Schaltung im Verhältnis 5:1

steht. Bei Mantelumspannern in Stern-Sternschaltung mit Dreieckausgleichswicklung muß die Leistung der dritten Wicklung mindestens der vollen Spulenleistung entsprechen.

Bei Benutzung des Maschinen-Nullpunktes ist zu beachten, daß

nur stets eine Maschine dazu herangezogen werden darf, weil bei der Verbindung der Nullpunkte mehrerer Maschinen Ausgleichströme auftreten. Es muß ferner durch entsprechende Ausbildung des Trennschalters dafür gesorgt werden, daß eine Zuschaltung mehrerer Maschinen auf die Nullschiene sicher verhütet wird. An Stelle von Trennschaltern wird daher zweckmäßig nur ein einziges Trennstück verwendet (Abb. 371). Die Maschinenleistung soll zur Spulenleistung etwa im Verhältnis 5:1 stehen.

Die Anpassung der Spulenleistung entsprechend den jeweiligen Netzverhältnissen, d. h. also die Spuleneinstellung auf den kleinsten möglichen Reststrom oder ihre sogenannte Verstimmung¹ gegenüber der vollen Ausgleichung des Erdschlußstromes erfolgt mit Hilfe von Anzapfungen, die von einer Trennschaltergruppe aus bedient werden. Das Umschalten darf niemals im Erdschlußfall erfolgen. Um einen solchen sofort zu erkennen, werden 2 parallelgeschaltete Warnlampen an die weiter unten erwähnte Spulen-Sekundärwicklung angeschlossen. Das Aufleuchten bedeutet Gefahr! Nicht schalten! Weiter ist vor jeder Umschaltung die Erdschlußspule von der Nullschiene abzutrennen, damit nicht ein während des Umschaltens auftretender Erdschluß die Bedienung und die Spule gefährdet. Soll unter Last umgeschaltet werden können, dann ist ein Last-Regelschalter (Abb. 370) wie bei Regelumspannern zu verwenden.

Für die Verstimmung, die von ganz besonderer Bedeutung für den Schutzwert der Erdschlußlöschung ist, ist folgendes zu beachten. Die infolge des Zusammenwirkens von Induktivität und Kapazität des Netzes entstehenden Schwingungen können durch das Ansprechen der Erdschlußspule zur Resonanz zwischen der Betriebsfrequenz und der Frequenz dieser Eigenschwingungen führen, wodurch die einzelnen Phasen der Leitungsanlage eine wesentlich höhere Spannung gegen Erde annehmen als die Phasenspannung. Auch die durch die Leiteranordnung hervorgerufene Spannungsungleichheit (Band II) ist zu berücksichtigen, die durch Verdrillung der Leiter nicht auszugleichen ist. Die Resonanz kann bis zum Umkippen der Spannung und damit zu einem unmöglichen Betriebszustand des Netzes führen. Das ist besonders bei der Größenbestimmung der Erdschlußspule mit Rücksicht darauf zu beachten, daß die Leitungslänge und damit die Größe der Erdschlußströme sich oft ändern. In dieser gewollten oder als zulässig erachteten Verstimmung der Erdschlußspule, die demnach aus rein elektrischen Gründen bestimmte Grenzen nicht überschreiten darf, liegt der Hauptunterschied zwischen der Petersenspule der AEG und der Dissonanzspule von BBC². Während die AEG die Erdschlußspule möglichst genau abstimmt und eine zulässige Höchstverstimmung von ± 10 bis ± 25 vH zuläßt,

¹ Gross, E., Dr.-Ing.: Über die erstmalige Bestimmung der günstigsten Einstellung von Erdschlußspulen. Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. 1937 Nr. 8 S. 165.

² Caspari, Dr.-Ing.: Schutz von Hochspannungsnetzen gegen Erdschlüsse durch Dissonanz-Löschspulen. BBC-Mitt. 1920 Nov./Dez. Roth, Dr.: Schutz gegen Erdschlüsse. BBC-Mitt. 1921 Juni/Juli; ETZ 1921.

benutzt BBC einen um etwa 5 bis 15 vH zu hohen Spulenstrom, um der Resonanzgefahr zu begegnen.

Ist mit einem erst in der Entwicklung begriffenen Netz oder mit häufigen Änderungen in den Leitungslängen durch gewolltes Zu- und Abschalten von Strecken zu rechnen, so wird mit Hilfe der erwähnten Anzapfungen der Spulenstrom geregelt. Trotzdem kann eine sehr große ungewollte Verstimmung und damit eine Beschränkung des Schutzwertes eintreten, wenn die Fehlableichung höher als ± 25 bis 30 vH ist, wenn also z. B. plötzlich Leitungsteile durch das Ansprechen von Selbstschaltern abgeschaltet werden, was oftmals gerade dann der Fall ist, wenn die Erdschlußspule besonders betriebsbereit sein muß, um Erdschlüsse zu bekämpfen, also bei Gewittern, heftigem Sturm, plötzlichem starken Rauhreifauftreten, Wolkenbruch u. dgl. Das bedingt demnach eine entsprechende Überwachung der Schutzvorrichtung. Zu diesem Zweck wird in die Erdverbindung ein Stromwandler mit einem dem höchsten Spulenstrom entsprechenden Übersetzungsverhältnis auf 5 A eingebaut. An diesen Stromwandler wird ein schreibender Strommesser angeschlossen, der somit eine dauernde Überwachung der Erdschlußverhältnisse gestattet und für Betriebsaufzeichnungen zur Verfügung steht. Außerdem erhält die Erdschlußspule eine Sekundärwicklung für 100 V für den Anschluß von Meldegeräten, die das Arbeiten der Spule jedesmal anzeigen.

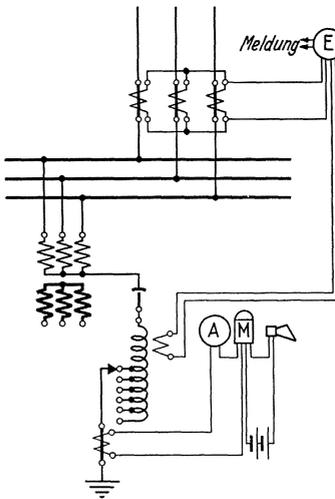


Abb. 372. AEG-Erdschlußmeßwerk.

schlußmeßwerk¹, das in der in Abb. 372 gezeichneten Schaltung unter Verwendung von Stromwandlern in Vergleichs-Meßschaltung in die Leitung eingebaut wird. Das Erdschlußmeßwerk muß besonders empfindlich sein, da es durch den Verluststrom (Wirkanteil des Reststromes) betätigt wird, der unter Umständen sehr klein sein kann (etwa 2 vH des Nennstromes). Der Blindanteil darf das Arbeiten des Meßwerkes nicht beeinträchtigen. Hierzu gilt das über den vorgetäuschten Erdschluß betrieblich auf S. 420 Gesagte sinngemäß. Das Arbeiten der Erdschlußmeßwerke auf die Auslösung des Leistungsschalters bedarf dabei ganz besonderer Prüfung, wobei noch folgendes zu beachten ist:

Bei Anschluß einer Erdschlußlöschspule bilden im erdschlußfreien Netz: Selbstinduktion der Löschspule, Erdkapazität, Selbstinduktion der Leitungen und Umspanner einen elektrischen Schwingungskreis.

¹ Zuckermann: Das Erdschlußrelais. AEG-Mitt. 1922 Nr. 5/6 S. 131.

Dieser spricht auf alle Spannungen an, die in seinem Innern auf die Reihenschaltung von Selbstinduktion und Kapazität wirken. Treten Unsymmetrien in der Verdrillung beispielsweise durch Abschalten eines Leitungsstückes auf, wird eine zusätzliche Spannung hervorgerufen, die einen inneren, durch Erde in den Sternpunkt fließenden Strom zur Folge hat. Dieser erzeugt an der Löserspule eine ihrem Wirk- und Blindwiderstand entsprechende Spannung, bewirkt somit eine Verlagerung bzw. Erhöhung der Sternpunktspannung und kann damit eine Fehlanzeige hervorrufen.

Wird während eines Doppelerdschlusses, der die Merkmale eines zwei-poligen Kurzschlusses aufweist, der gestörte Netzteil von Umspanner und Löserspule abgeschaltet, setzt der oben erläuterte Ausgleichvorgang ein.

Die als Folge dieses Schaltvorganges auftretenden Ausgleichschwingungen haben Frequenzen, die wesentlich über der Nenn-Periodenzahl des Netzes liegen.

Die magnetische Energie der Löserspule wird hierbei in elektrische Energie in den noch zugeschalteten Erdkapazitäten umgesetzt. Sind Überspannungsableiter im Nullpunkt angeschlossen, so haben Rechnung und Versuche ergeben, daß diese mit Rücksicht auf Höhe, Dauer und Energie der Schaltüberspannungen für $U_{AbI} \cong 1,4 U_p$ ausulegen sind.

Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß die Erdschlußspule die Erdungsdrosselspulen ersetzt, weil der große Querschnitt der Wicklung einen genügenden Ausgleich von statischen Ladungen gegen Erde gestattet.

Über die Größenbemessung und damit über die Dauer der Einschaltung einer Erdschlußspule beim Auftreten fortgesetzt aussetzender Erdschlüsse oder zur betriebsmäßigen Unterdrückung eines Dauererdschlusses wird gleichzeitig mit den Erörterungen über die Zahl der Erdschlußspulen in großen Netzen besonders gesprochen werden.

Der Löschumspanner der SSW. Der Grundgedanke dieser Ausführung liegt in der Polerdung über einen in Stern-Dreieck geschalteten besonderen Umspanner. Die Oberspannungswicklungen, die an die zu schützenden Sammelschienen angeschlossen werden, sind nach Stern geschaltet, und ihr Nullpunkt ist tunlichst widerstandslos geerdet. Die Niederspannungswicklungen sind im offenen Dreieck geschaltet. Dieser Dreieckkreis wird durch die mit Anzapfungen versehene Wick-

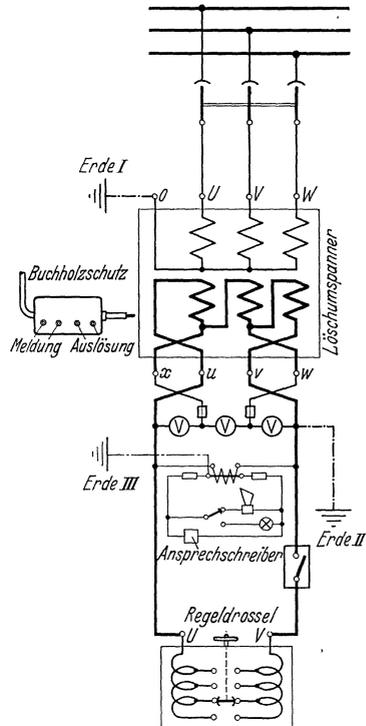


Abb. 373. Schaltung des regelbaren Löschumspanners der SSW.

lung einer besonderen Regeldrossel geschlossen. Die Veränderung der Windungszahl und damit der Abstimmung erfolgt durch einen Regelschalter. Abb. 373 zeigt die Schaltung und Abb. 374 die Arbeitsweise.

Im ungestörten Betrieb stehen die drei Schenkel der Unterspannungsseite unter einer Spannung, die der Sternspannung des Netzes entspricht. Bei Erdschluß einer Phase tritt die bereits behandelte Spannungsverlagerung ein. Die Phasenverschiebung ändert sich hierbei von 120° auf 60° . Die Enden der Dreieckwicklung und dann die Regeldrossel nehmen nunmehr ebenfalls Spannung an. Durch die dadurch hervorgerufene Belastung der Löschumspanner-Oberspannungsseite führt diese einen induktiven Strom, der in den drei Phasen addiert je nach der Einstellung der Drossel die Größe des kapazitiven Erdschlußstromes erreichen kann. Es wird also die Größe des Löschstromes durch die Einstellung der Regeldrossel bestimmt. Da diese Schaltungen auch hier nur stromlos vorgenommen werden dürfen, muß der Regelkreis vorher durch einen Leistungsschalter unterbrochen werden.

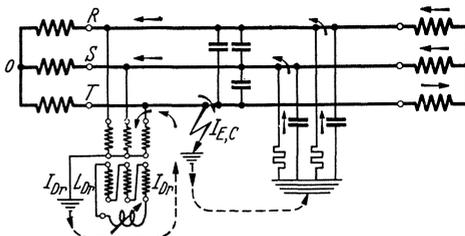


Abb. 374. Erdschluß der Netzphase *T* und Löschung durch Löschumspanner *SSW*.

An die Unterspannungsseite des Löschumspanners werden, wie aus dem Schaltbild Abb. 373 zu ersehen ist, drei Spannungsmesser angeschlossen, die eine dauernde Isolationsprüfung des Netzes ermöglichen. Diese Meßgeräte werden mit weißer Skalen-scheibe ausgeführt und erhalten nur je einen Strich bei der Stellung für den ungestörten

Betrieb und bei Stellung im Erdschluß. Dabei können die Ausschläge der Spannungsmesser bei Erdschluß vom Sollwert etwas abweichen, da die Meßgenauigkeit je nach der Einstellung der Regeldrossel etwas schwankt. Das hat jedoch praktisch keine Bedeutung, weil es bei der Erdschlußprüfung lediglich darauf ankommt zu erkennen, in welcher Phase der Erdschluß liegt.

Ferner ist eine Lautmeldung in Form einer Hupe vorgesehen, um die Bedienung auf das Vorhandensein eines Erdschlusses aufmerksam zu machen. Da die Regeldrossel nur während eines Erdschlusses unter Spannung steht, ertönt auch die Hupe nur so lange als ein Erdschluß besteht. Um bei langdauernden Erdschlüssen die Hupe abstellen zu können, kann ein Umschalter vorgesehen werden, der an Stelle der Hupe eine Melde-lampe einschaltet, die dann so lange leuchtet, bis der Erdschluß verschwunden ist. Der Schalter ist daraufhin stets wieder umzustellen.

Zur Überprüfung der Häufigkeit des Ansprechens ist ein schreibender Spannungsmesser zu empfehlen.

Der Hauptunterschied gegenüber der Nullpunktserdung besteht darin, daß der Betriebsumspanner oder der Stromerzeuger nicht zwischen Leitung und Erde zwischen-geschaltet ist. Umschaltungen beim Wechsel der Maschinen oder

der Betriebsumspanner wie bei der Nullpunktdrossel sind beim Löschemspanner nicht notwendig.

Auch die SSW bauen ein Erdschlußmeßwerk, das den gleichen Aufgaben dient wie sie auf S. 426 beschrieben worden sind¹.

Der Eigenverbrauch des Löschemspanners, der nach Schließen des Unterspannungskreises über die Regeldrossel auftritt, beträgt etwa $\frac{1}{2} \sqrt{H}$ des Vollaststromes der Regeldrossel d. h. des bei Erdschluß durch sie hindurchgehenden Stromes. Derselbe ist beim Vergleich der verschiedenen Schutzvorrichtungen natürlich ebenfalls zu berücksichtigen, fällt aber kaum ins Gewicht, wenn durch den Einbau dieser Löschemvorrichtung die sonst notwendigen Erdungswiderstände oder Erdungsdrosseln fortgelassen werden.

Betriebseinzelheiten. Die Verteilung der Löschemspulen auf ein ausgedehntes Netz hat einmal ihrer Leistung nach so zu erfolgen, daß der im ungünstigsten Fall auftretende Erdschlußstrom bis auf den Reststrom von etwa 5 A aufgehoben wird. In vermaschten Netzen müssen dazu besondere Rechnungen aufgestellt werden, für die als Anhalt die Kurzschlußstromberechnungen dienen können². Es soll dabei eine möglichst weitgehende Unterteilung der Spulenleistungen vorgenommen werden, um beim Auftrennen der Netze in den einzelnen Netzteilen Löschemspulen mit annähernd richtiger Einstellung zur Verfügung zu haben. Die Aufstellung der Spulen andererseits soll in solchen Werken erfolgen, die die Hauptleitungsschaltungen durchzuführen haben, damit bei Umschaltungen auch die Spulen richtig eingestellt werden.

Für die Spulengröße ist weiter die Dauer ihrer Einschaltung bestimmend. In Hochspannungsnetzen wählt man die Belastungsdauer zu etwa 2 bis 3 Stunden, um die Möglichkeit zu erhalten, die Erdschlußstelle ohne Betriebsunterbrechung herauszuschalten oder aufzufinden und zu beseitigen. In Mittelspannungsnetzen mit kleineren Erdschlußströmen wird zumeist die Dauerbelastung der Größenbemessung der Spule zugrunde gelegt. Soll über gewisse Zeit im Dauererdschluß gefahren werden können, so muß zur Herabsetzung der Spannungsgefahr an der Erdschlußstelle der Reststrom so klein wie möglich gehalten werden.

Zur Überwachung der jeweils richtigen Einstellung der einzelnen Spulen werden Hilfsmittel angewendet, die in der Darstellung des geschützten Netzes und der bei allen Leitungsumschaltungen zu erwartenden Erdschlußströmen bestehen. Wird der Netzzustand geändert, wird an Hand solcher Erdschlußstrompegel³ die Spuleneinstellung ebenfalls geändert.

Auch in Kabelnetzen finden die Erdschlußlöschemspulen Verwen-

¹ Methoden und Mittel zum Erfassen und Beseitigen von Erdschlüssen. SSW-Sonderdruck AZR 49615/6.

² Mayr, O.: Einphasiger Erdschluß und Doppelerdschluß in vermaschten Leitungsnetzen. Arch. Elektrotechn. Bd. 17 1926. Piloty, H.: Überwachung des Kompensationszustandes in Netzen mit kompensiertem Erdschlußstrom. Forsch. u. Techn. S. 228. Berlin: Julius Springer 1930.

³ Feistner: Überwachung der Erdschlußkompensierung im 100-kV-Netz der A.G. Sächsische Werke. Elektr.-Wirtsch. 1932 Nr. 18/19.

dung hier weniger um Überspannungen zu vermeiden und die Lichtbogenlöschung zu erreichen, als vielmehr um größere Schäden an der Erdschlußstelle durch die Stromwärmeentwicklung zu verhüten und dadurch den Umfang der Betriebsstörung zu verringern. Da Kabel wesentlich höhere Erdkapazitäten und damit höhere Erdschlußströme aufweisen als Freileitungen, können die Wirkungen von Erdschlüssen sehr viel gefährlicherer Art sein. Besonders ist weiter darauf hinzuweisen, daß auch die Bauform der Kabel auf den Erdschlußstrom von Einfluß ist.

Bei Mehrleiterkabeln kann der Erdschluß sehr bald zu einem Kurzschluß führen. Auf das im Band II hierzu Gesagte ist zu verweisen. Die Aufrechterhaltung des Betriebes im Erdschlußfall auch bei Kabeln ist mindestens gleichbedeutend, wenn nicht noch stärker zu betonen als bei Freileitungen. Aus diesen Gründen sind daher Erdschlußlöschspulen auch in Kabelnetzen unbedingt zu benutzen.

h) Die Spannungsresonanz. Die letzte Ursache für Überspannungen liegt in der Entstehung von erzwungenen Schwingungen, die zur Resonanz führen können. Sie ist namentlich bei langen Hochspannungskabelstrecken und bei Freileitungsanlagen dann zu fürchten, wenn bei unverhältnismäßig geringer Maschinenleistung infolge eines weit ausgedehnten Leitungsnetzes die Betriebsspannung sehr hoch gewählt wird, und L und C dadurch sehr hohe Werte aufweisen. Auch bei Maschinen mit ausgeprägten Oberwellen in der Spannungskenlinie besteht diese Gefahr.

Jeder Wechselstromkreis besitzt Wirkwiderstand R , Selbstinduktion L und Kapazität C . Bei Reihenschaltung von R , L und C kann die Spannungsresonanz eintreten. Dieses ist der Fall bei einem an der Stromabnahmestelle offenen Kabel, einer Freileitung unter denselben Verhältnissen und dann, wenn eine belastete Leitung — gleichgültig ob Kabel oder Freileitung — mit induktiven Stromverbrauchern z. B. Umspannern oder Motoren plötzlich in nur einer Phase unterbrochen wird.

Ist $U_C = U_L$, so heben sich die Spannungen an der Induktivität und an der Kapazität auf. Die Stromkreisspannung beträgt dann $U = I \cdot R$; der Stromkreis verhält sich so, als ob nur Ohmscher Widerstand R vorhanden sei. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ist Null. Die im Kondensator aufgespeicherte elektrische Energie ist gleich der magnetischen Energie der Induktivität. Steht also die Kapazität C des gesamten Stromkreises zu der Selbstinduktion in einem bestimmten Verhältnisse, so tritt diese Resonanz ein, und zwar wenn:

$$I \cdot \omega \cdot L = \frac{I}{\omega \cdot C}, \quad \text{also} \quad L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C}, \quad (192)$$

oder der Wechselstrom die Frequenz:

$$f_{Re} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ Per/s} \quad (193)$$

hat. Auf S. 85 wurde bereits über die Spannungsresonanz gesprochen. Die dann am Kondensator auftretende Spannung ist:

$$U_{Re} = \omega \cdot L \cdot I_{Re} = \omega \cdot L \cdot \frac{U}{R} \text{ kV} \quad (194)$$

oder für die Leitung bzw. das Kabel:

$$U_{Re} = \frac{U}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ oder die Maschinenspannung } U = U_{Re} \cdot R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (195)$$

Hieraus ist zu ersehen, daß wenn $\sqrt{\frac{L}{C}}$ groß gegen R ist, selbst bei kleiner Betriebsspannung eine Überspannung entsteht, die der Isolation des Stromkreises sehr gefährlich werden kann.

Da die Ableitung der Gleichungen über die Spannungsresonanz in allen Lehrbüchern der Wechselstromtechnik zu finden ist, soll hier davon Abstand genommen werden, auf weitere rechnerische Untersuchungen einzugehen.

Überspannungen durch erzwungene Schwingungen können durch keine der behandelten Überspannungsschutzvorrichtungen abgeleitet werden. Bei der Entwurfsbearbeitung großer Kraftwerke mit Fernleitungen muß daher von vornherein untersucht werden, ob Resonanzgefahr besteht. Denn wird dieselbe nach Inbetriebnahme der Anlage festgestellt, so kann nur durch eine vollständige Änderung Abhilfe geschaffen werden.

17. Die Betriebsüberwachungsgeräte.

a) **Die Meßgeräte.** Zur ständigen Überwachung der Betriebsgrößen (Strom, Spannung, Leistung, Frequenz, Leistungsfaktor) und der Betriebsvorgänge zum Schalten, Regeln und für die Lastverteilung sind Meßgeräte erforderlich, die in der Bedienungsanlage zusammengefaßt werden. Ihr innerer Aufbau und ihre Arbeitsweise sind seit vielen Jahren für diese technischen Zwecke so weit durchgebildet, daß sie heute bei der Entwurfsbearbeitung ohne weiteres aus den Preislisten der Hersteller ausgewählt werden können. Meßgenauigkeit, Empfindlichkeit, Zeigereinstellung, Temperatureinfluß werden für diese Art von Meßgeräten kaum noch einer besonderen Beurteilung unterworfen, zumal die Regeln für Meßgeräte VDE 0410/1938 eingehalten werden müssen. Lediglich der Eigenverbrauch¹ spielt eine besondere Rolle, weil dieser für die Größenbestimmung der Nebenwiderstände bei Gleichstrom, der Meßwandler bei Wechselstrom und der Bemessung der Meßleiterquerschnitte je nach der Entfernung zwischen Meßgerät und Meßstelle bestimmend ist.

Es kann daher unterbleiben, im einzelnen auf die innere Bauart der Meßgeräte einzugehen². Wesentlich ist aber die äußere Bauform in runder, quadratischer oder rechteckiger Gestalt. Für die Wahl nach dieser Richtung sind ausschlaggebend einmal der Geschmack, dann der Platzbedarf und eine Kennzeichnung besonderer Meßgeräte, die in erster Linie für den Betrieb von Bedeutung sind. Um der Bedienungstafel ein ruhiges Aussehen zu geben, werden die Meßgeräte heute stets in die

¹ Schnettker, Dr. Ing. W.: Eigenverbrauch elektrischer Meßgeräte. AEG-Mitt. 1937 Heft 11 S. 367.

² Herrmann: Die elektrischen Meßinstrumente. Sammlung Göschen 1937 Nr. 477.

Aufbautafeln eingelassen, so daß auf der Vorderseite nur die Skala mit einer Frontumkleidung erscheint. Die verschiedenen Abbildungen im 18. Kapitel lassen hierzu alles weitere erkennen. Sämtliche Leitungsanschlüsse liegen hinter der Tafel.

Weiter beachtlich ist die Einteilung der Skala nach dem Meßsystem der Geräte. Hierzu wird weiter unten noch Einiges gesagt werden. Die Nenngrößen sollen auf den Skalen durch einen roten Strich gekennzeichnet sein.

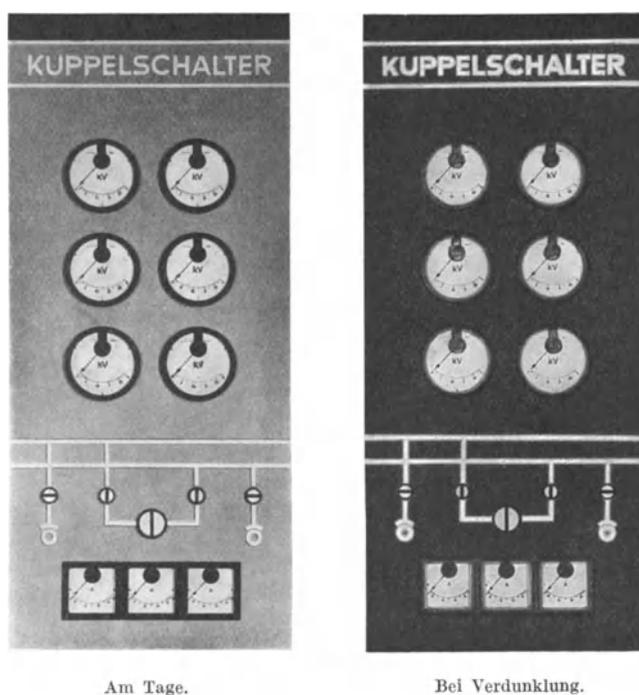


Abb. 375. Schalttafel mit Leuchtskalen-Meßgeräten.

Ganz allgemein ist hinsichtlich der Zahl der für einen Stromkreis zu wählenden Meßgeräte darauf aufmerksam zu machen, daß hier Zurückhaltung geübt werden sollte, soweit die unmittelbare Betriebsbeobachtung in Frage kommt, denn eine große Zahl von Meßgeräten erschwert die Übersicht und kann oft Unsicherheit bei Betriebsvorgängen, sowie schnell auszuführenden Schaltungen hervorrufen. Darum sollte als Grundsatz gelten, nur die unbedingt notwendigen Meßgeräte auf der Bedienungstafel zu vereinigen, alle anderen Meßgeräte aber an besonderer Stelle zusammenfassen.

Für die Messung der Leistung wählt man gerne die Meßgeräte in größerer Abmessung, um sie dadurch besonders hervorzuheben und die Beobachtung zu erleichtern.

Durch eingebaute Glühlampen beleuchtete Skalen¹ werden nur noch selten benutzt. In den Warten der Kraft- und Umspannwerke sind sie entbehrlich, da hier stets eine Notbeleuchtung vorhanden sein soll, die bei allseitiger Störung die Schaltwand so weit mit Licht versieht, daß alle ersten Schalthandlungen mit voller Sicherheit vorgenommen werden können. Das genügt zumeist auch in luftschutztechnischer Hinsicht. Neuerdings werden aber auch Quecksilber-Dampflampen für die Schalttafelbeleuchtung angewendet, die keine zusätzliche Erwärmung und damit keine Beeinflussung der meßtechnischen Eigenschaften hervorrufen (Abb. 375).

Für die Stromerzeuger bei Gleichstrom sind nur Spannungs- und Strommesser erforderlich. Aus den Schaltbildern ist der Einbau zu ersehen. Bei Spannungen über 250 V werden Vor- bzw. Parallelwiderstände benutzt. Betrieblich nicht unbedingt erforderlich sind Leistungsmesser, da bei Gleichstrom aus der Höhe des Stromes ohne weiteres auf die Belastung geschlossen werden kann. Die Spannungsmesser werden zumeist umschaltbar auf die einzelnen Stromkreise eingerichtet, so daß hierdurch an Meßgeräten zu sparen ist.

Die erforderlichen Meßgeräte für Batteriestromkreise sind ebenfalls in den Schaltbildern angegeben. Für Ladung und Entladung wird der Strommesser mit der Nullstellung des Zeigers in der Mitte der Skala ausgeführt.

Für die Gleichstrom-Anschlußanlagen werden wiederum nur Spannungs- und Strommesser gewählt. Bei kleineren Anlagen entfallen auch die Strommesser noch, für Motorenstromkreise dagegen sind letztere notwendig, um die Belastung jederzeit überprüfen zu können.

Für die Stromerzeuger bei Drehstrom sind in jedem Stromkreis erforderlich:

- 1 Spannungsmesser,
- 1 oder bei reichlicher Ausstattung 3 Strommesser,
- 1 Leistungsmesser für ungleich belastete Phasen für die Wirkleistung,
- 1 Leistungsfaktormesser,

für die Erregung:

- 1 Strommesser,
- 1 Spannungsmesser (kann fortbleiben),

für das Parallelschalten:

die bereits behandelten Meßgeräte,

für die abgehenden Fernleitungen je nach ihrer Bedeutung:

je 1 Strommesser in jeder Phase,

für den Verbundbetrieb im Maschinenstromkreis noch:

1 Leistungsmesser für die Blindleistung,
gegebenenfalls als Hauptmeßgeräte ferner Summenleistungsmesser,

Spannungs- und Frequenzmesser,

für die Umspannwerke wiederum entsprechend ihrer Bedeutung und ihrer einseitigen oder zweiseitigen Speisung:

- 1 Spannungsmesser ober- und unterspannungsseitig,
- je 1 Strommesser in jeder Phase ober- und unterspannungsseitig.

¹ Brauer, W.: Schalttafelmeßgeräte mit Leuchtskalen. AEG-Mitt. 1938 Heft 5 S. 305.

Die billigsten und trotzdem die stärkst beanspruchbaren Meßgeräte sind die Weicheisen- (Dreheisen-) Meßgeräte, die für Gleich- und Wechselstrom gleich gut geeignet sind. Ihr einziger wesentlicher Unterschied ist die Meßskala, die im Anfangsbereich zusammengedrängt ist (Abb. 376). Für Spannungsmessungen ist das ohne Bedeutung, für Strommessungen bei geringer Belastung kann es betrieblich un bequem sein, weil die Meßwerte nicht schnell und genau genug ablesbar sind. Bei großem Meßbereich wird daher der Dreheisenstrommesser nicht gerne genommen.

Nur für Gleichstrom (Spannung und Strom) geeignet sind die Drehspulmeßgeräte. Sie gestatten vollständig gleichmäßige Skaleneinteilung (Abb. 377). Der Nullpunkt des Meßwerkes kann auch in der Mitte der Skala angeordnet werden, so daß sie für die Batteriemessung brauchbar sind.

Für die Leistungsmessung sowohl bei Gleichstrom als auch bei Wechselstrom werden ferrodynamische Meßgeräte benutzt. Auch

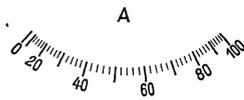


Abb. 376. Weicheisen- (Dreheisen-) Meßgerät mit am Anfang zusammengedrängter Skala.

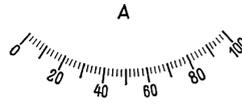


Abb. 377. Drehspulmeßgerät mit gleichmäßig verteilter Skala.

sie gestatten eine gleichmäßige Skaleneinteilung. Bei Blindleistungsmessern muß von einer bestimmten Frequenz ausgegangen werden, da die meßtechnisch notwendigen Widerstände und Drosselpulen frequenzabhängig sind.

Zum Messen des Leistungsfaktors $\cos \varphi$ induktiv oder kapazitiv werden elektrodynamische Meßgeräte (eisengeschlossen) verwendet.

Für die Frequenzmessung dienen Zungen- und Zeigermeßwerke; den ersteren wird betrieblich der Vorzug gegeben, da sie eine klare und sichere Ablesung gestatten.

Für die fortlaufende Betriebsüberwachung, für wirtschaftliche und statistische Zwecke, für die Beurteilung oder Aufklärung von Störungen werden neuerdings in großem Umfang auch schreibende Meßgeräte für Spannung, Leistung, Leistungsfaktor und Frequenz benutzt. Ihren Platz sollten sie, wie bereits gesagt, nur ausnahmsweise auf der Hauptbedienungsstafel finden. Die technische Durchbildung auch dieser Meßgeräte genügt heute allen Anforderungen in jeder Weise, sofern beste Ausführungen gewählt werden. Auf eines ist aber aufmerksam zu machen. Das Schreiben der Meßgrößen muß sauber und genau erfolgen, der Schreib- oder Tintenstift daher allerbesten Durchbildung sein. Auch das Papier muß besonders gefertigt, haltbar, fest und dauerhaft gewählt werden. Ferner sind solche schreibenden Geräte vorzuziehen, die auf geradlinigem rechtwinkligem Achsenkreuz aufzeichnen. Die Papiergeschwindigkeit ist in bestimmten Stufen ausführbar. Sie richtet sich

nach dem Meßzweck, soll nicht zu klein genommen werden, um klare Aufzeichnungen auch in ihren Einzelheiten erkennbar zu erhalten. Nur für besondere Zwecke wird die Papiergeschwindigkeit sehr groß eingestellt, wobei zu beachten ist, daß Aufzeichnungen auf längeren Papierstreifen recht umständlich auswertbar sind. Der Antrieb erfolgt durch eine Uhr oder elektrisch. Die Uhr erhält ein 8tägliches Laufwerk mit Hand- oder elektrischem Aufzug. Sehr wesentlich ist dabei, daß die schreibenden Meßgeräte zusammengehöriger Werte innerhalb eines Meßumfanges z. B. eines Kraftwerkes gleiche Papiergeschwindigkeit und gleiche Aufzeichnung, also gleiche Achsenkreuzteilung, sowie übereinstimmende Maßstäbe für die Aufzeichnungen erhalten, damit die Auswertung leicht, fehlerfrei und schnell vorgenommen werden kann (Synchronuhrenverbindung).

Nur der Vollständigkeit wegen ist zu erwähnen, daß sich auch die Mehrfachschreiber z. B. für Wirk- und Blindlastverlauf auf einem Schreibstreifen immer mehr einführen. In der Hauptsache sind diese Meßgeräte dort am Platz, wo aus tariflichen Gründen die Wirk- und Blindlast besonders zu beachten ist.

Für die Aufzeichnung von Störungsvorgängen, die in sehr kurzer Zeit verlaufen also z. B. Kurzschluß und Erdschluß genügen die einfachen schreibenden Meßgeräte nicht. Es sind dafür besondere Störungsschreiber¹ durchgebildet, die ebenfalls in steigendem Maß in den Haupt-Kraft- und Umspannwerken Eingang finden. Diese Meßgeräte arbeiten in der Weise, daß bei einer Störung der Papiervorschub selbsttätig von etwa 20 mm/h auf vorübergehend 36000 mm/h umschaltet wird. Das erfolgt durch ein Anregegesetzwerk, das die Störung erfaßt. Die Dauer des Schnellablaufes kann zeitlich begrenzt werden, auch nach bestimmten Zeiten erneut erfolgen. Das richtet sich nach den Störungsarten, die erfaßt werden sollen.

Diese Störungsschreiber werden für Spannungs-, Strom- und Frequenzmessungen ausgeführt. Am häufigsten wird für die Aufklärung von Störungen der Verlauf der Netzspannung von Bedeutung sein. Hierzu werden die drei Meßwerke des Störungsschreibers an die Phasenspannungen gelegt. Für die Anregung ist zwischen Kurzschluß- und Erdschlußanregung zu unterscheiden. Liegt das Anregegesetzwerk nur an den verketteten Spannungen, so spricht es nur auf solche Fehler an, bei denen sich diese Spannungen ändern, das sind hauptsächlich Kurzschluß und Doppelerdschluß. Um auch Erdschlüsse zu erfassen, muß noch die Erdschlußanregung zusätzlich benutzt werden, deren Meßwerk an die Leitererdspannungen (Phasenspannungen) gelegt wird. Abb. 378 zeigt ein einfaches Schaltbild. Vor der Beschaffung dieser Störungsschreiber ist eine Klarstellung mit dem Hersteller empfehlenswert, da noch andere Ausführungsformen und Schaltungen entwickelt sind, die zu behandeln hier kein Raum zur Verfügung steht.

Aus den bisherigen Erfahrungen mit diesen Meßgeräten, die die

¹ Ortloff, Dr. Ing. W.: Welche Störungsschreiberschaltung soll der Betriebsleiter wählen? AEG-Mitt. 1937 Heft 11 S. 390. Grünewald, H., Dr.-Ing.: Aufklärung von Betriebsvorfällen in Hochspannungsnetzen. ETZ 1937 Heft 40 S. 1077.

Oszillographen ersetzen können, zeigt sich, daß die größeren Kraftwerke die Phasen- und Leitererdspannungen, sowie den Frequenzverlauf aufzeichnen sollten, während in den Hauptschalt- und Umspannwerken die Aufzeichnung von Spannungsstörungen zumeist genügt.

Abb. 379 zeigt einen Ausschnitt aus dem Schreibstreifen eines Dreiphasen-Störungsschreibers, auf dem der Spannungsverlauf eine Störung in einem 30-kV-Netz aufgezeichnet ist. Um 3.30 Uhr trat ein dreiphasiger Kurzschluß auf. Die Spannung sank erst nach ungefähr 0,8 s ganz auf Null. Darauf folgten elf kleinere Spannungsschwankungen um durchschnittlich 6,8 kV im Laufe der nächsten 3 s bis zur Abschaltung eines Unterwerkes. Die drei verketteten Spannungen kamen dann allmählich

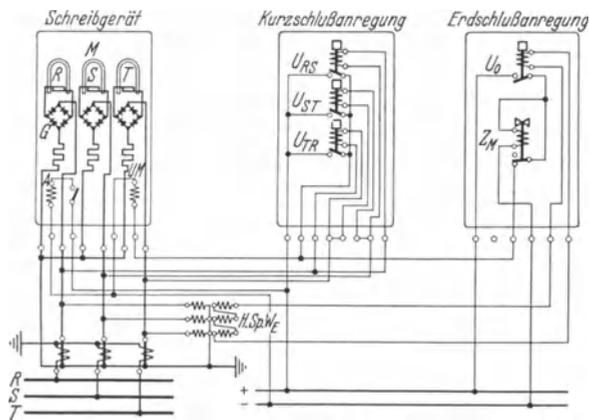


Abb. 378. Grundschaltbild eines Dreiphasen-Störungsschreibers für Kurzschluß- und Erdschlußüberwachung.

A elektrischer Aufzug des Uhrwerkes, G Trockengleichrichter, H.Sp.W_Z Hilfs-Erdungsspannungswandler, M Meßwerke, UM Umschaltmagnet für den Schnellablauf, Z_M Zeitmeßwerk.

wieder, so daß nach 9,2 s vom Beginn 21,8 kV erreicht waren. Zu diesem Zeitpunkt löste ein großer Umspanner aus, der bisher noch den Kurzschluß mitgespeist hatte, so daß die Spannung nach weiteren 6 s wieder bis auf 3 kV absank. Nach 24 s vom Beginn des Kurzschlusses ab gerechnet wurde durch die vorhandenen Schutzmeßwerke ein zweiter entfernterer Umspanner, von dem die kranke Netzstelle noch Strom erhielt, abgeschaltet; die Spannung geht nun ganz auf Null. Nach einer Viertelstunde konnte der Fehler beseitigt werden, so daß die volle Netzspannung um 3.46 Uhr wieder vorhanden war.

Aus den oszillogrammähnlichen Aufzeichnungen des Störungsschreibers ergeben sich also die Zeit, der getroffene Leiter und, sofern mehrere Störungsschreiber an verschiedenen Netzpunkten vorhanden sind, angenähert auch der Ort der Störung. Aus dem Spannungsverlauf sieht man weiterhin, ob es sich um einen Kurzschluß, Erdschluß oder Erdkurzschluß handelt, und ob die eingebauten Erdschluß-Löscheinrichtungen richtig bemessen sind. Aus der Dauer der Störung ergibt sich, ob vorhandene Schutzmeßwerke rechtzeitig angesprochen haben.

Sind die Netzwidestände bekannt, so können auch die Kurzschlußströme berechnet werden, so daß ersichtlich ist, ob z. B. die Leistung der Leistungsschalter ausreicht.

In Verbindung mit dem Störungsschreiber werden auch Zeitschreiber benutzt, die die Zeitdauer einer Störung, das Ansprechen der Überstrommeßwerke der Leistungsschalter in den einzelnen Phasen und ähnliche Vorgänge aufzeichnen. Auch diese Meßwerke haben sich gut bewährt und dienen mit zur Überprüfung der Betriebsvorgänge, der Schaltzeiten der Meßwerke u. dgl. Ein aufschlußreicher Ausschnitt aus einer solchen Aufzeichnung ist in Abb. 380 wiedergegeben.

Der Vollständigkeit wegen ist ferner auf die Meßgeräte für Maschinentemperaturen, für Frisch- und Abluft der Maschinenbelüftung, für die einzelnen Kesselanlage teile u. dgl. hinzuweisen, über die im 26. Kapitel des Bandes III/1 ausführlich gesprochen worden ist.

b) Die Meßwandler. Elektrische Leistungen, Ströme und Spannungen werden bei Spannungen über 250 V nicht mehr unmittelbar gemessen oder gezählt. In allen Fällen werden Strom- und Spannungswandler zwischengeschaltet, welche die Betriebsgrößen auf die für die Messung geeigneten kleinen Werte herabsetzen und damit gleichzeitig die Meßgeräte in ihrer räumlichen Anordnung unabhängig von den Meßstellen machen.

Ihre technische Durchbildung ist so mannigfaltig, daß auf sie im einzelnen nicht eingegangen werden kann. Hinsichtlich ihres Aufbaues ist zu unterscheiden zwischen der Form mit und ohne Öl. Den Ölwandlern haftet der gleiche betriebliche Nachteil an wie den Ölschaltern und Ölumspannern an sich. Die Trockenwandler werden heute in erster Linie verwendet.

Die VDE-Bestimmungen für Meßwandler sind in den Regeln für Wandler REW 1932 VDE 0414/1932 festgelegt. Sie geben sehr genaue Vorschriften über Meßgenauigkeit der verschiedenen Klassen, über

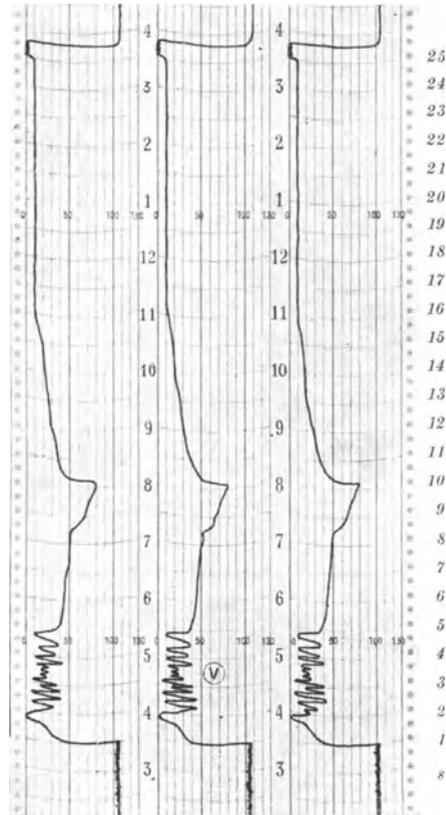


Abb. 379. Schreibstreifen eines Dreiphasen-Störungsschreibers (Netzkurzschlußaufzeichnung) mit Schnellablauf.

Übersetzungsverhältnisse, Belastbarkeit, Kurzschlußfestigkeit und Bauarteinteilung nach Kennbuchstaben.

Für die Auswahl der Wandler ist besonders bestimmend, ob sie nur für technische Meßzwecke oder für Verrechnungszwecke¹ benutzt werden sollen. Da eine amtliche Eichung der Wandler und Zähler für die Stromverrechnung noch nicht vorgeschrieben ist, wird in Deutschland für die Wandler ein mittelbares Verfahren in Form der Beglaubigung des Wandlerrückbaues durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt angewendet.

Die Hersteller bieten auf Grund ihrer Erfahrungen und der bei ihnen üblichen Sorgfalt wohl Gewähr dafür, daß die angegebenen Kennwerte auch wirklich eingehalten werden. Dennoch haben Stromerzeuger und Stromverbraucher ein Interesse daran, daß ihnen eine unparteiische Stelle die Richtigkeit der auf dem Leistungsschild gemachten Angaben und ihre hinlängliche Unveränderlichkeit bestätigt.

Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt hat daher in Anlehnung an die Beglaubigung der Zählersysteme die Prüfordnung für beglaubigungsfähige Strom- und Spannungswandler geschaffen. Solche Wandler werden in Klasse 0,5 mit der Mindestleistung 15 VA für Stromwandler und 30 VA für Spannungswandler hergestellt.

Nach den Bestimmungen darf eine Wandlerausführung vom Hersteller als beglaubigungsfähig bezeichnet werden, wenn mehrere Wandler einer Typenreihe durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt geprüft und in Übereinstimmung mit den Vorschriften befunden wurden. Die Prüfung (Systemprüfung) erstreckt sich nicht allein auf die Eigenschaften, sondern auch auf die Bauweise, die so gewählt sein muß, daß die Beibehaltung der verbürgten Kennwerte auch unter ungünstigen Betriebsbedingungen und über eine längere Betriebszeit erwartet werden kann. Jeder Wandler muß durch Plombenschnur und

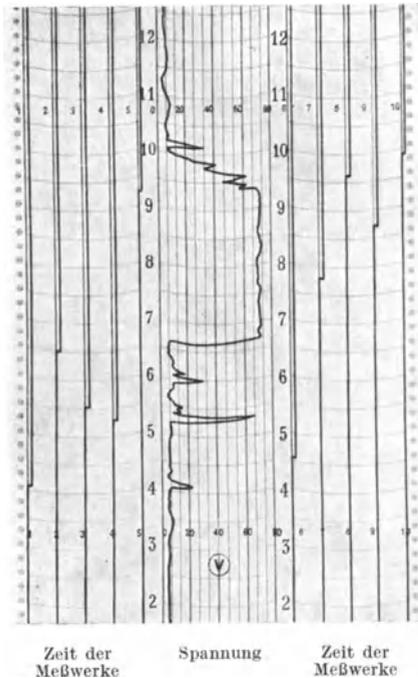


Abb. 380. Schreibstreifen eines Spannungs- und Zeit-Schnellschreibers.

Die beglaubigungsfähigen Wandler tragen als Kennzeichen auf dem Leistungsschild das Systemzeichen, beispielsweise $\overline{\text{A}}_{37}$.

Nach den Bestimmungen darf eine Wandlerausführung vom Hersteller als beglaubigungsfähig bezeichnet werden, wenn mehrere Wandler einer Typenreihe durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt geprüft und in Übereinstimmung mit den Vorschriften befunden wurden. Die Prüfung (Systemprüfung) erstreckt sich nicht allein auf die Eigenschaften, sondern auch auf die Bauweise, die so gewählt sein muß, daß die Beibehaltung der verbürgten Kennwerte auch unter ungünstigen Betriebsbedingungen und über eine längere Betriebszeit erwartet werden kann. Jeder Wandler muß durch Plombenschnur und

¹ Wellhöfer, F.: Vergleichende Betrachtung über die Meßgenauigkeit von Wandlermeßsätzen. ETZ 1937 Heft 40 S. 1082. Reiche, Dr. Ing. W.: Strom- und Spannungswandler höchster Genauigkeit. VDE-Fachberichte 1935 S. 166.

Plomben derart gesichert sein, daß keine Veränderungen in seinem Aufbau vorgenommen werden können. Für die gleichmäßige Güte aller gefertigten Wandler übernimmt dann der Hersteller die Gewähr.

Für die Prüfung müssen vom Hersteller für alle Prüfstellen des Deutschen Reiches vollständige Zeichnungen und Abbildungen eingereicht werden. Dadurch ist jedes einzelne Prüfstellen in der Lage, sich jederzeit über die Ausführung der beglaubigungsfähigen Wandler genau zu unterrichten. Die Zeichnungen und Abbildungen dienen als Unterlagen, wenn später auf Antrag eines Verbrauchers ein beglaubigungsfähiger Wandler durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt oder durch ein Prüfstellen beglaubigt werden soll. Zu diesem Zweck muß jedoch der Wandler selbst zur Stückprüfung zur Verfügung gestellt werden.

Die Güte eines beglaubigungsfähigen Wandlers ist also durch das Zeugnis der PTR erhärtet. Dadurch lassen sich Streitfälle zwischen Stromerzeuger und Stromverbraucher leichter vermeiden oder regeln.

Beglaubigungsfähige Stromwandler werden zur Zeit für die Reihen 1, 3, 10 und 20 und beglaubigungsfähige Spannungswandler für die Reihen 20 und 30 hergestellt. Die beglaubigungsfähigen Stromwandler sind allein für Innenräume geeignet. Die Spannungswandler können auch in Freiluftausführung gebaut werden.

Der **Spannungswandler** wird für die Meßgeräte und Meßwerke bei Spannungen über 250 V erforderlich. Seine Arbeitsweise entspricht der des Leistungsumspanners, infolgedessen wird er auch, abgesehen vom Spannungsübersetzungsverhältnis, nach seiner Belastung durch die angeschlossenen Geräte in VA ausgewählt. Die bau- und betriebstechnischen Unterschiede gegenüber dem Leistungsumspanner liegen darin, daß der Spannungswandler eine sehr hohe Übersetzungsgenauigkeit nach den VDE-Regeln zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{4}{4}$ Last, einen sehr kleinen Spannungsfehler und einen sehr geringen Fehlwinkel zwischen den Grenz-Nennspannungen besitzen muß, um die notwendige Meßgenauigkeit zu erhalten, daß dagegen Wirkungsgrad und Eigenverbrauch keine wesentliche Rolle spielen. Aus den „Regeln“ sind nach dieser Richtung für die Auswahl der Spannungswandler die folgenden Bestimmungen besonders beachtlich:

Regeln für Spannungswandler REM 1932.

Die Regeln gelten für Spannungswandler mit voneinander isolierten Primär- und Sekundärwicklungen für 15...60 Per/s.

Nennspannung. U_n in Volt ist der auf dem Leistungsschild angegebene Wert der primären und sekundären Spannung (110 und 100 V).

Die Nennleistung in VA kann bei Nennspannung ohne Überschreitung der Fehlergrenzen der jeweiligen Klasse dauernd abgegeben werden. Normal sind 15, 30 und 60 VA. Bei Klasse 0,2 sind 5 VA zugelassen.

Die Grenzleistung in VA kann bei Nennspannung dauernd abgegeben werden ohne Überschreitung der zulässigen Erwärmungsgrenzen.

Nennübersetzung: Nennprimär- Nennsekundärspannung wird als gewöhnlicher Bruch angegeben. Bei Stern-Sternschaltung dreier Einphasenwandler und bei Fünfschenkelwandlern gilt die Netzspannung $\sqrt{3}$ als Nennspannung, weil nur diese hinsichtlich Leistung und Genauigkeit im normalen Betrieb maßgebend ist.

Spannungsfehler ist die prozentuale Abweichung der sekundären Klemmenspannung von ihrem Sollwert, der sich aus der Primärspannung durch Division mit dem Nennübersetzungsverhältnis ergibt. Übersteigt die tatsächliche Sekundärspannung den Sollwert, wird positiv gerechnet.

Fehlwinkel in Minuten ist die Phasenverschiebung der sekundären gegen die primäre Klemmenspannung. Sekundäre Voreilung positiv. Als Ausgangsrichtung gilt bei Fehlerfreiheit eine Verschiebung von 0° .

Klassenziffer erhalten nur Wandler, welche allen Bestimmungen ihrer Klasse entsprechen:

Klasse 0,2: für genaueste Laboratoriums- und Prüffeldmessungen, besonders bei hoher Phasenverschiebung;

Klasse 0,5: für Laboratorium, Prüffeld und genaue Messungen der Leistung und Arbeit im Betrieb, sowie für Verrechnungszähler;

Klasse 1: Messungen der Leistung und Arbeit im Betrieb;

Klasse 3: Anschluß von Spannungsrelais (Spannungsmeßwerken).

Zahlentafel 29.
Spannungsfehler und Fehlwinkel für
Spannungswandler nach REM 1932.

Klasse	Spannungs- fehler		Fehl- winkel
	bereich		
0,2	$\pm 0,2$ vH	$0,8 \dots 1,2 U_n$	$\pm 10'$
0,5	$\pm 0,5$ vH	$0,8 \dots 1,2 U_n$	$\pm 20'$
1,0	$\pm 1,0$ vH	$0,8 \dots 1,2 U_n$	$\pm 40'$
3,0	$\pm 3,0$ vH	$1,0 U_n$	—

Bei mehreren Übersetzungen soll jede alle Bestimmungen einer Klasse erfüllen, andernfalls ist für jede die zugehörige Klasse anzugeben.

Bei Anschluß mehrphasiger Wandler gelten alle Angaben für die verkettete Spannung, und die Nennleistung ist die aller Phasen zusammen. Sind die Nullpunkte herausgeführt, so wird als Nennspan-

nung angegeben: verkettete Spannung $/\sqrt{3}$, und hierauf ist auch die Leistungsangabe bezogen.

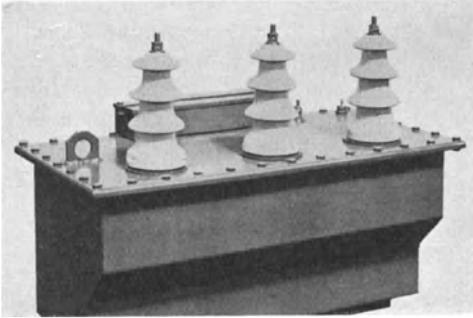
Die Fehlergrenzen gelten für Leistungen zwischen $1/4$ und $4/4$ Nennleistung bei Nennspannung und $\cos \beta = 0,8$. Bei Spannungsänderung von $0,8$ bis $1,2 U_n$ bleibt der der Nennleistung entsprechende Widerstand im Sekundärkreis unverändert.

Für die Größenbestimmung der Spannungswandler ist es notwendig, den Eigenverbrauch der anzuschließenden Geräte vorher möglichst genau festzustellen, wobei als alte Betriebserfahrung gilt, daß eine gewisse freie Leistung noch vorhanden sein soll, um später gegebenenfalls die Zahl der Meßgeräte erhöhen zu können. Das bezieht sich vornehmlich auf solche Betriebsanlagen, die im Gesamtbetrieb eine bevorzugte Rolle spielen oder spielen können wie Kraftwerke, Hauptsammelschienen, Hauptumspannwerke, besondere Meß- und Verrechnungstellen. Es kommt häufig vor, daß an diesen Stellen schreibende gegen anzeigende Geräte ausgetauscht oder neue Betriebsgeräte hinzugefügt werden sollen.

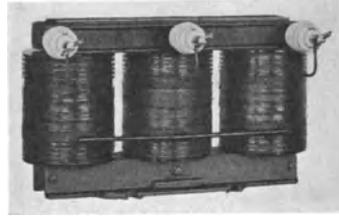
Bei Spannungswandlern für Zähler ist darauf zu achten, daß die Lastgrenze nach oben und unten auf die tatsächlichen Betriebsverhältnisse Rücksicht nimmt, da namentlich des Nachts und Feiertags auch kleinere Belastungen als $1/4$ häufig vorkommen und zudem die Oberspannung durch Spannungsabfall und betriebsmäßige Regelung stark schwanken kann. Unter Umständen ist die Klassengenauigkeit bis zur Belastung Null (Leerlauf) zu verlangen. Das gleiche gilt für Meßgeräte mit sehr kleinem Eigenverbrauch.

Die Spannungen sind genormt, so insbesondere die Unterspan-

nung mit 100 V. Nach den „Regeln“ kann die Oberspannung gegenüber der Nennspannung um 20 vH höher liegen, ohne daß die Fehlergrenzen überschritten werden dürfen. Daher wird für Anlagen mit Regelung der Spannung in weiten Grenzen in den meisten Fällen auch mit diesem 20 proz. Spannungsunterschied auszukommen sein. Bei größeren Span-



a) Dreipoliger Öl-Spannungswandler für Innenraum, Reihe 20, Unterspannungsklemmen abgedeckt.



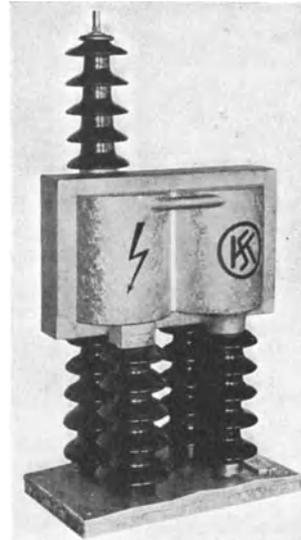
b) Dreipoliger Trocken-Spannungswandler für Innenraum, Reihe 10.



c) Einpoliger ölarter Spannungswandler für Innenraum, Reihe 30.



d) Einpoliger ölarter Spannungswandler für Freiluft, Reihe 20.



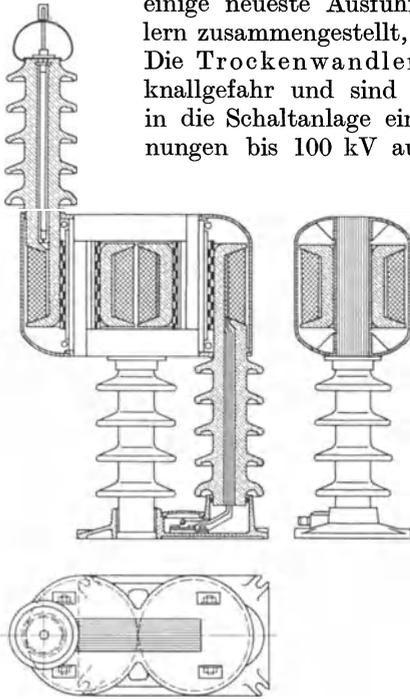
e) Einpoliger Trocken-Spannungswandler für Freiluft, Reihe 60.

Abb. 381 a—e. Spannungswandler-Bauformen für Innenraum- und Freiluftaufstellung.

nungsunterschieden ist der Spannungswandler besonders auszulegen, sonst wird seine Übersetzungsgenauigkeit unzulässig beeinflußt. Die Unterspannung wählt man heute für neue Anlagen zu 100 V. Um aber in älteren Anlagen die Haltung von Auswechslungsstücken einzuschränken, wird die Unterspannungsseite umschaltbar auf 110 V eingerichtet, weil früher die Unterspannung 110 V betrug.

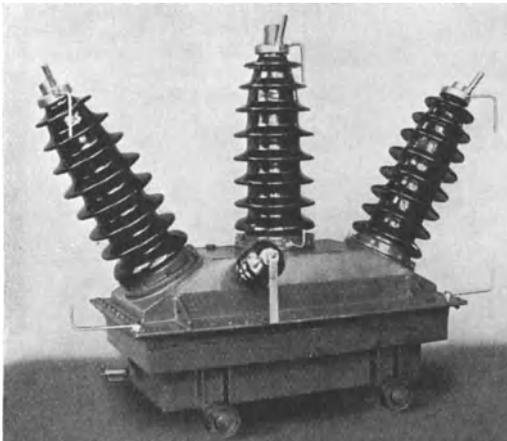
Für die Isolierung der Ober- und Unterspannungswicklung wird

entweder die Trockenisolierung (Luft oder imprägnierte Faserstoffe), die Öl-, Masse- oder Porzellanisolierung ausgeführt. In Abb. 381 sind einige neueste Ausführungsformen von Spannungswandlern zusammengestellt, die eine gute Übersicht gestatten. Die Trockenwandler vermeiden die Brand- und Zerknallgefahr und sind auch leichter und raumsparender in die Schaltanlage einzugliedern. Sie werden für Spannungen bis 100 kV ausgeführt. Die Ölwan-

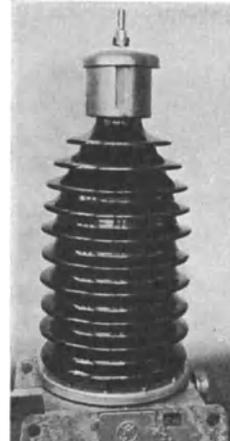


f) Einpoliger Trocken-Spannungswandler für Freiluft, Reihe 100 (Schnittzeichnung).

der haben, wie bereits kurz gesagt, alle Nachteile der Ölspanner. Ihre Verwendung geht immer mehr zurück, um die mit den ölarmen oder öllosen Schaltern in der Sicherheit der Schaltanlagen gewonnenen Vorteile nicht einzuschränken oder zu verlieren. Da sie bei sehr hoher Spannung aus Bau- und Preisgründen noch nicht durch gefahrlose Wandler voll ersetzt werden können, wird neuerdings an Stelle des Öles ein anderes, weniger brand- und qualmgefährliches Isoliermittel benutzt z. B. Ölsand oder auch Sand besonderer Beschaffenheit. Die Massewandler haben eine Reihe von Nachteilen. Sie sind weniger überlastbar als Ölwand-



g) Fünfschenkel-ölarmer-Spannungswandler für Innenraum, Reihe 60, Oberspannungnullpunkt kurz geerdet, Isolatoren mit Schutzfunkenstrecken.



h) Einpoliger Öl-Stützer-Spannungswandler für Freiluft, Reihe 100, Abschlußkappe mit Ölausdehnungsgefäß.

Abb. 381 f—h. Spannungswandler-Bauformen für Innenraum- und Freiluftaufstellung.

ler. Die Füllmasse bildet manchmal ohne ersichtliche Ursachen Blasen, oder es treten bei größerer Kälte Sprünge auf, so daß die Gefahr von Spannungsüberschlägen gegeben ist. Auch das Treiben der Masse ist wiederholt beobachtet worden. Sie sind daher für Räume mit großen Temperaturschwankungen also z. B. ungeheizte Schalträume, ungeeignet. Für Freiluftanlagen können sie ebenfalls nicht verwendet werden. Sie werden daher heute immer weniger benutzt und durch die neueren Öl- oder Trockenwandler ersetzt. Die Porzellanwandler, bei denen die Oberspannungswicklung vollkommen in einen zweiteiligen Porzellankörper eingeschlossen ist, werden zur Zeit für die Reihen 10, 20 und 30 hergestellt. Dieser Wandler kann in jeder Lage eingebaut werden.

Gegen die Gefährdung durch Sprungwellen werden entweder die Eingangswindungen mit verstärkter Isolation versehen, oder es wird der schwingungsfreie Aufbau gewählt, bei dem die ganze Oberspannungswicklung kapazitiv durchgekoppelt ist.

Um je nach den Verhältnissen den vorteilhaftesten Einbau in die Schaltan-

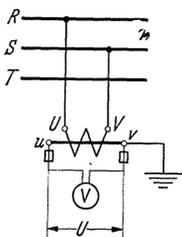


Abb. 382. Einphasen-Spannungswandler, voll isoliert.

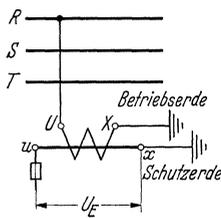


Abb. 383. Einphasen-Erdungswandler.

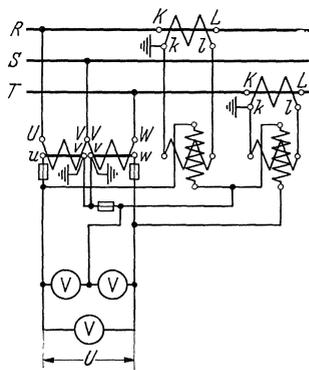


Abb. 384. Zwei Einphasen-Spannungswandler in offener Dreiecksschaltung (V-Schaltung).

lage zu ermöglichen, werden die Spannungswandler als Topf-, Stützer-, Durchführungs- und Kaskadenwandler ausgeführt¹.

In elektrischer Beziehung ist zu unterscheiden zwischen dem voll-isolierten und dem Erdungswandler, ferner zwischen Einphasen- und Dreiphasenwandler. Beim Erdungswandler erfolgt die oberspannungsseitige Erdung starr und widerstandslos.

Die Verwendung von Ein- oder Dreiphasenwandlern in Drehstromnetzen richtet sich nach den Betriebsverhältnissen und dem Genauigkeitsgrad der Messung insbesondere bei auftretenden Fehlern in den zu messenden Stromkreisen.

Der Einphasenwandler mit voll isolierten Primärklemmen wird für Spannungs- und Frequenzmesser, für einfache Meßwerke, zum Parallelschalten über Spannungsmesser oder ein Synchronoskop benutzt (Abb. 382). Um die Zahl der Wandler in einer Anlage zu beschränken, wird, da fast stets mehrere Meßgeräte anzuschließen sind, der Einphasenwandler bei niedrigen Oberspannungen selten benutzt.

¹ Gründung, K.: Fortschritte im Bau von Kaskadenmeßwandlern. Elektr.-Wirtsch. 1930 Oktober.

Sollen auch Erdschlußmessungen gleichzeitig vorgenommen werden, so ist der Einphasen-Erdungsspannungswandler zu verwenden, bei dem die Ober- und Unterspannungsseite fest geerdet werden (Abb. 383).

Zwei Einphasenwandler in offener Dreieckschaltung (V-Schaltung) mit voll isolierten Primärklemmen (Abb. 384) können für den Anschluß von Leistungsmessern verwendet werden, sofern das Netz mit Erdschlußlöschung versehen ist. In diesem Fall können auch die Zähler angeschlossen werden. Bei Erdschluß in einem Außenleiter wird das Meßergebnis falsch und zwar je nach der betroffenen Phase zu klein oder zu groß. Nur ein Fehler in der Mittelphase fälscht die Anzeige nicht. Erdungswandler können nicht verwendet werden, weil dann eine Überspannungsphase dauernd an Erde liegen müßte und dadurch einen satten Erdschluß hervorrufen würde.

Der Dreiphasen-Spannungswandler mit Dreischenkel-

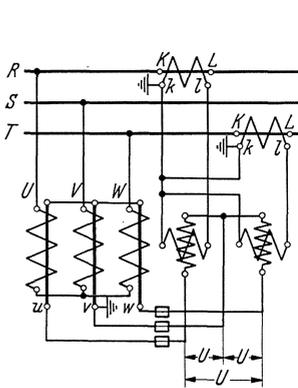


Abb. 385. Dreiphasen-Spannungswandler mit Dreischenkelkern.

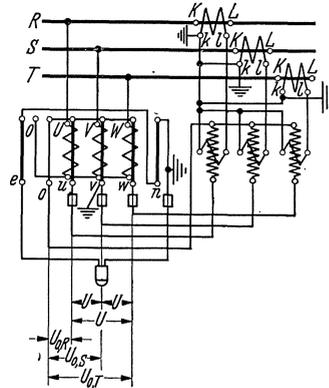


Abb. 386. Dreiphasen-Spannungswandler in Sternschaltung mit Fünfschenkelkern.

kern (Abb. 385) ist der V-Schaltung gleichwertig. Da der magnetische Widerstand des mittleren Schenkels geringer ist als der der beiden äußeren, kann die Messung infolge der Ungleichheit der Magnetisierungsströme ungenau werden. Die Erdung des Nullpunktes ist nicht möglich, weil bei Erdschluß einer Phase der Kraftfluß die durch Erde kurzgeschlossene Wicklung durchsetzt, und der Wandler beschädigt wird. Erdschlußmeßwerke und Erdschlußanzeiger können daher an diese Wandler nicht angeschlossen werden.

Der Dreiphasenwandler in Sternschaltung mit Fünfschenkelkern trägt auf drei Schenkeln eine in Stern/Stern geschaltete Wicklung. Die beiden Außenschenkel dienen als Rückfluß bei Erdschluß einer Phase, wobei die erdgeschlossene Phase auf der Überspannungsseite des Wandlers kurzgeschlossen wird, weil der Sternpunkt überspannungsseitig geerdet ist. Dieser Wandler ist für alle Meßzwecke geeignet und wird daher häufig benutzt. Die Schaltung zeigt Abb. 386. Die Meßgeräte für verkettete Spannung, Spannungs- und Frequenzmesser, Synchronoskop, Meßwerke u. dgl. sind zwischen den Klemmen u ,

v , w anzuschließen. Erdschlußspannungsmesser, Leistungsmesser und Zähler müssen zwischen $u - v - w$ und 0 liegen, wobei für letztere Meßgeräte mit drei gekoppelten Meßwerken die in Stern geschalteten Spannungsfäden zu benutzen sind. Auch zur Abführung statischer Ladungen des Netzes nach S. 397 ist dieser Wandler an Stelle der besonderen Erdschlußdrosselspule verwendbar.

Statt des Fünfschenkelwandlers können ferner drei Einphasenwandler in Stern/Stern-Schaltung mit geerdetem Oberspannungssternpunkt benutzt werden (Abb. 387). Zur Betätigung von Meldegeräten erhalten die Einphasenwandler zweite Unterspannungswicklungen, die im offenen Dreieck geschaltet sind und im Erdschlußfall 100 V erzeugen. Diese Hilfswicklung dient dann auch zum Anschluß von Meßwerken oder Meldegeräten für Erdschlußanzeige und -überwachung (Abb. 388). Bei der Wahl der Einphasen-

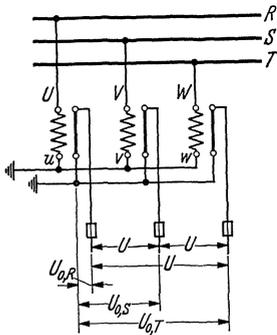


Abb. 387. Drei Einphasen-Erdungsspannungswandler in Stern-Stern-Schaltung.

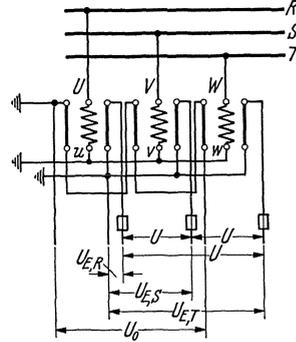


Abb. 388. Drei Einphasen-Erdungsspannungswandler in Schaltung nach Abb. 387 mit Hilfswicklung (zweite Unterspannungswicklung auf jedem Schenkel).

wandler für diese Schaltung ist zu beachten, daß die Leistung eines bestimmten Wandlermodelles etwa verhältnismäßig dem Quadrat der verminderten Spannung zurückgeht. Es werden also größere Wandler erforderlich.

Zur Sicherung des Betriebes gegen Störungen aus den Meßstromkreisen werden auf der Unterspannungsseite einfache Streifen- oder Patronensicherungen eingebaut, wobei allerdings zu betonen ist, daß diese Absicherung betrieblich recht umstritten ist. Sie erfordert gute Aufsicht, damit eine durchgebrannte Sicherung sofort festgestellt wird. In kleineren Anlagen, die nicht ständig bewacht sind, wird daher die Unterspannungssicherung auch gerne fortgelassen. Im Kraftwerksbetrieb oder in größeren Umspannwerken werden an Stelle der Sicherungen Kleinselbstschalter verwendet, die noch mit einem Meldestromkreis insbesondere dann versehen werden, wenn Meßwerke für den Leitungs-Überstromschutz angeschlossen sind. Oft werden diese Sicherungen aber auch fortgelassen, um Störungsquellen auszuschalten. Im Fall eines inneren Fehlers eines Meßgerätes oder innerhalb der Meßleitungsanlage muß dann eine Betriebsstörung und der Verlust eines

Wandler in Kauf genommen werden. Bei Spannungswandlern für Schnellregler werden die Unterspannungssicherungen nicht eingebaut, um die Spannungsregelung nicht mit einer solchen Störungsquelle zu belasten.

Werden Unterspannungssicherungen verwendet, so sollen sie für nicht zu kleinen Abschmelzstrom gewählt werden. Im allgemeinen werden etwa 10 bis 20 A als genügend angesehen, oder der Abschmelzstrom wird auf die Grenzleistung des Wandlers bezogen.

Auf der Oberspannungsseite wird die Sicherung für Spannungen bis 30 kV durch Hochleistungssicherungen vorgenommen (Abb. 389), die ebenfalls reichliche Abschmelzeinsätze erhalten müssen, um nicht durch Schaltstöße, Erdschlüsse, Korona usw. ungewollt zum Durchschmelzen zu kommen. Bei höheren Spannungen erhält die Oberspannungsseite keine Sicherung.

Im besonderen ist darauf hinzuweisen, daß im Erdstromkreis keine Sicherung liegen darf, da sonst bei deren Durchschmelzen der Schutz durch die Erdung aufgehoben wird.

Die Kondensatordurchführungen. Bei hohen Spannungen werden die Leiterdurchführungen nicht nur aus Porzellan, sondern von den SSW auch aus Hartpapier hergestellt, worüber auf S. 536 weiteres gesagt wird. Die erwähnten Metallbeläge werden zur Spannungsmessung benutzt.

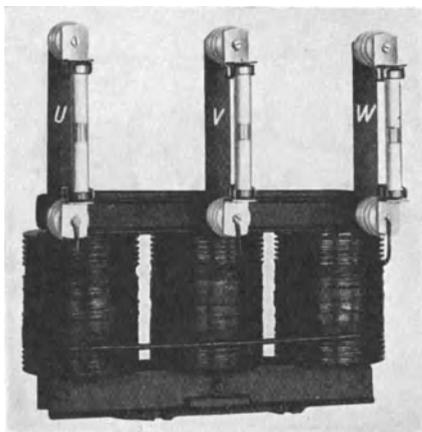


Abb. 389. Dreipoliger Trocken-Spannungswandler mit Sicherungen auf der Oberspannungsseite.

In Umspannwerken besonders, die für den Überstromschutz keine eigenen Spannungswandler erfordern, wird von dieser einfachen und billigen Meßspannungsquelle gerne Gebrauch gemacht. Jahrelange praktische Erfahrungen haben gezeigt, daß diese Meßspannung auch hinreichend ist, um das Parallelschalten mit genügender Feinheit und Sicherheit durchführen zu können. Größere Leistung besitzt diese Stromquelle allerdings nicht, so daß weitere Meßgeräte nicht ausgeschlossen werden können. Abb. 390 zeigt die Schaltung. Als Meßgeräte können nur statische Spannungsmesser Verwendung finden. Zur Isolationsprüfung der Leitungen also zur Feststellung der drei Leiterspannungen nach Erde kann diese Spannungsquelle ebenfalls benutzt werden (Abb. 391).

Der Stromwandler. Aus den „Regeln“ sollen zunächst wiederum die Hauptbestimmungen für die Auswahl dieser Wandler vorangestellt werden.

Die Regeln gelten für Stromwandler mit voneinander isolierten Primär- und Sekundärwicklungen für 15...60 Per/s.

Nennbürde ist der in Ohm angegebene Scheinwiderstand der sekundär angeschlossenen Apparate einschließlich Zuleitung, bei der die Klassenfehlergrenzen einzuhalten sind, bei einem $\cos \beta = 0,8$. Normale Nennbürden bei 5 A sind: 0,2, 0,6 und 1,2 Ohm.

Auslösebürde ist die kurzzeitig anschließbare Bürde, bei der ohne Rücksicht auf den Fehlwinkel bei Nennstrom der Stromfehler 10 vH bei $\cos \beta = 0,6$ ist.

Nennleistung ist Quadrat des Sekundärnennstromes mal Nennbürde.

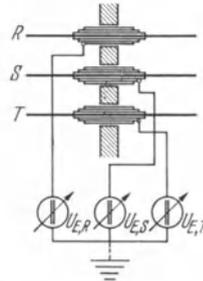
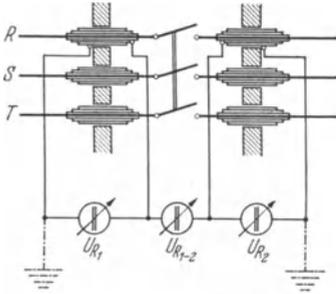
Nennübersetzung: Verhältnis von Nennprimär- zu Nennsekundärstrom.

Überstromziffer (n) ist das Vielfache des Nennprimärstromes, bei dem bei Nennbürde der Stromfehler 10 vH ist. n wird auf ± 25 vH genau angegeben. Sie ist etwa umgekehrt verhältnismäßig der Sekundenbürde.

Thermischer Grenzstrom („therm“ in kA) ist der Primärstrom, den die Primärwicklung ohne Schaden 1 s lang aushalten kann. Ihr Querschnitt Q_1 wird unter Zugrundelegung einer Endtemperatur von 200° errechnet nach:

$$I_{therm} = \frac{180 \cdot Q_1}{1000} \text{ in kA.}$$

Die normale thermische Festigkeit (1 s) ist gleich $120 \cdot$ Nennstrom.



Elektrostatische Spannungsmessung.

Abb. 390. Synchronisierschaltung (Einzel- und Summenspannung). Abb. 391. Erdspannungen (Isolationsprüfung).

Dynamischer Grenzstrom („dyn“ in kA) ist die erste Stromamplitude, die der Wandler bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung erträgt. Hohe erste Stromamplituden sind durch einen Zeitzuschlag (etwa 0,25 s) bei der Berechnung von I_{therm} zu berücksichtigen.

Stromfehler ist die prozentuale Abweichung der Sekundärstromstärke von ihrem Sollwert, der sich aus der Primärstromstärke durch Division mit dem Nennübersetzungsverhältnis ergibt. Übersteigt der tatsächliche Sekundärstrom den Sollwert, wird er positiv gerechnet.

Fehlwinkel in Minuten ist die Phasenverschiebung des Sekundärstromes gegen den primären und wird bei sekundärer Voreilung positiv gerechnet. Als Ausgangsrichtung gilt bei Fehlerfreiheit eine Verschiebung von 0° (nicht 180°).

Klassenziffer (Stromfehler bei Nennstrom) erhalten nur Wandler, welche allen Bestimmungen der REW 32 ihrer Klasse entsprechen.

Klasse 0,2: (Präzisionswandler) für genaueste Laboratoriums- und Prüffeldmessungen, besonders bei hoher Phasenverschiebung.

Klasse 0,5 (Normalwandler): Fehlergrenzen entsprechen den jeweiligen PTR-Vorschriften beglaubigungsfähiger Wandler; für Laboratoriums- und Prüffeldmessungen, sowie für genaue Messungen der Leistung und Arbeit im Betrieb.

Klasse 1 (Betriebswandler): Messungen der Leistung und Arbeit im Betrieb.

Klasse 3 (Grobwandler): meist hohe thermische und dynamische Festigkeit; für Anschluß von Strommessern oder Relais (Meßwerke).

Klasse 10: meist Stabwandler mit kleinem Nennstrom für Überstromauslöser und Wandlerstromauslösung.

Bei mehreren Übersetzungen soll jede alle Bestimmungen einer Klasse erfüllen, andernfalls ist jeweils die zugehörige Klasse anzugeben z. B. durch mehrere Schilder, wie bei mehreren Kernen.

Die Fehlergrenzen gelten bei $\cos \beta = 0,8$ und von $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{4}$ Nennbürde. Mindestbürde 0,15 Ohm.

Zahlentafel 30.
Stromfehler und Fehlwinkel für Stromwandler nach REW 1932.

Klassen- ziffer	Stromfehler bei			Fehlwinkel bei		
	100 vH	20 vH	10 vH	100 vH	20 vH	10 vH
0,2	± 0,2	± 0,35	± 0,5	± 10'	± 15'	± 20'
0,5	± 0,5	± 0,75	± 1,0	± 30'	± 40'	± 60'
1,0	± 1,0	± 1,5	± 2,0	± 60'	± 80'	± 120'
3,0	± 3,0	—	—	—	—	—
10,0	± 10,0	—	—	—	—	—

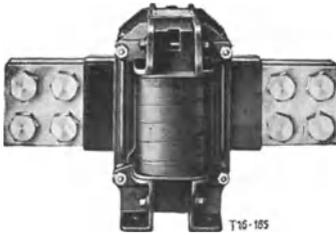
Vor Prüfung der Fehlergrenzen ist eine Entmagnetisierung mit Wechselstrom vorzunehmen.

Um den mannigfachen Bedingungen für den Einbau in die Schaltanlagen entsprechen zu können, sind auch für diese Wandler die gleichen Bauformen entstanden wie für den Spannungswandler und zwar nach der Art ihrer Isolierung zwischen Ober- und Unterseite: die Trocken-, Öl-, Masse- und Porzellanwandler, nach ihrer Bauform: die Topf-, Stützer-, Durchführungs- und Kaskadenwandler und schließlich nach dem Aufbau der Wicklung: die Stabwandler, bei denen die Oberwicklung nur aus einem Leiter besteht und die Wickelwandler, bei denen die Oberwicklung aus mehreren Windungen zusammengesetzt ist. In Abb. 392 sind einige Ausführungsformen zusammengestellt. Je nach der Lage beim Einbau wird noch unterschieden zwischen waagrecht, senkrecht und beliebig. Für die zu wählende Bauform gleichzeitig mit der Einbaulage ist der Leitungsaufbau der Schaltanlage maßgebend, wobei der Grundsatz gelten soll, wenn möglich an Wand- und Deckendurchführungen, sowie Stützisolatoren für Sammelschienen und Verbindungsleiter zu sparen und an ihre Stelle die Stromwandler zu setzen. Für den inneren Aufbau als Stab- oder Wickelwandler ist die Spannung des Stromkreises und die Höhe des Oberstromes bestimmend.

Die erste betriebliche Hauptbedingung, die der Stromwandler erfüllen muß, ist die thermische und dynamische Kurzschlußfestigkeit¹. Aus seinem Einbau im Zuge der Leitung folgt ohne weiteres, daß er den höchsten Kurzschlußströmen, die ihn ungeschwächt treffen können, gewachsen sein muß und das sowohl hinsichtlich seines inneren Aufbaues als auch seiner äußeren Befestigung. Der für einen bestimmten Wandler zulässige Kurzschlußstrom wird nach den „Regeln“ durch den thermischen und den dynamischen Grenzstrom bei kurzgeschlossener Unterwicklung festgelegt. Es ist besonders darauf hinzuweisen, daß nach den Angaben im 18. Kap. auch die Einwirkung

¹ Reiche, Dr. Ing. W.: Die Anpassung der Querlochstromwandler an schwere Kurzschlußbedingungen. Elektr. Masch. Wien 1928 Heft 43.

der Kurzschlußkräfte der Umgebung also z. B. der zwei Phasen einer Drehstromleitung bei zweiphasigem Kurzschluß auf den Wandler in der dritten Phase oder einer Drehstromleitung auf eine benachbarte nachzurechnen ist, und Sicherheit gegen unzulässige Beanspruchungen gewährleistet sein muß. Die äußere dynamische Festigkeit muß bei der Durchbildung der Schaltanlage durch genügende Abstände oder durch die Be-



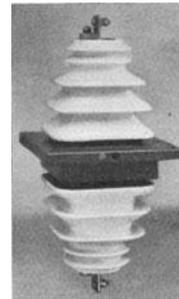
a) Trocken-Stromwandler als Einschiene-wandler zum unmittelbaren Einbau in die Stromschiene.



b) Trocken-Stromwandler als Umbau-wandler zum unmittelbaren Einbau in die Stromschiene.



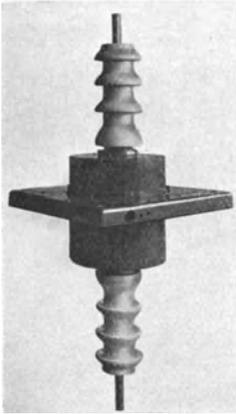
c) und d) Querloch-Porzellan-Stützer-Stromwandler (Topf-Stromwandler) mit Sandfüllung, Reihe 20, für Innenraum, Reihe 30, Ansicht und Schnitt.



e) Querloch-Porzellan-Durch-führungs-Stromwandler mit Sandfüllung, für Innenraum, Reihe 30.

Abb. 392 a bis e. Stromwandler-Bauformen.

festigung des Wandlers mit seiner Zu- und Ableitung gewonnen werden. Für die thermische Kurzschlußfestigkeit namentlich in größeren Anlagen mit Spannungen bis etwa 30 kV, aber auch bei Großanlagen im Verbundbetrieb mit sehr großen Kurzschlußleistungen ist der Stoßkurzschlußstrom und der Dauerkurzschlußstrom, wenn die Meßwerke der Schalter mit längerer Auslösezeit eingestellt sind, für die Wandlerbelastung zu berücksichtigen. Sofern nach den wohl in allen Anlagen bestehenden Betriebsvorschriften damit zu rechnen ist, daß nach Auslösung des Schalters ein- oder zweimal auf den Kurzschluß zugeschaltet werden muß, ist der Stoßkurzschlußstrom maßgebend.



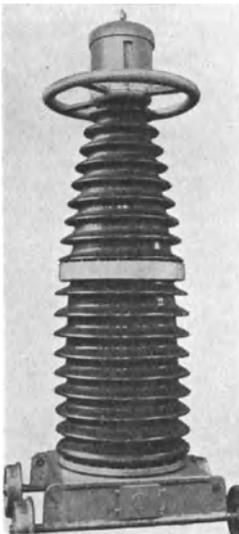
f) Stab-Durchführungs-Stromwandler für Innenraum, Reihe 20.



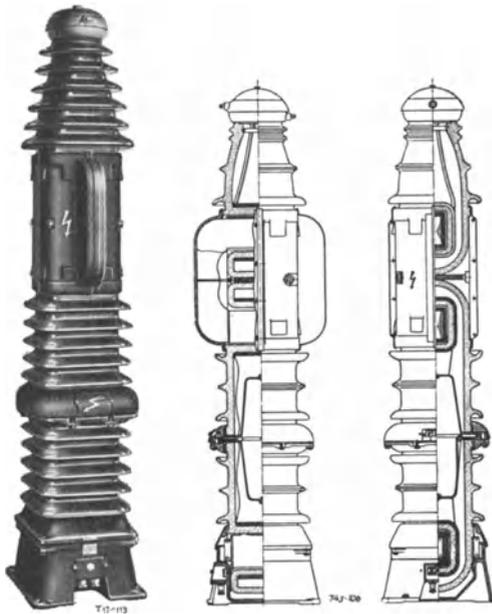
g) Schienen-Durchführungs-Stromwandler für Innenraum mit 2 Meßkernen, Reihe 30, 4000/5/5 A.



h) Schleifen-Durchführungs-Stromwandler mit Porzellan-Mehrrohr-Durchführungen, Reihe 60.



i) Öl-Stützer-Stromwandler mit Porzellanmantel für Freiluft, Reihe 200.



k) Kaskaden-Stromwandler, Reihe 200, Ansicht und Schmitte.

Abb. 392f bis k. Stromwandler-Bauformen.

Die zweite betriebliche Hauptbedingung ist die Meßgenauigkeit, wobei zu berücksichtigen ist, daß der zu messende Strom auf der Oberseite von Null bis zu einem oft weit über den Nennstrom der Maschinen oder der Umspanner liegenden Wert schwanken kann. Der Stromfehler und der Fehlwinkel nach den „Regeln“ für die einzelnen Klassen zwischen 100 und 10 vH des Nennstromes ist in Zahlentafel 30 zusammengestellt. Die Meßgenauigkeit wird weiter durch die Nennbürde und die Auslösebürde bestimmt, so daß also auch die Leitung zur Verbindung der Unterseite des Wandlers mit den Meßgeräten nach Länge, Querschnitt und Belastung unter Berücksichtigung des Leistungsfaktors des Meßstromkreises und der Meßgeräte besonderer Beachtung bedarf.

Die Nennbürde wird auf dem Schild des Wandlers angegeben. Sie ergibt sich aus $Z_{wa} = \frac{VA}{I^2}$, wobei VA den Leistungsbedarf der Meßgeräte und Meßleitungen in Volt—Ampere bezeichnet. Nach der Leistung des Wandlers für die verschiedenen Klassen ist die Zahl und Größe der anschließbaren Meßgeräte unter Berücksichtigung des Leistungsverlustes der Meßleitungen zu bestimmen. Es ist auch hier wie bei den Spannungswandlern die Größe eines Wandlers immer im Hinblick auf zukünftige Mehrbelastung durch hinzukommende Meßgeräte reichlich zu wählen; allerdings ist dieser Überbemessung eine Grenze durch den Stromfehler gesetzt, wenn der Nennstrom unter $\frac{1}{10}$ fallen kann.

Die Bürde kann zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{4}{4}$ der auf dem Wandler angegebenen Nennbürde schwanken. Kleiner als 0,15 Ohm (bei 5 A somit $VA = 3,75$) ist die Bürde aus meßtechnischen Gründen nicht zu wählen. Ist die Bürde bei reichlicher Wandlernennleistung vorerst zu klein, so ist sie durch zusätzliche Widerstände zu erhöhen, die später bei Anschluß neuer Meßgeräte entfernt werden.

Für die Überlastung ist nach den „Regeln“ auf die Bestimmung hinzuweisen, daß sie 120 vH des Nennstromes des Wandlers betragen darf, ohne daß die vorgeschriebenen Erwärmungsgrenzen überschritten werden. Das ist betrieblich besonders für Störungsfälle wichtig, wenn Stromkreisbelastungen im Aushilfsfall vorkommen können, die über der Überlastbarkeit der Wandler liegen. Hier ist dann große Vorsicht am Platz, um die Störung nicht noch größeres Ausmaß annehmen zu lassen, wenn die Aushilfe durch Störung an einem Wandler auch noch versagt. Das gilt in erster Linie für Doppelleitungen, dann aber auch für vermaschte Netze und für den Netzverbundbetrieb.

Der Stromfehler hat für die angeschlossenen Zähler besondere Bedeutung, namentlich wenn es sich um Großanlagen handelt und Belastungsänderungen auch unter $\frac{1}{4}$ der Nennlast zusammen mit stark schwankendem Leistungsfaktor auf der Hochspannungsseite vorkommen. Es ist zu empfehlen, für die Zähler-Stromwandler dann die Klasse 0,2 zu wählen, um Verrechnungsschwierigkeiten zu vermeiden. Eine kurze wirtschaftliche Untersuchung wird leicht zeigen, ob diese Wandler, deren Leistung allerdings geringer ist als die der Klasse 0,5 besser noch zusätzlich zu beschaffen sind.

Der Leistungsbedarf der einzelnen Meßgeräte und Meßwerke ist aus den Preislisten der Hersteller zu ersehen. Für die Meßleitungen bei Kupfer als Leiterbaustoff kann mit folgenden Werten gerechnet werden:

10 m Doppelleitung	2,5 mm ²	3,5 VA	}	bei 100 Volt
10 „ „	4 „	2,2 „		
10 „ „	6 „	1,5 „		
10 „ „	10 „	0,9 „		

Bei Aluminium ist der leitwertgleiche Querschnitt zu nehmen.

Auf die Überstromziffer n ist bereits bei der Besprechung der Meßwerke für die Leistungsschalter hingewiesen worden. Sie ist das Vielfache des Primär-Nennstromes, bei dem bei Nennbürde ohne Rücksicht auf den Leistungsfaktor β der Stromfehler 10 vH beträgt. Die Überstromziffer kennzeichnet die Eigenschaften des Wandlers bei Überstrom¹. Dem Sättigungsverlauf entsprechend folgt der Strom auf der Unterseite bei großen Überströmen auf der Oberseite nicht mehr verhältnismäßig dem Oberstrom, sondern bleibt allmählich zurück (Abb. 393). Um das genaue und zuverlässige Arbeiten der Meßwerke, die auf Überstrom ansprechen sollen, zu gewährleisten, muß diese Überstromziffer groß sein, d. h. etwa bei 15 bis 20 und darüber liegen, damit der Stromfehler nicht zu Fehlern im Auslöseverlauf der Meßwerke führt. Besonders gilt das für die Wandler, die für den Vergleichs- und den widerstandsabhängigen Schutz verwendet werden. Eine Überstromziffer von $n = 20$ bedeutet also, daß noch bis zum 20fachen Nennstrom auf der Oberseite der Strom auf der Unterseite genau verhältnismäßig verläuft (Abb. 393), und der Stromfehler f_I 10 vH nicht überschritten wird, wenn der Wandler den „Regeln“ entspricht. Die Überstromziffer ändert sich etwa umgekehrt verhältnismäßig wie die Bürde von ihrem Nennwert abweicht. Wenn die Bürde um die Hälfte ihres Nennwertes kleiner wird, dann wird n annähernd doppelt so groß und umgekehrt (z. B. Nennbürde 2,4, $n = 10$, Änderung auf 1,2, so $n = 20$, oder Nennbürde 1,2, $n = 20$, Änderung auf 0,6, so $n = 40$). Nach den Regeln muß für eine bestimmte Überstromziffer die Bürde bei allen Strömen unverändert bleiben.

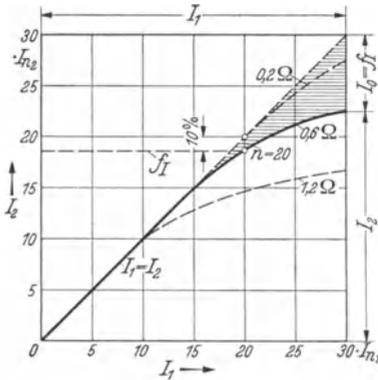


Abb. 393. Ober- und Unterstromverlauf bei Stromwandlern; Überstromkennlinien für verschiedene Bürden.
 f_I Stromfehler.

¹ Fleischhauer, W.: Graphische Stromwandlerberechnung. Diss. TH. Berlin. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. Bd. 10 (1931) S. 98; ETZ 1932 S. 691. Walter, M.: Über die Eigenschaften der Stromwandler für Schutzrelais. ETZ 1934 S. 483. Ritz, H.: Überstromziffer von Stromwandlern. Arch. techn. Messen 1935 Juni Z. 26—1 und Z. 26—2. Johannsen, K.: Überstromziffer von Stromwandlern. Elektr.-Wirtsch. 1939 Heft 7 S. 166.

Während die Meßgenauigkeit bei Meßwandlern möglichs-te Übereinstimmung zwischen dem Strom auf der Ober- und Unterseite also geringe Eisensättigung fordert, tritt bei Wandlern für Meßwerke die entgegengesetzte Forderung in den Vordergrund; hier darf zum Schutz der angeschlossenen Meßwerke vor Zerstörung der Sekundärstrom nicht über einen größeren Wert (den 8- bis 10fachen Nennstrom) ansteigen, was durch entsprechend hohe Sättigung des Eisenkerns erreicht wird. Die Verhütung einer Meßwerkszerstörung durch zu hohen Strom ist von größter Wichtigkeit, weil ein zerstörtes Meßwerk seinen Zweck, den Leistungsschalter des vom Kurzschluß betroffenen Leitungszweiges abzuschalten, nicht erfüllen würde, was die schlimmsten Begleiterscheinungen für die ganze Anlage im Gefolge haben kann. Beim Meßwandler hingegen werden im ungünstigsten Fall die an ihn angeschlossenen Meßgeräte beschädigt, eine Gefahr, welche in Kauf genommen werden muß, falls hohe Meßgenauigkeit gefordert wird.

Zum Schutz der Oberseite des Wandlers gegen Sprungwellenbeschädigungen werden mit Ausnahme der Stabwandler besondere, niederohmige Schutz- oder Überbrückungswiderstände parallel zu den Oberanschlüssen eingebaut.

Um die Zahl der in einem Stromkreis einzubauenden Wandler zu verringern, werden Wandler mit mehreren Kernen hergestellt. Sie erhalten einen Meßkern für eine bestimmte Nennleistung in einer bestimmten Klasse zum Anschluß der Zähler und Meßgeräte, dann einen Meßwerkern wiederum für bestimmte Nennleistung und Klasse mit besonders hoher Überstromziffer und schließlich einen dritten Kern für sehr geringen Fehlstrom zum Anschluß der Erdschlußmeßwerke, um den Erdschluß schon in seinem Entstehen anzuzeigen (Abb. 394).

Der Meßbereich der Stromwandler geht von den kleinsten Strömen bis herunter zu 5 A zu den größten, die nach listenmäßiger Ausführung etwa bis 20 kA liegen. Der Nennstrom auf der Unterseite beträgt 5 oder 1 A bis zu etwa 10 kA auf der Oberseite, darüber 10 A.

Schaltechnische Einzelheiten sind noch zu erwähnen, die für den Betrieb von Bedeutung sind. Zunächst darf ein Stromwandler nicht mit offener Unterwicklung betrieben werden, weil er dann sofort verbrennt. Muß ein Stromwandler infolge eines Fehlers ausgebaut werden, so ist er auf der Unterseite kurzzuschließen, bevor etwa durch Abklemmen von Meßgeräten ein Öffnen des Stromkreises eintritt.

Überstrommeßwerke dürfen nicht mit Meßgeräten in Reihe in einem Stromkreis liegen. Die Meßwerke werden, wie bereits gesagt, für starke

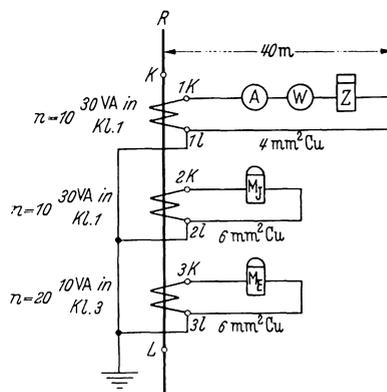


Abb. 394. Stab-Stromwandler mit 3 Meßkernen.

M_J Überstrommeßwerk, M_E Erdstrommeßwerk.

Überströme gebaut, während die Meßgeräte nur für den Nennstrom von etwa 5 A oder 1 A bemessen werden. Der Meßwerkstromkreis könnte durch Beschädigung der Meßgeräte unterbrochen werden.

Ist die Belastung der einzelnen Stromkreise zu Anfang noch nicht vollständig, sind sie aber bereits für größere Leistungsübertragungen bemessen, handelt es sich um Doppelleitungen, bei denen die Belastung eines Stromkreises bei Störung auf dem zweiten auf den doppelten Wert anwachsen kann, so werden im ersten Fall umschaltbare Wandler gewählt etwa im Verhältnis 2:1. Im zweiten Fall sind sie besser für den Summenwert des Stromes beider Stromkreise zu bemessen. Betriebsmäßige Umschaltung ohne Unterbrechung wird nicht ausgeführt. Sie ist möglich, wenn die Umschaltung auf der Unterseite liegt. Dabei ändert sich allerdings die Leistung etwa verhältnismäßig mit dem Quadrat also z. B. bei Umschaltung 2:1 auf $\frac{1}{4}$. Einleiterwandler können nur unterseitig um-

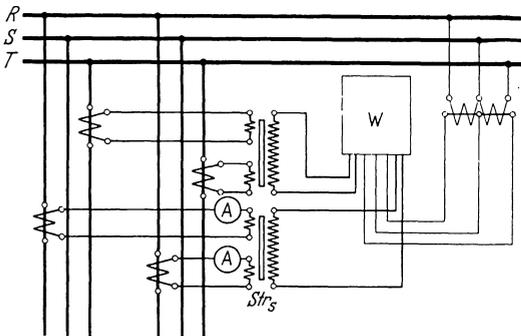


Abb. 395. Summen-Strommessung mit Stromwandlern für 2 Stromkreise und Spannungsmessung von der Sammelschiene.

geschaltet werden, was als Nachteil dieser Bauform zu bezeichnen ist. Auch die Meßgenauigkeit ändert sich dabei. Alle anderen Wandler werden auf der Oberseite im stromlosen Zustand umgeschaltet. Die Meßgenauigkeit bleibt dann bestehen.

Hinsichtlich der Bauform als Ein- oder Mehrleiterwandler wird vom Betrieb dem Einleiterwandler der Vorzug gegeben und zwar hier weiter dem Stabwandler. Dieser hat seinem ganzen Aufbau entsprechend die größte dynamische und thermische Kurzschlußfestigkeit, läßt sich leicht mit mehreren Kernen bauen und ist zudem sprungwellensicher. Allerdings ist die Verwendung dieser Wandler beschränkt. Auf die Umschaltung nur unterseitig ist bereits hingewiesen worden.

Für die Summenmessung von Strömen und Leistungen bei Doppelleitungen, die synchron miteinander betrieben werden, sind besondere Summenstromwandler auf dem Markt, für die ein Schaltbild in Abb. 395 gezeichnet ist. Sie haben besonders in verrechnungstechnischer Beziehung Vorteile, weil dann das Auswerten zeitgleicher Leistungen an verschiedenen Meßstellen und ähnliches erspart werden kann, weil das Meßgerät die Summenmessung unmittelbar erhält.

In den letzten Jahren sind die **zusammengesetzten Strom- und Spannungswandler**¹ selbst für höchste Spannungen mehr und mehr in den Betrieb eingeführt worden. Abb. 396 zeigt einen solchen Meß-

¹ Erich, M., u. A. Heitmeier: Neue Strom- und Spannungswandler. AEG-Mitt. 1937 Heft 3.

wandlersatz der AEG; die beiden Wandler sind übereinander in einem Topf eingebaut. Die wesentlichsten Vorteile dieser Bauform liegen im Fortfall einer Durchführung und im geringeren Platzbedarf. Die Meßgenauigkeit entspricht der der Strom- und Spannungswandler in Einzelbauart.

Eine besondere Form der Strom- und Spannungswandler für sehr hohe Spannungen in ihrer Bauart als Kaskadenwandler für Freiluftaufstellung zeigt Abb. 397. Die Wandler sind mit dem Trennschalter derart vereinigt, daß sie die Stützisolatoren derselben ersetzen. Im dritten Isolator ist eine besondere elektrische Heizung des Schaltstückes eingebaut.

e) **Die Melde- und Verständigungseinrichtungen.** Bei den fortgesetzt wachsenden Abmessungen der Maschinenanlagen neuerer Kraftwerke stößt man immer mehr auf Schwierigkeiten bezüglich der schnellen, sicheren und einwandfreien Verständigung zwischen Schalttafel und Maschinenbedienung oder zwischen Maschinenraum und Kesselhaus. Nicht allein die Flächenausdehnung, sondern auch die Lage der Maschinen zur Schaltbühne und besonders das Geräusch der laufenden Maschinen kann diesen Übelstand so weit steigern, daß auch schon in Anlagen mittleren Umfanges die bisher gebräuch-

lichen Melde- und Verständigungsarten (Pfeifen, Rufen, Glocken, Hupen) versagen. Diese Verständigungsarten besitzen ferner den Nachteil der Unsicherheit, weil sie nur so oft entweder ganz überhört oder falsch verstanden werden. Außerdem erfordern sie die angestrengteste Aufmerksamkeit sowohl des gebenden wie des empfangenden Teiles und können zudem nur mit verhältnismäßig großem Zeitaufwand richtig zum Verständnis gebracht werden. Vor allen Dingen aber lenken sie von der eigentlichen Tätigkeit zu sehr ab, was in großen Anlagen mit stark

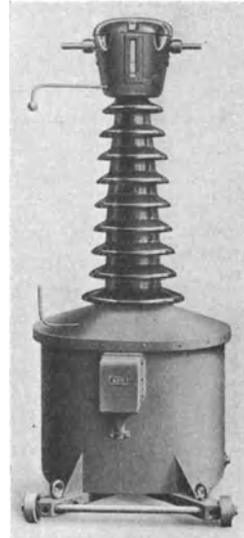


Abb. 396. Zusammengebauter Strom- und Spannungswandler mit Ölsolation für Freiluft, Reihe 100, mit Ölstandsanzeiger und Schutzfunkenstrecke.

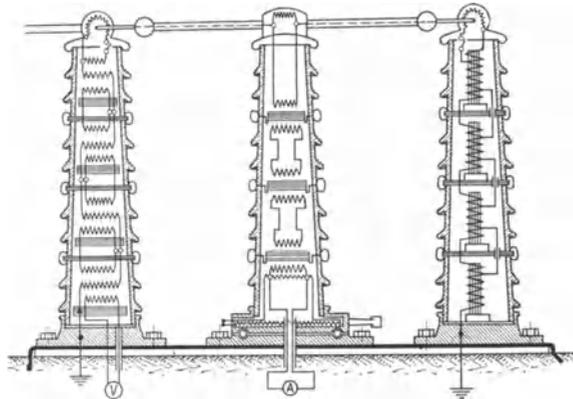


Abb. 397. Freiluft-Trennschalter mit Kaskaden-Strom- und Spannungswandler in den Stützisolatoren, Reihe 200, Heizung der Schaltstückköpfe.

schwankenden Betriebsverhältnissen unstatthaft ist. Eine rasche und einwandfreie Verständigung in erster Linie zwischen Schalt- und Maschinenbedienung ist aber ein unbedingtes Erfordernis für die Sicherheit und das glatte Abwickeln des ganzen Betriebes, für die Schnelligkeit beim Parallelschalten u. dgl. Es ist daher notwendig, daß in großen Kraftwerken die Befehls- und die Verständigung unabhängig von Geräusch und Ausdehnung der Anlage wird, und daß Mißverständnisse gegebener Befehle ausgeschlossen sind. Für diesen Zweck kommen die elektrisch betriebenen Sicht-, Hör- und Verständigungsgeräte zur Anwendung.

Ist die Schaltwarte räumlich vollständig vom Maschinenhaus ge-

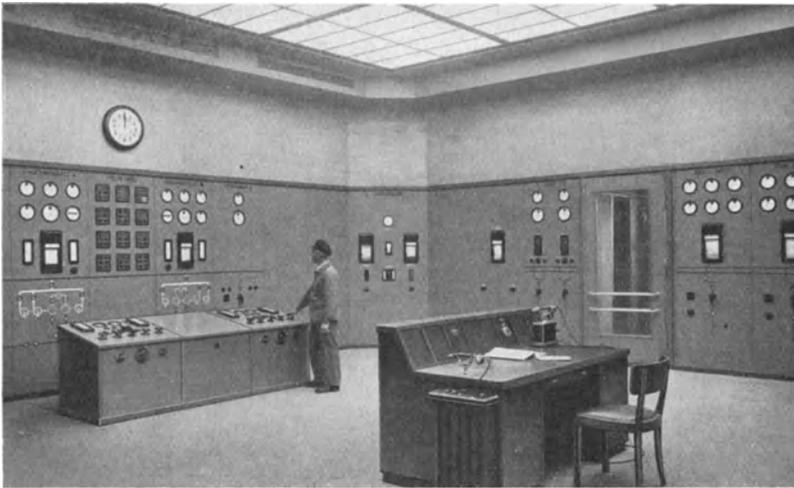


Abb. 398. Schaltwand mit Befehlsanlage in der Mitte (Leuchtfächer für Befehl und Empfangsquittung).

trennt, so müssen notgedrungen solche Befehls- und Verständigungsgeräte neben Fernsprechern benutzt werden.

Für die Verwendung derartiger Einrichtungen sprechen die Vorteile in der eindeutigen Kennzeichnung der Befehle, der Schnelligkeit und der Unabhängigkeit von der persönlichen Auffassungsgabe beider Teile der Bedienung. Ferner ist eine Mehrbelastung der Bedienung hierbei ganz vermieden, im Gegenteil es wird das Gefühl der Sicherheit durch eine solche schnelle und einwandfreie gegenseitige Verständigung um vieles erhöht, und jeder Teil der Bedienung kann sich mit voller Aufmerksamkeit seinen Aufgaben widmen.

Die Geräte, die zur Verständigung zwischen Betriebsbüro oder Schaltraum als Geber und Maschinen- bzw. Kesselraum als Empfänger besonders geeignet sind, wenn nur eine beschränkte Anzahl von Befehlen in Frage kommt, sind Glühlampenzeichen (Lichtfelder), weil sie sehr augenfällig und die dazu benutzten Einrichtungen in der Anlage einfach, leicht zu bedienen und instand zu halten sind. Die Ausführungs-

form solcher Geräte kann den verschiedenen Verhältnissen angepaßt werden. Sehr bewährt hat sich der Einbau des aus mehreren Leuchtfeldern zu einer Gruppe zusammengebauten schriftbildlichen Gebers oder Empfängers in den einzelnen Maschinenhaustafeln oder -pulten (Abb. 398 und Abb. 359 in Bd. III/1, sowie dort S. 530); vereinzelt wird auch die Ausführung des Empfängers als Säule (Abb. 399 a u. b) gewählt. Die Zahl der Leuchtfelder ist durch die Anzahl der gewünschten Fernmitteilungen gegeben. Für die Befehlsgruppe kommen beispielsweise je Maschinensatz folgende Leuchtfächer in Frage: Bereitmachen, Anfahren, Abstellen; für die Empfängergruppe dazu: Befehl ausgeführt, Störung, Gefahr, sofort abschalten und auf beiden Seiten Irrtum, Fernsprecher. Mit der Lichtmeldung ist eine Lautmeldung durch Hupe oder Wecker für jede Gruppe zu verbinden.

Der Vorgang für eine Schalthandlung spielt sich folgendermaßen ab: Durch Betätigen des Druckknopfes am Leuchtkasten in der Warte wird der gewünschte Betriebsbefehl gegeben. Mit jeder Befehlsgabe oder Meldung durch das Leuchtfach sind selbsttätig Lautmeldung und das Aufleuchten des Leuchtdruckknopfes (Abb. 399 unterer Knopf) auf der Empfängerseite, sowie das Aufleuchten der

Ruf-Überwachungs Lampe auf der Geberseite verbunden. Hupe oder Wecker werden durch Niederdrücken des Leuchtdruckknopfes auf der Empfängerseite abgestellt. Dabei zeigt das Verlöschen der Ruf-Überwachungs Lampe auf der Befehlsseite die Anwesenheit des Schaltwärters im Maschinenhaus an. Die Lichtbefehle bleiben liegen und können vom Empfänger nicht gelöscht werden. Eine Bestätigung, daß der Befehl durchgeführt wurde, geschieht durch die Meldung vom Empfänger „Befehl ausgeführt“. Die Löschung der Leuchtfächer ist nur in der Befehlsstelle möglich, sofern von der Empfangsseite die Löschung freigegeben wurde. Zur Löschung sind grundsätzlich alle Meldungen der Empfängerseite freizugeben, Befehle der Geberseite nur dann, wenn Rückmeldung „Befehl ausgeführt“ oder Meldung „Irrtum“ erfolgt ist, im letzteren Fall jedoch erst dann, wenn der Schaltwärter im Maschinenhaus durch Abstellen der Lautmeldung seine Anwesenheit bestätigt hat.

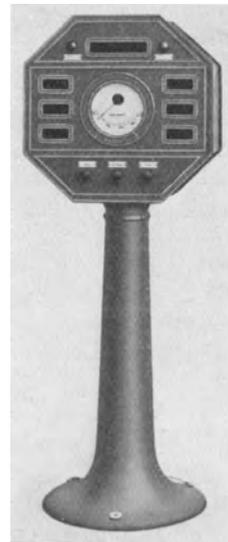


Abb. 399a. a) Quit-
tungs-knopf,
b) Leuchtdruckknopf.

Abb. 399b.

Ausführung von Befehls-empfangssäulen mit Lampen-
zeichen.

Die geschilderte Ausführung entspricht den Wünschen des Betriebes hinsichtlich einfacher Verständigung und weitgehendster Betriebssicherheit im vollen Maße.

Je nach Zahl und Aufstellungsform der Maschinen erhält jeder Maschinensatz sein Empfangsgerät.

Wenn die Beschaffung eines besonderen Empfängers für jede Maschine unerwünscht oder zu kostspielig ist, kann man sich auf folgende nicht minder zuverlässige Weise helfen. Man teilt die Zahl der Maschinensätze, Kesselblocks — Erweiterungen müssen von vornherein berücksichtigt werden — in Gruppen und beschafft für jede Gruppe einen Empfänger. Dieser wird mit möglichst großer Lichtscheibe versehen und an einer von allen zugehörigen Empfängerstellen gut sichtbaren Stelle also einer gegenüberliegenden Wand befestigt. Derartige weit sichtbare Empfänger sind schon zahlreich im Betrieb und können allen auch hinsichtlich der Deutlichkeit zu stellenden Anforderungen genügend ausgebildet werden. Für die Wecker wählt man am zweckmäßigsten solche mit verschiedenen Tönen oder Schlagzahlen (Schalen-, Kelch- oder Schalmeyglocken bzw. Einschlag-, Zweischlagglocken) oder Hupen, um die einzelnen Empfangsgruppen von vornherein deutlich unterscheiden zu können.

Neben diesen Verständigungsgeräten ist für eine sorgfältig durchgebildete Fernsprechanlage in größeren Kraftwerken unbedingt Sorge zu tragen. Sie muß so angelegt sein, daß Maschinenwärter zur Hilfe gerufen, Maschinenmeister leicht herangeholt und bei Störungen der Befehlsanlage auch schnelle und sichere Verständigung erzielt werden können. Schallsichere Fernsprechzellen dürfen nicht fehlen.

18. Die Schalt- und Bedienungsanlagen.

a) Einleitung, Grundbedingungen. Einige allgemeine Gesichtspunkte für den Aufbau der Schaltanlagen sind bereits im Band I besprochen worden. Das dort Gesagte bezog sich auf die Umspannwerke und hatte den Einbau von Ölschaltern als Leistungsschalter zur Voraussetzung. Im folgenden werden die Kraftwerksschaltanlagen und die Aufstellung der Umspanner behandelt, soweit letztere mit ersteren in unmittelbarer Verbindung stehen. Unter dem Begriff Schaltanlage wird nicht nur die Bedienungsanlage und die Geräteanlage als solche mit den Sammelschienen, Schaltern, Wandlern u. dgl. einschl. der örtlichen Bedienungs- und Meßgeräte, sondern auch die Leitungsanlage von den Klemmen der Maschinen bis zu den abgehenden Fernleitungen bzw. Kabeln zusammengefaßt. Die Entwurfsbearbeitung muß sich daher auf alle diese Teile erstrecken.

In der Schaltanlage wird der erzeugte Strom gesammelt und verteilt. Von der Schalttafel, dem Schaltpult oder der Schaltwarte aus werden Stromerzeugung, Stromverteilung und Stromabgabe gesteuert und überwacht; alle Betriebsvorgänge, die hierauf Bezug haben, müssen daher dort angezeigt werden. Um aber in besonderen Fällen Schaltungen in der Anlage selbst ausführen zu können, sind gegebenen-

falls die entsprechenden Schalt- und Meßeinrichtungen auch in den Bedienungsgängen vorzusehen. Störungen in der Schaltanlage, dem Gehirn des Kraftwerkes, können u. U. die gesamte Stromlieferung unterbrechen und dadurch die schwersten Gefahren, sowie außerordentliche wirtschaftliche Schädigungen des Unternehmens zur Folge haben. Infolgedessen müssen gewisse Grundbedingungen bei der Durchbildung der Schaltanlage erfüllt werden und zwar:

klare Gliederung und gute Übersicht in möglichst weitgehender Anpassung an das Schaltbild,

Betriebssicherheit im Aufbau unter voller Berücksichtigung der zu erwartenden Kurzschlußbeanspruchungen,

Schutz gegen Fehlschaltungen durch mechanisch oder elektrisch wirkende Verriegelungen,

enge Begrenzung von Störungen auf die betroffenen Abzweige durch Verwendung richtig angeordneten Lichtbogenschutzes,

sicherer Schutz der Bedienung insbesondere gegen die Begleiterscheinungen bei Kurzschlüssen und auch bei Arbeiten in den Anlageteilen,

klare Trennung von Hoch- und Niederspannung führenden Geräten, z. B. durch Einbau besonderer Schränke zur Aufnahme von Steuer- und Meßgeräten, sowie deren Zuleitungen,

gefahrlose Prüfung und Überwachung, fehlerloses Erkennen aller Betriebsvorgänge, schnelle und sichere Handlungsmöglichkeit,

Feuersicherheit durch Einbau ölloser bzw. ölärmer Schaltgeräte, geringste Zahl von Fehlerquellen,

kürzeste und einfachste Bedienungswege, kleinster Raumbedarf,

leichte Erweiterungsfähigkeit, sofern diese nach den Ausbauverhältnissen des Kraftwerkes berücksichtigt werden muß.

Diese Bedingungen¹ erscheinen einfach und selbstverständlich. Nicht immer werden sie aber selbst bei neuzeitlichen Schaltanlagen vollständig erfüllt, entweder weil die Raumverhältnisse beschränkt sind, der Entwurf nicht vollständig durchdacht ist, oder weil bei großen Anlagen im Lauf der Entwurfsbearbeitung so viele neue Gesichtspunkte und Änderungen Berücksichtigung finden sollen, daß erst nach Fertigstellung der Anlage die gemachten Fehler erkannt werden. Dann ist eine Abänderung zumeist nicht mehr möglich, und der Betrieb hat sich mit Schwierigkeiten abzufinden, die oft recht unangenehmer Art sein können. Darum ist den genannten Forderungen noch eine hinzuzufügen, daß, wenn irgend möglich, zur Beurteilung des Schaltanlagenaufbaues auch erfahrene Betriebsingenieure bei der Entwurfsbearbeitung hinzugezogen werden

¹ Zu diesen vom Betrieb gestellten Bedingungen müssen auch erfüllt werden: Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V VES. 1 VDE 0100, mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber VES. 2 VDE 0101/XII/37,

Leitsätze für Schutzmaßnahmen in Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V LES. 1 VDE 0140,

Vorschriften nebst Ausführungsregeln für den Betrieb von Starkstromanlagen VBS. VDE 0105/1936,

Leitsätze für Schutzzerdungen in Hochspannungsanlagen VDE 0141.

sollten. Es müssen Entwurfsbearbeiter, Betriebsmann und Architekt auch für diesen Teil des Kraftwerkes eng zusammenarbeiten, wenn nachher der Betrieb seine Schaltanlage mit Freude und Sicherheit und in allen Störungsfällen so schnell und gut bedienen soll, daß die Stromlieferung des Kraftwerkes unter allen Umständen einwandfrei gewährleistet ist.

Die Ausführungsformen für die Schaltanlagen sind naturgemäß sehr mannigfaltig. Der Aufbau richtet sich in erster Linie nach der Höhe der Spannung, die in den einzelnen Teilen der Schaltanlage vorhanden ist, ferner nach der Größe der in ihr gesammelten und verteilten Energie unter Berücksichtigung der Kurzschlußleistungen und den zu ihrer Unterbringung etwa zur Verfügung stehenden Räumen, ferner nach der bebaubaren Grundfläche und nicht zuletzt nach der Zahl und Richtung der abgehenden Leitungen und Kabel. Hierbei ist ganz besonders darauf hinzuweisen, daß namentlich in Hochspannungsanlagen der Raum für die Schaltgeräte, Sammelschienen usw. vorhanden sein muß, der sich bei der Erfüllung der Grundbedingungen aus der baulichen Durchbildung der verschiedenen Einrichtungen ergibt. Es ist daher bei Neubauten unbedingt erforderlich, die Räume für die Schaltanlage erst dann zu bestimmen, wenn aus dem Bauentwurf die Abmessungen derselben festgestellt sind. Bei dem oftmals notwendigen Hineinbauen in Räume die aus dem Kraftwerksgrundriß auch bei Neuanlagen nur für die Schaltanlage bereitgestellt werden können, muß streng darauf geachtet werden, daß der geforderte Platz in den notwendigen Abmessungen vorhanden ist, denn anderenfalls kommt eine unzweckmäßige und betriebsunsichere Form zustande, die vielleicht für den ersten Ausbau genügt, jede Erweiterung aber außerordentlich erschwert oder gar unmöglich macht. Letzterer Übelstand wird dann häufig dadurch zu beseitigen versucht, daß die vorhandenen Anlagen zusammengedrängt werden, um den notwendigen Raum für das Einbringen der neuen Schaltgeräte zu gewinnen, und das Ergebnis ist schließlich, daß die Betriebssicherheit der gesamten Anlage völlig verloren geht.

b) Das Schaltbild ist das Gerippe der Schaltanlage. Es muß vor Beginn der Entwurfsarbeiten in allen Einzelheiten vollständig geklärt sein. Das setzt die Kenntnis aller Schalt- und Schutzgeräte voraus. Da aber die Entwicklungsarbeiten besonders auf diesem Gebiet fortgesetzt vorwärts gehen, muß hier mit besonderer Vorsicht und Umsicht zu Werke gegangen werden. Als Grundsatz muß dabei gelten, daß — es soll das nochmals wiederholt werden — nur das unbedingt Erforderliche an Schalt-, Sicherheits-, Steuer- und Überwachungseinrichtungen zu wählen ist, um dadurch einfachsten Aufbau, einfachste Bedienung und weitgehende Ausschaltung von Stör- und Fehlerquellen zu erreichen. Auch die klare Gliederung, die Raumbeanspruchung und vor allen Dingen die Betriebssicherheit hängen hiermit wesentlich zusammen. Auf Erweiterung ist gegebenenfalls Rücksicht zu nehmen.

Für Gleichstrom ist das Schaltbild sehr einfach. Da es sich hier nur um Spannungen bis 500 V handelt — ausgenommen die Gleichstrom-

Hochspannung für Bahnzwecke — ist nicht die Spannung das allein Ausschlaggebende für den Schaltanlagenaufbau, sondern zumeist sind es die großen Ströme, die zu sammeln und zu verteilen sind.

In den Abb. 400 bis 402 sind in Ergänzung der Schaltbilder des 2. und 3. Kapitels drei weitere Schaltbilder für Gleichstromkraftwerke gezeichnet

Abb. 400 gilt für eine vollisolierte Zweileiteranlage mit selbsterregten Gleichstrom-Nebenschlußstromerzeugern und

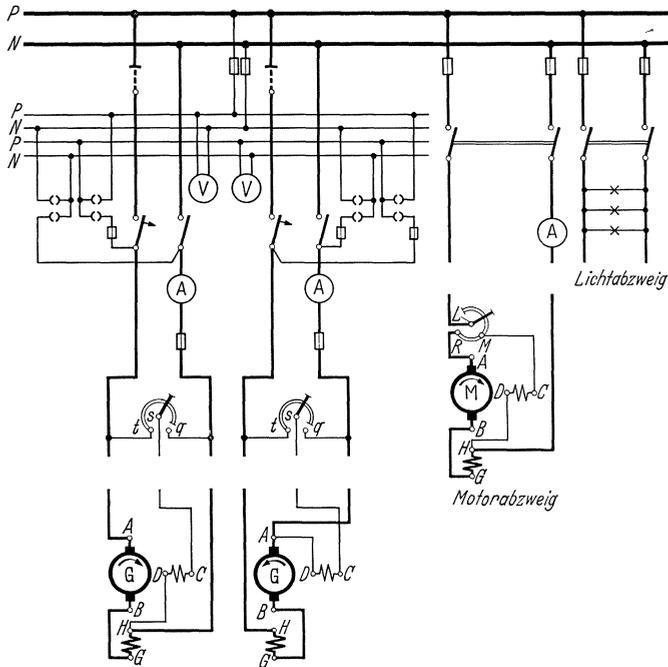


Abb. 400. Gleichstrom-Zweileiteranlage mit selbsterregten Nebenschlußstromerzeugern, ohne Batterie.
(Rechts- und Linkslauf der Maschinen.)

Abb. 401 für ein Bahnkraftwerk mit geerdetem Minuspol. Zur Sicherung gegen Überlastung werden bei kleinen Leistungen Streifensicherungen, bei größeren Leistungen bis 600 A in einem Pol Selbstschalter, im zweiten Pol Sicherungen benutzt. Zum Schalten der Maschine dienen Hebelschalter, wenn Sicherungen gewählt werden, oder die Selbstschalter, die bei Überstrom, Rückstrom oder Spannungsrückgang ansprechen. Werden einfache Hebelschalter in beiden Polen verwendet, so werden sie zweipolig geschaltet. Bei Selbstschaltern sind für Spannungen über 250 V gegen Erde Trennschalter vor die Sammelschienenanschlüsse zu legen, um die Schalter gefahrlos untersuchen und vor dem Schalten prüfen zu können.

Ist keine Batterie vorhanden, so genügt es, den Selbstschalter nur mit Überstromauslösung zu versehen. Arbeitet eine Batterie parallel,

dann sind Rückstrom- und Spannungsrückgangs-Auslöser zu verwenden, worüber bei der Besprechung der Schaltgeräte näheres gesagt ist. Die Spannungspule des Selbstschalters muß stets an gleichbleibender Spannung liegen, am besten an der Netzspannung; Anschluß an Batteriespannung ist unzulässig.

An Meßgeräten sind nach S. 433 nur Spannungs- und Strommesser erforderlich. Die Spannungsmesser sind zu sichern. Sollen mehrere Spannungen gemessen werden, dann geschieht das mit einem Meßgerät und zweipoligen Stöpselumschaltern; damit Fehlschaltungen und Kurz-

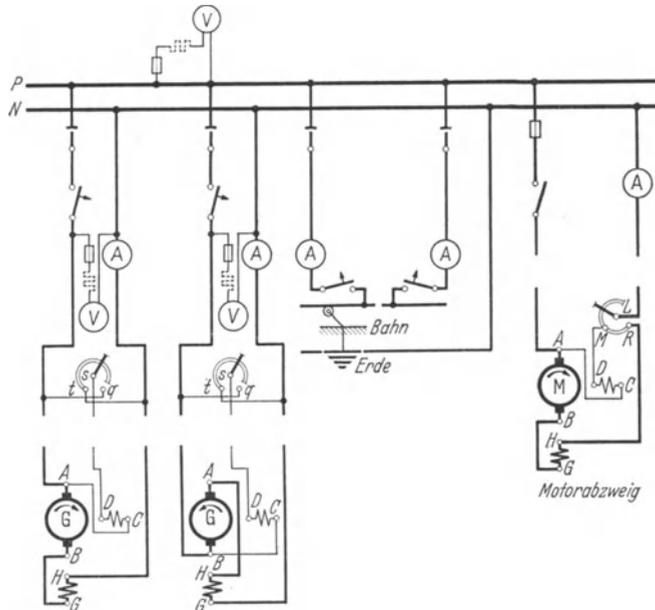


Abb. 401. Zweileiteranlage mit selbstregerten Nebenschlußstromerzeugern, ohne Batterie, für Spannungen über 250 V, mit geerdetem Leiter (Bahnanlage).
(Rechts- und Linkslauf der Maschinen.)

schlüsse vermieden werden, ist im Betrieb nur mit einem Stöpsel zu arbeiten.

Für die Spannungsmesser zum Parallelschalten sind Drehspulgeräte zu verwenden, da sie die Feststellung der Polverschiedenheit gestatten.

Bei Spannungen über 250 V gegen Erde (Abb. 401) und Erdung eines Poles (Bahnbetrieb) muß der Strommesser, sofern er im nicht geerdeten Pol liegt, infolge seines zu erdenden Gehäuses und der dabei erforderlichen längeren Kriechwege für höhere Prüfspannung gewählt werden. Es sollen infolgedessen wegen der geringen Isolationsbeanspruchung Wendepol- und Reihenschlußwicklungen, Anlasser, Schaltbahnen von Nebenschlußreglern und soweit möglich auch die Spulen von Meßgeräten an den geerdeten Leiter gelegt werden.

Für die fremderregte Maschine gilt grundsätzlich das gleiche. Im Erregerstromkreis darf kein betriebsmäßig zu bedienender Schalter

und keine Sicherung vorhanden sein. Auch Strom- und Spannungsmesser sind in diesem Stromkreis entbehrlich.

Das Schaltbild für eine Zweileiteranlage mit Doppelschlußstromerzeugern zeigt Abb. 26. Hier dürfen nur Selbstschalter verwendet werden; Sicherungen im Maschinenstromkreis sind unzulässig, weil beim Schalten Rückstrom auftreten kann, der der Richtung nach mit einer Sicherung nicht zu beherrschen ist. Als Schalter sind daher in einen Pol Selbstschalter für Überstrom- und Rückstromauslösung, im anderen Pol und in der Ausgleichleitung einfache Hebelschalter zu benutzen. Bei sehr großen Strömen, für die die Handbetätigung der Schalter nicht mehr ausführbar ist, werden die drei Maschinenschalter nicht gekuppelt. Es muß dann der Selbstschalter im Ankerstromkreis für sich bedient werden. Beim Zu- und Abschalten einer Maschine ist hierbei besonders zu beachten, daß der Ankerstrom zuletzt geschlossen und zuerst geöffnet wird, um Über- und Rückstrom zu vermeiden. Bei Rückstrom hat die entmagnetisierende Wirkung der Hauptschlußwicklung eine unzulässige Drehzahlsteigerung zur Folge.

Trennschalter vor den Selbstschaltern

sind auch hier zu empfehlen. Bei Spannungen über 250 V gegen Erde müssen sie eingebaut werden.

An Meßgeräten kommen nur umschaltbare Spannungs- und Strommesser im Ankerstromkreis zur Anwendung.

Das Schaltbild für eine Gleichstrom-Dreileiteranlage mit Nebenschlußstromerzeugern für Selbsterregung und Spannungsteiler zeigt Abb. 402. Zur Sicherung des Spannungsteilers gegen Überlastung sind in den Außenleitern auch bei kleinen Strömen nur Selbstschalter zulässig, weil andernfalls beim Ausschalten nur eines Außenleiters der Spannungsteiler mit dem vollen Strom des andern Außenleiters belastet und dadurch gefährdet werden würde. Für die beiden Selbstschalter in den Außenleitern wird zweckmäßig die zwei-polige Schalterausführung gewählt. Ist das bei großen Strömen nicht möglich, so müssen die beiden Schalter elektrisch derart abhängig ge-

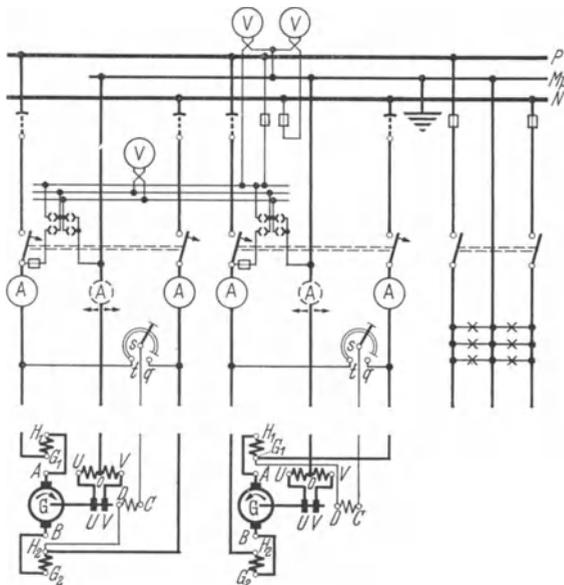


Abb. 402. Gleichstrom-Dreileiteranlage mit selbsterregten Nebenschlußstromerzeugern und Spannungsteiler (Rechts- und Linkslauf der Maschinen).

macht werden, daß beim Auslösen eines Schalters der zweite ebenfalls auslöst. Für das Einschalten muß die Abhängigkeit unterbrochen sein. Die Bedienung der Schalter beim Einschalten muß rasch hintereinander erfolgen.

Um die Spannungsteilung auch bei Überlastungen solange als möglich aufrechtzuerhalten, sind die Sicherungseinrichtungen derart zu bemessen, daß sie nur bei Kurzschluß oder einer diesem gleichkommenden Belastung ansprechen. Die Selbstschalter werden daher mit Zeitverzögerung versehen. Bei Spannungen über 250 V gegen Erde sind Trennschalter vor die Selbstschalter zu legen.

Der Spannungsteiler erhält keinen Schalter und keine Sicherung. Eine Überlastung ist der Bedienung durch eine Meldevorrichtung (Überlastmeßwerk mit Wecker oder Hupe) anzuzeigen, oder es ist diese Meldevorrichtung mit den Auslösern der Selbstschalter elektrisch zu verbinden. Für die Feststellung der Belastung und der Stromrichtung im Mittelleiter ist ein Strommesser mit Zeigerstellung in der Mitte zu wählen. Bei einer parallelgeschalteten Batterie sind ebenfalls Selbstschalter mit Zeitverzögerung erforderlich, um die Notaushilfe nicht unwirksam zu machen, zu der sie infolge ihrer hohen Überlastungsfähigkeit ganz besonders geeignet ist. Bei den Selbstschaltern ist die Zeitverzögerung derart einzustellen, daß diese bei den Überlastungen aus dem Netz erst nach der Auslösung des Netzschalters als letzte anspricht¹.

Sind Ausgleichmaschinen vorhanden, so sind diese vor Beschädigungen durch zu großen Mittelleiterstrom durch Sicherungen oder besser in gleicher Weise zu schützen (Abb. 29).

An Meßgeräten erhält jeder Außenleiter einen Strommesser. Hinsichtlich der Spannungsmessung gilt das früher Gesagte.

Für den Doppelschlußstromerzeuger mit Spannungsteiler gilt das zu Abb. 26 Gesagte. Die Selbstschalter sind mit Überstrom- und Rückstromauslösung zu versehen und wie bei den Nebenschlußstromerzeugern mechanisch bzw. elektrisch zu kuppeln. Der Schalter in der Hauptschlußwicklung ist zweckmäßig mit den Selbstschaltern zu verbinden.

Die **Batterieschaltbilder** sind bereits im 3. Kapitel behandelt worden. Für die Ladeseite ist Besonderes zur Wahl der Schaltgeräte nicht zu sagen, wohl aber für die Entladeseite. Da die Batterie in großen Anlagen immer als Aushilfe in Störungsfällen bereit sein und unter Umständen auch Überlastungen ertragen muß, sind die Schaltgeräte und Leiter im Batteriestromkreis entsprechend zu bemessen. Über die Einstellung der Selbstschalter ist oben gesprochen worden.

Für **Wechselstrom** bedarf die Aufstellung des Schaltbildes sehr eingehender betrieblicher und wirtschaftlicher Überlegungen, denn hier bestimmen die Zahl und Leistung der Maschinen, sowie die Maschinen- und Fernleitungs- bzw. Verteilungsspannungen die Durchbildung des Schaltplanes. Liegen die Spannungen der abgehenden Stromkreise höher als die Maschinenspannung, so ist zunächst zu entscheiden, ob die Kurz-

¹ Bockh, C.: Automatische Nullstromregelung in Gleichstrom-Dreileiternetzen. AEG-Mitt. 1925 Heft 9 S. 227.

kupplung „Stromerzeuger-Umspanner“ zur Ausführung kommen soll, oder ob und wieviel selbständige Umspanner zu wählen sind. In Ergänzung des im 4. Kapitel zu den Abb. 70 bis 74 Gesagten ist besonders darauf hinzuweisen, daß oft zwei oder auch drei Verteilungsspannungen zu berücksichtigen sind, und daß vor allen Dingen die größtmögliche Betriebsbeweglichkeit in der Schaltung der Maschinen und Umspanner bei sparsamster Zahl gewährleistet sein muß. Dabei ist auch die gegenseitige Aushilfemöglichkeit der Betriebsmittel zu beachten, die bei den Umspannern in ihrer Überlastbarkeit liegt (Dauer der Spitzenlast, Zusatzkühlung durch Anblasen des Kessels). Die Stromerzeugerüberlastung ist dagegen an die Leistungsfähigkeit der Antriebsmaschinen gebunden. Eng zusammen hängt damit die Entscheidung über die Verbin-

dung der Maschinen und Verteilungsstromkreise über Umspanner mit der Gestaltung der Sammelschienen. Es wird daher hierauf weiter unten besonders eingegangen werden. Voranzustellen ist die Ausstattung des Maschinenstromkreises mit Schalt- und Meßgeräten.

An Schalt- und Sicherungsgeräten werden bei Niederspannung und kleinen Maschinen Handschalter und Streifensicherungen verwendet (Abb. 403). Bei höheren Spannungen und größeren Leistungen werden nur Selbstschalter mit unabhängiger Zeitauslösung benutzt (Abb. 404). Gegen Rückstrom, der nur bei einem inneren

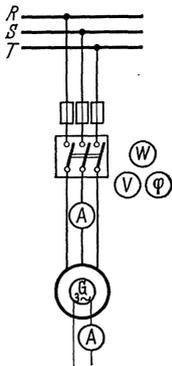


Abb. 403. Einfaches Schaltbild für einen Drehstrom-Synchrostromerzeuger für Spannungen bis 250 V.

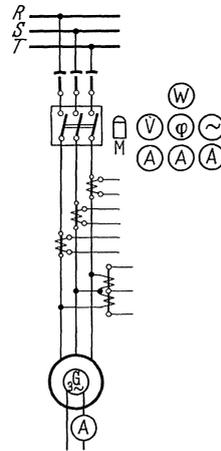


Abb. 404. Einfaches Schaltbild für einen Drehstrom-Synchrostromerzeuger für Spannungen über 250 V.

Maschinenfehler auftreten kann, kommt der besondere Maschinenschutz zur Anwendung. Spannungsauslösung erhalten die Selbstschalter nicht. Trennschalter sind bei Spannungen über 250 V erforderlich.

Für die Messung von Strom, Spannung, Leistung und Leistungsfaktor gilt das im 17. Kapitel Gesagte. Im Erregerstromkreis genügt ein Strommesser. Über das Parallelschalten und die dazu erforderlichen Meßgeräte ist bereits gesprochen worden. Es ist bei der Auswahl der Meßstellen zum Parallelschalten darauf zu achten, daß alle Stellen erfaßt werden, die auch bei Abweichungen gegenüber dem Regelbetrieb etwa in Frage kommen können. Für Kraftwerke, die nicht im Verbundbetrieb liegen, die also keine fremde Spannung erhalten können, soll tunlichst zwischen den Stromerzeugern und nicht auf die Sammelschienen synchronisiert werden, weil in den Maschinenstromkreisen bereits Spannungswandler für die Meßgeräte vorhanden sind, während für die Sammelschienen zusätzliche Wandler, bei der Kurzakupplung dann für hohe Spannung erforderlich werden. Bei Doppelsammelschienen werden

die Trennschalter mit Hilfsschaltstücken versehen, deren Strombahnen über die Spannungsmeßschalter geführt werden, so daß auch hier stets die richtigen Synchronisierungspunkte zwangsläufig erfaßt werden, insbesondere auch die notwendige Spannungshöhe eingeregelt werden kann, wenn durch die Umspannerregelung beide Sammelschienen verschiedene Spannung aufweisen. Liegt an den Sammelschienen auch Fremdspannung, so ist, wenn nur eine Fremdstromverbindung besteht, mit dieser zu synchronisieren. Sind alle Leitungen über das Netz mit anderen Kraftwerken verbunden, dann sind die Kraftwerksmaschinen auf die Sammelschienen zu synchronisieren, da diese für das Zuschalten neuer Maschinen bestimmend sind. Gegebenenfalls ist auch der Sammelschienen-Kuppelschalter in die Parallelschalt-Meßeinrichtung einzuschließen. Stets sind in diesen Fällen die Hilfsstromkreise über die Trennschalter anzuwenden.

Die Sammelschienen. Als Richtlinien für die Wahl der Einfach-, Doppel- oder Dreifachsammelschiene sind zu nennen:

größte Betriebsbeweglichkeit in der Schaltung aller Maschinen und abgehenden Leitungen,

vorteilhafteste Leistungslieferung und Leistungsverteilung nach allen irgendwie möglichen Bedingungen,

geringste Beeinflussung der Störungen innerhalb der Schaltanlage auf die Stromlieferung und -verteilung,

leichte Beaufsichtigung, Instandsetzung und Untersuchung einzelner Stromkreise ohne den übrigen Betrieb zu beeinträchtigen oder zu stören.

Störungen an den Sammelschienen zählen mit zu den gefährlichsten Störungen, die im Betrieb vorkommen können. Schon aus diesem Grund muß zum mindesten in Kraftwerken für die öffentliche Stromversorgung die größte Betriebsbeweglichkeit in der Schaltung aller Maschinen und Stromkreise gewährleistet sein.

Bei neuzeitigen Innenraumanlagen sind Störungen unmittelbar in den Sammelschienen äußerst selten, sofern den Kurzschlußbeanspruchungen voll Rechnung getragen ist, und Überspannungen keine Gefährdungen hervorrufen können. Auch regelmäßig wiederkehrende Betriebsarbeiten sind nicht häufig vorzunehmen, eigentlich nur Überprüfen der Schrauben an Schaltstücken (besonders bei Aluminium) und die Isolatorenreinigung von Staub und Niederschlag. Da die Raumtemperatur in den Innenraum-Schaltanlagen zumeist so geregelt werden kann — auch in Wasserkraftwerken —, daß bei Temperaturwechsel Feuchtigkeitsniederschläge auf den Isolatoren nicht vorkommen, sind auch Überwachungsarbeiten dieser Art kaum von besonderer betrieblicher Bedeutung. Ist die das Kraftwerk umgebende Luft unrein (Braunkohlentaub, Flugasche, chemisch verunreinigt), dann allerdings ist das auch für die Wahl der Sammelschienenführung bestimmend, worauf noch näher eingegangen wird. Kraftwerksschaltanlagen für Maschinenspannungen bis 15 kV als Freiluftanlagen sind bisher nicht zur Ausführung gekommen. Die Phasenabstände und Isolatorenabmessungen bis zu diesen Spannungen geben keine wirtschaftlichen Vorteile gegenüber der Innen-

raum-Schaltanlage, können unter Umständen sogar leichter zu Betriebsstörungen durch Vögel, Strauchwerk usw. führen.

Werden bei Kurzkupplung die Umspanner-Oberspannungssammelschienen zu den Maschinensammelschienen, dann ist hier besondere Vorsicht am Platz. Das gilt in verstärktem Maß für sehr hohe Spannungen und für Ausführung dieses Teiles der Anlage als Freiluftanlage.

Die Einfach sammelschiene. Abb. 405 bis 408 zeigen Schaltbilder für Kraftwerke mit Einfach sammelschienen. In Abb. 405 ist die Stromerzeugerspannung gleich der Verteilungsspannung, wie das für Industriekraftwerke und kleine Überlandwerke häufig der Fall ist. Für die Nebenbetriebe und den Eigenbedarf wird, wenn die Maschinenspannung über 250 V liegt, ein besonderer Umspanner angeschlossen. Abb. 406 zeigt die Kurzkupplung und Abb. 407 die Verwendung besonderer Umspanner, sofern die Verteilungsspannung höher als die Maschinenspannung ist.

Aus allen Schaltbildern ist zu ersehen, daß, selbst wenn nur 2 Maschinen vorhanden sind, die Betriebsbeweglichkeit nicht befriedigt. Ganz besonders gilt das für die Belieferung der Nebenbetriebe. Eine Störung an den Sammelschienen oder an den Trennschaltern, sowie die Ausführung von Instandsetzungsarbeiten erfordert die vollständige Stilllegung der Stromerzeuger, sofern keine Sammelschientrennung vorhanden ist, die aber auch die Schaltung der Verteilungsleitungen nicht beweglich genug machen kann. Es ist daher zu prüfen, ob dieser Nachteil der Einfach sammelschiene nicht bereits so schwerwiegend ist, daß ihre Anwendung betrieblich nicht zugelassen werden kann. Auch jede Reinigungs-

arbeit, jeder neue Anschluß, kurz jede Betriebsmaßnahme solcher Art hat stets die Abschaltung und damit die Einstellung der Stromlieferung zur Folge. Besondere Spannungen für einzelne Stromkreise zu fahren ist auch nicht möglich. Betriebstrennungen zwischen Verteilungsleitungen und Maschinen sind ebenfalls undurchführbar. Kunstschaltungen mit Trennschaltern sind vereinzelt zur Anwendung gekommen, haben sich aber zumeist nicht als betrieblich befriedigend erwiesen und werden heute daher nur selten gewählt. Eine dieser Schaltungen mit Umgehungs-trennschaltern ist in Abb. 408 für das Kraftwerk und das Umspannwerk gezeichnet. Die Maschinen I und II können auf den besonderen Stromkreis a arbeiten, der über den Umspanner Tfr_1 zu speisen ist. Handelt es sich um die Belieferung eines sehr unruhigen Abnehmers über die Leitung, der von den Abnehmern b bis e getrennt werden muß, so ist auch im Umspannwerk die Trennschalterumgehung zu wählen, die im übrigen eine Reihe von Umschaltungen gestattet. Die Trennschalter sind

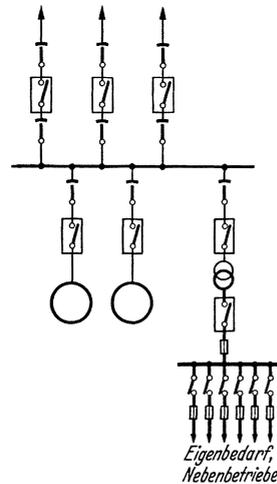


Abb. 405. Kraftwerk mit Einfach sammelschiene; Maschinen- und Verteilungsspannung gleich: Eigenbedarfsanschluß über Umspanner.

so gelegt, daß die Leistungsschalter zur Untersuchung stets spannungsfrei gemacht werden können. Sind mehr als 2 Maschinen vorhanden, dann fällt die Betriebsunbeweglichkeit noch wesentlich stärker ins Gewicht. Alles in allem wird die Einfachsammelechiene trotz ihrer geringeren Kosten für Geräte, Baustoffe und Raum nur in kleinen Industrie- und Überlandwerken für eine, höchstens für zwei Maschinen und mittlere Spannungen benutzt.

Die Doppelsammelechiene. Handelt es sich dagegen um größere Anlagen, bei denen selbst mit Umspannern unterschiedliche Fernleitungsspannungen gefahren werden muß, ferner um getrennt zu beliefernde Gebiete ohne oder mit Verbundbetrieb mit anderen Werken, dann um Verhältnisse, die eine Gefährdung der Sammelechiene durch Überspannungen aus dem Netz nicht ausschließen und um schlechte Beschaffenheit der umgebenden Luft,

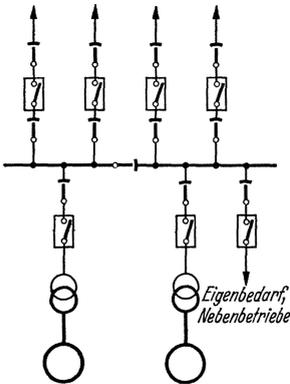


Abb. 406. Kraftwerk mit Unter- und Oberspannungseinfachsammelechiene; Maschinen und Umspanner in Kurzschlusskuppelung.

so daß eine häufige Reinigung der Sammelechiene und der Schaltgeräte erforderlich ist, dann ist die Doppelsammelechiene, unter Umständen die Dreifachsammelechiene, zu wählen. Auch verrechnungstechnische Bedingungen für den Einsatz verschiedener Maschinen auf bestimmte Abnehmerkreise, abweichende Frequenzverhältnisse im Verbundbetrieb gegenüber dem eigenen Netz, und der Anschluß rauher Betriebe mit stark wechselnder, stoß-

weise auftretender Belastung gegenüber der öffentlichen Stromversorgung (Bahnbetrieb, Walzwerke, Elektroöfen) begründen die Anwendung der Doppelsammelechiene, Abb. 409 bis 411 zeigen drei Schaltformen.

Die Anzahl der Schaltgeräte und die Raumbeanspruchung für die gesamte Schaltanlage sind naturgemäß größer als bei der Einfachsammelechiene, aber dieser Nachteil wird durch die Betriebsbeweglichkeit völlig ausgeglichen.

Abb. 409 zeigt die Schaltung bei gleicher Zahl von Maschinen und Umspannern. Besonders ist hierzu nicht zu sagen. Preislich ist diese Ausführungsform am teuersten, betrieblich die beste, denn sie erfüllt alle Grundbedingungen am vollkommensten. Auch hinsichtlich des Maschinen- bzw. Umspanner- also des Anlage-Jahreswirkungsgrades kann bei geschickter Betriebsführung der günstigste Wert erzielt werden.

Preislich, demnach für den Kapitaldienst des Kraftwerkes und be-

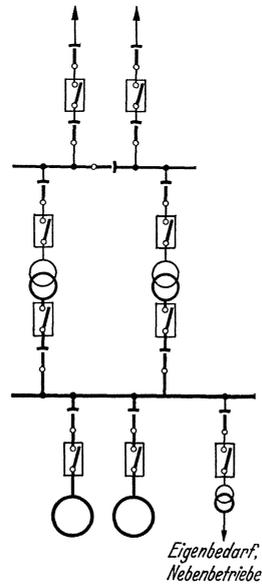


Abb. 407. Kraftwerk mit Unter- und Oberspannungseinfachsammelechiene; Maschinen- und Umspannerleistungen verschieden.

trieblich ist demgegenüber zu prüfen — oft auch durch die Raumverhältnisse geboten — ob die Zahl der Umspanner kleiner zu wählen ist als der Maschinenzahl entspricht (Abb. 410). Dabei ist dann die Umspanner-Einzelleistung unter Berücksichtigung aller möglichen Störungen zu bestimmen. Die Umspanner sind auch hier durch besondere Zusatzmittel überlastbarer zu gestalten, sollen sie nicht unwirtschaftlich groß bemessen werden.

Die Vorzüge dieser Schaltung bestehen in Ersparnissen an Anlagekosten für die Beschaffung der Umspanner selbst, in der Zahl der Schalt- und Meßgeräte, im Aufbau sowie in der Raumbeanspruchung für die Schaltanlage. Als Nachteile sind zu nennen: Schlechterer Jahreswirkungsgrad der Gesamtanlage, wenn in der täglichen oder über einen bestimmten Zeitraum (z. B. ein Jahr) berechneten Stromlieferung bedeutende Schwankungen auftreten, da zumeist alle Umspanner eingeschaltet bleiben, und sie dann oft mit geringer Belastung arbeiten, während nur ein Teil der Maschinen vollbelastet im Betrieb ist; ungünstigere elektrische Verhältnisse beim Ein- und Ausschalten der einzelnen Stromkreise; beschränkte Betriebsbeweglichkeit, da bei Störung an einem Umspanner großer Leistung unter Umständen die gesamte Stromlieferung außerordentlich stark beeinflusst werden kann. Zudem ist die Auswechslung eines Umspanners aus den gleichen Gründen unangenehmer. Auf die Unterteilung bei Drehstrom in drei Einphasenumspanner, wie in Band I bereits gezeigt, ist hier besonders hinzuweisen. Diese Unterteilung wird in Amerika sehr häufig, in Deutschland so gut wie gar nicht angewendet.

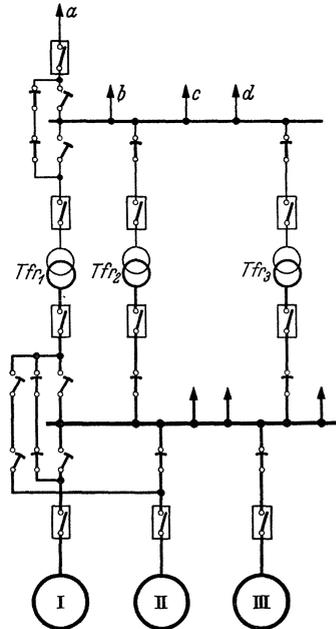


Abb. 408. Kraftwerk mit Einfachsammelschienen und Stromkreisschaltungen durch Trennschalter. (Kunstschaltung für Doppelsammelschienenersatz.)

Die dritte, in großen Werken bevorzugte Schaltung der Kurz- und Kupplung ist in Abb. 411 mit Doppelsammelschienen und in 412 mit Dreifachsammelschienen gezeichnet. Die für die Schaltung nach Abb. 409 genannten Vorteile werden für diese Schaltung zum Teil Nachteile und umgekehrt. Nur eine eingehende Beurteilung aller Verhältnisse kann die Entscheidung bringen.

Um die Betriebsbeweglichkeit vollständig zu machen, ist zwischen den beiden Sammelschienen noch ein mit Trennschaltern angeschlossener besonderer Leistungsschalter mit Schnellauslösung vorzusehen, der als Kuppelschalter bezeichnet wird (Abb. 413). Im Fall der Störung auf einer Sammelschiene kann die Umschaltung der Maschinen oder Verteilungsstromkreise ohne Stromunterbrechung also ohne Störung der Stromlieferung in kürzester Zeit vorgenommen werden. Eine Block-

trennung der Sammelschienen, die allerdings nur spannungslos geschaltet werden darf, vervollständigt die Betriebsbeweglichkeit.

Bei größerer Maschinenzahl werden vereinzelt auch in die Sammelschienen Leistungsschalter mit Schnellauslösung eingebaut, um im Fall von Kurzschlüssen im Netz oder in den Sammelschienen zunächst eine Auftrennung der Sammelschienen herbeizuführen und damit die Maschinen zu entlasten (Abb. 414). Im 13. Kap. ist darauf bereits hingewiesen worden. Die Anwendung einer solchen Sammelschientrennung hat gewiß ihre Vorteile, kann aber auch sehr beachtliche betriebliche Nachteile bringen, wenn durch die Auftrennung plötzlich die Leistungs-

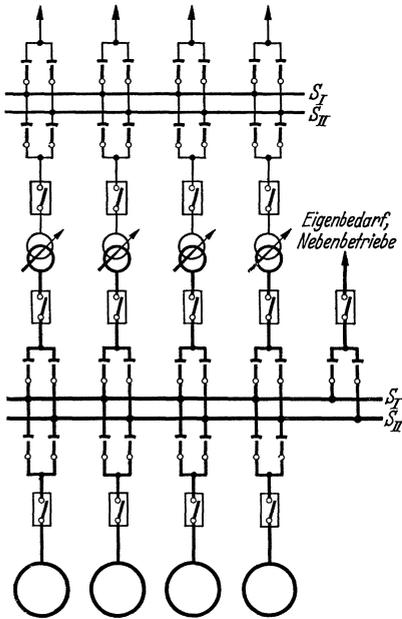


Abb. 409. Kraftwerk mit Unter- und Ober-spannungs-Doppelsammelschienen. Gleichzahl der Maschinen und Umspanner (mit Regelung).

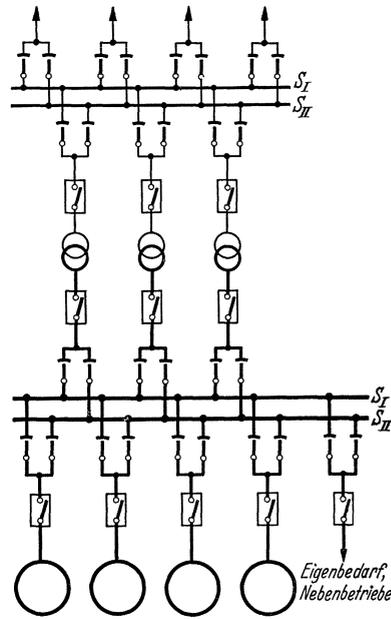


Abb. 410. Kraftwerk mit Unter- und Ober-spannungs-Doppelsammelschienen. Ungleiche Zahl der Maschinen und Umspanner.

verschiebung zwischen Erzeugung und Abnahme ein solches Ausmaß erfährt, daß die einzelnen Stromerzeuger überlastet werden. Es sind daher die Ansichten über eine solche Sammelschientrennung sehr geteilt.

In einer abgeänderten Schaltung werden diese Sammelschientrennschalter mit parallelliegenden Kurzschlußdrosselspulen versehen, die durch das Ansprechen der ersteren eingeschaltet werden (Abb. 415), auf diese Art die Kurzschlußstrombeanspruchung der einzelnen Gruppen begrenzen und dadurch die Störungsübertragung auf die Maschinen mildern. Die Gruppen können dann wiederum durch Kuppelschalter miteinander verbunden werden.

Auf die Deckung des Eigenbedarfes¹ des Kraftwerkes ist in der

¹ Titze, F: Die elektrischen Einrichtungen für den Eigenbedarf großer Kraftwerke. Berlin: Julius Springer 1927.

Aufstellung des Schaltbildes ebenfalls besonders Rücksicht zu nehmen. Es muß namentlich in Dampfkraftwerken bei elektrischem Betrieb der Kondensationsanlagen und der Feuerungsantriebe unbedingt dafür gesorgt

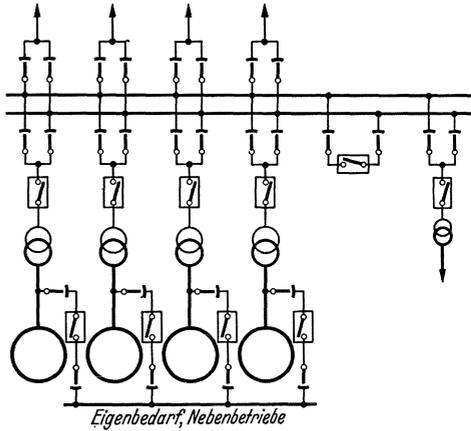


Abb. 411. Kraftwerk mit Oberspannungs-Doppelsammelschienen. Maschinen und Umspanner in Kurzkupplung.

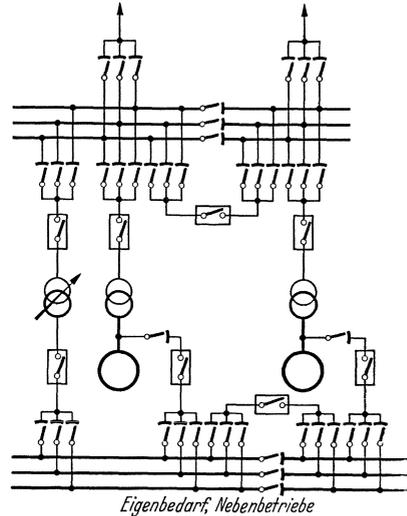


Abb. 412. Kraftwerk mit Oberspannungs- und Unterspannungs-Dreifachsammelschienen. Maschinen und Umspanner in Kurzkupplung; Kuppelschalter und Blocktrennung.

werden, daß Störungsübertragungen auf die Stromlieferung an den Eigenbedarf nicht vorkommen. Arbeiten nicht besondere Maschinen

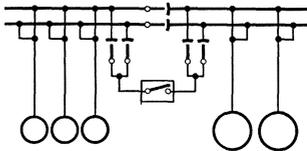


Abb. 413. Doppelsammelschienen mit Blocktrennung durch Trennschalter und Kuppelschalter.

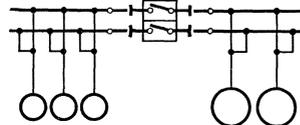


Abb. 414. Sammelschienenentrennung durch Leistungsschalter.

auf den Eigenbedarf, so ist in größeren Anlagen die Doppelsammelschiene oder eine besondere dritte Sammelschiene erforderlich, die mit allen Maschinen über Leistungsschalter verbunden werden kann (Abb. 411 und 412).

e) Die Schaltanlage eines Kraftwerkes gliedert sich in die Geräteanlage und die Bedienungsanlage. Es ist nach der Zahl und Leistung der Maschinen, nach den Spannungsverhältnissen für Erzeugung und Verteilung und nach der Ausführung der Verteilungsleitungen als Freileitungen oder Kabel die Durchbildung der Schaltanlage insgesamt zunächst grundsätzlich zu entscheiden und zwar, ob beide möglichst eng zu-

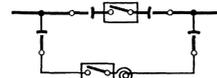


Abb. 415. Sammelschienenentrennung durch Leistungsschalter mit Parallelschalter und Kurzschlußdrosselspule.

sammengelegt werden sollen, oder ob eine räumliche Trennung erforderlich bzw. erwünscht ist. Entsprechend werden die notwendigen Räume oder Plätze zu bestimmen sein. Während die Geräteanlage in ihren Abmessungen in der Hauptsache von der Höhe der Spannungen abhängt, für die sie in ihren einzelnen Teilen aufzubauen ist, kann die Bedienungsanlage freier behandelt werden, weil sie gegebenenfalls nur durch Meß- und Steuerleitungen mit der Geräteanlage in Verbindung zu bringen ist.

Da die Ausführung beider Einzelteile einer Schaltanlage den weitesten Spielraum läßt, soll im folgenden wiederum nur Grundsätzliches besprochen und an Hand ausgeführter Anlagen beurteilt werden, wobei die Forderungen des Betriebes nach Zweckmäßigkeit, Sicherheit und

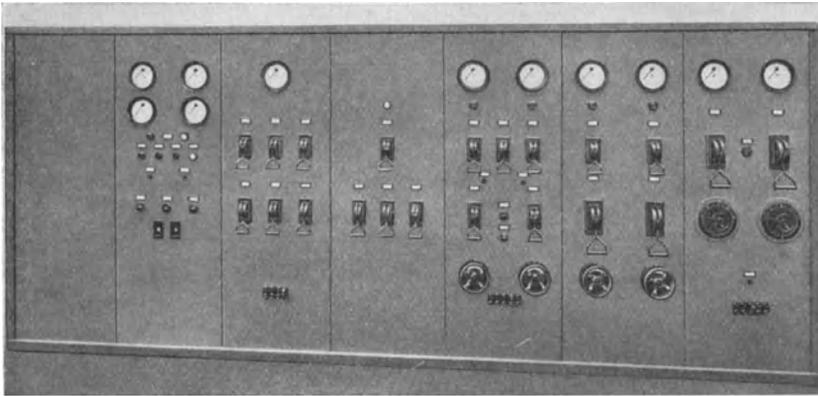


Abb. 416. Niederspannungsschalttafel für die Maschinen- und Verteilungsstromkreise (Stahlbinder und Stahlfrontplatten).

bester Erfüllung der Betriebsaufgaben in erster Linie maßgebend sein müssen. Wenn von einer ausführlichen Beschreibung aller Einzelheiten der folgenden Abbildungen abgesehen wird, so deshalb, um den Leser selbst zu kritischen Beurteilungen zu veranlassen. Das Rüstzeug dazu wird kurz gegeben werden.

Der geschlossenen Behandlung der Geräteanlage wird die Durchbildung und der Aufbau der Bedienungsanlage vorangestellt. Eine Ausnahme darin bildet die Kraftwerks-Niederspannungsanlage, die heute nur noch eine untergeordnete Rolle spielt, aber trotzdem der Vollständigkeit wegen erwähnt werden muß.

Die Schaltanlage für Niederspannung wird nur in der Form erstellt, daß die Geräteanlage und die Bedienung derselben als ein zusammengebautes Ganzes erscheint. Die Schalttafel trägt auf der Vorderseite die Meßgeräte, Schalterantriebe, Reglerhandräder und Meldezeichen, während die Schaltgeräte selbst also die Leistungsschalter, Sicherungen, Regler u. dgl. hinter der Tafel Platz finden (Abb. 416 und 417). Dann ist der Schaltwärter vor allen Gefährdungen durch Schaltfeuer, Berührung spannungsführender Teile und ähnliche Vorkommnisse geschützt.

Selbstschalter und größere Handschalter, auch die Zellschalter und auswechselbaren Sicherungen werden in Eisengerüste oder neuerdings auch in Beton- bzw. gemauerte Gerüste eingebaut. Dadurch werden alle Erschütterungen beim Schalten von der Schalttafel ferngehalten. Der Antrieb der Schalter erfolgt über Kniehebel von Hand.

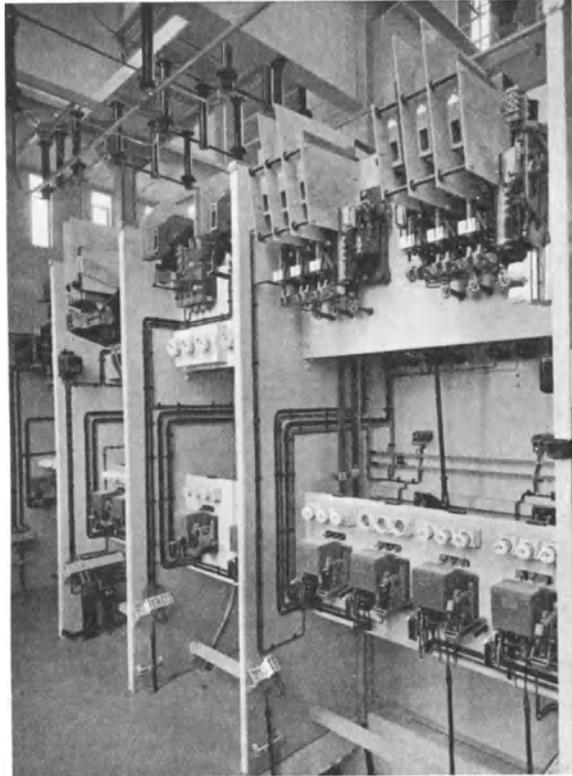


Abb. 417. Rückseite einer Niederspannungs-Verteilungsschaltwand mit Selbstschaltern, Sicherungen, Steuerleitungsverlegung.

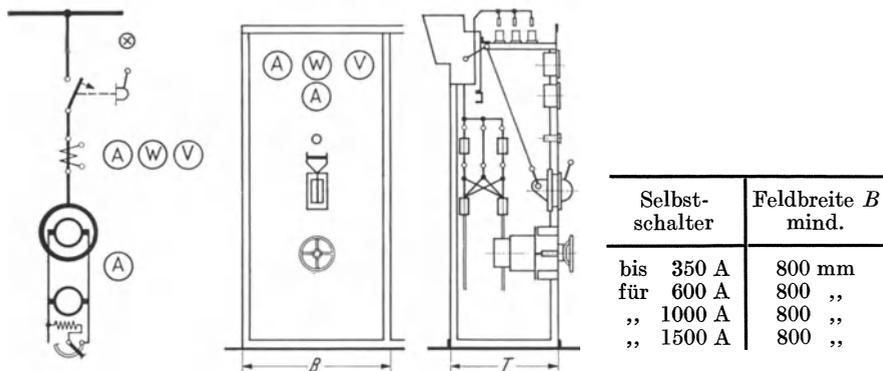
Die Sammelschienen — zumeist Einfachsammelschienen — liegen auf dem Schaltgerüst und gestatten so die einfachste und übersichtlichste Leiterführung.

Für einen genügend breiten Bedienungsgang ist zu sorgen, sobald die Schalttafel nicht frei, sondern vor einer Mauer Aufstellung findet. Für die sonstigen Schutzmaßnahmen (Absperrung des Bedienungsganges) sind die VDE-Bestimmungen zu beachten.

Über den Aufbau der Schalttafel selbst gilt das auf S. 458 Gesagte in gleichem Maß.

Für Entwurfsarbeiten sind in Abb. 418 die Hauptabmessungen von Niederspannungsschalttafeln zusammengestellt.

I. Stromerzeugerfelder.



2. Verteilungsfelder mit Selbstschaltern.

Schalterart	Antriebsart	Anz. d. Schalter bei <i>B</i>		erforderl. Feldertiefe <i>T</i>
		800 mm	1000 mm	
I pol. Kleinselbstschalter 25 A	Druckknopf	7×3*	9×3*	350 mm
II u. III pol. Kleinselbstschalter 40 A	„	2×2*	2×2*	350 „
II u. III pol. Kleinselbstschalter 40 A	Handgriff	3×2*	3×2*	350 „
Schütze III pol. 6 A	aufgebaut	7×4*	9×4*	350 „
„ „ 25 A	„	4×2*	5×2*	350 „
„ „ 40/60 A	Handgriff	3	4	550 „
„ „ 100/200 A	Steigbügel	2	—	550 „
„ „ 100/200 A	„	—	3	550 „
Selbstschalter III pol. 100/200 A	„	1	2	550 „
Selbstschalter III pol. 350 A	„	1	2	550 „
Selbstschalter III pol. 600 A	„	1	1	750 „
Selbstschalter III pol. 1000/1500 A	„	1	1	750 „

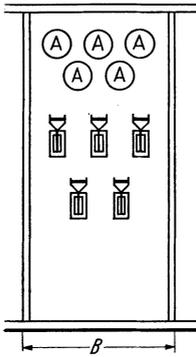
Höchstzahl der Meßgeräte im oberen Bereich der Tafel.			
Feldbreite bei	800 mm	1000 mm	
Geräte ø 178 mm	6*	8*	
Geräte ø 185 mm	6*	8*	
Geräte ø 225 mm	4*	6*	

* Bei Anordnung in 2 Reihen.

Die mit * bezeichneten Zahlen geben die Anzahl der übereinander angeordneten Schalterreihen an.

Abb. 418. Übersicht für den ungefähren

3. Verteilungsfelder mit Hebelschaltern.



Schalterbauform	Anz. der Schalter in einer Reihe liegend		Verwendungsart
	B = 800	B = 1000	
Hebelschalter III 60	3	4	} einzubauen in ein oder zwei Reihen (Zusammenstellung beliebig). in einer Reihe
Hebelschalter III 100	2	3	
Hebelschalter III 200	2	3	
Hebelschalter III 350	2	2	
Hebelschalter III 600	1	1	

Es sind noch folgende Zusammenstellungen in einer Reihe möglich:

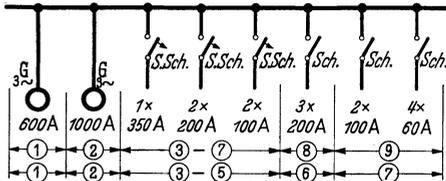
bei B = 800

- 2 Hebelschalter III 60 + 1 Hebelschalter III 100
- 1 Hebelschalter III 60 + 2 Hebelschalter III 100
- 2 Hebelschalter III 60 + 1 Hebelschalter III 200

bei B = 1000

- 2 Hebelschalter III 100 + 1 Hebelschalter III 350
- 2 Hebelschalter III 60 + 1 Hebelschalter III 600

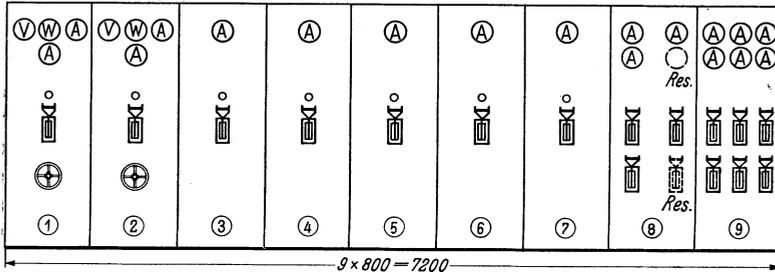
Beispiel:



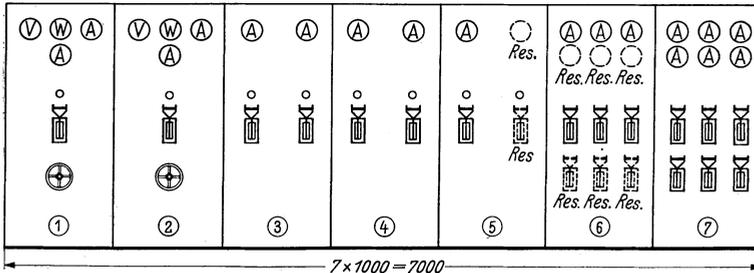
Lösung 1
9 Felder zu 800 mm Feldbreite

Lösung 2
7 Felder zu 1000 mm Feldbreite

Lösung 1.



Lösung 2.



Raumbedarf von Niederspannungs-Schalttafeln.

Die gekapselten Verteilungsschaltanlagen (Abb. 419). Die für die verschiedenen Verteilungsstellen im Kraftwerk (Kesselhaus, Turbinenkeller, Bekohlungsanlage, Pumpenhaus usw.) bisher verwendeten offenen Anlagen sind durch die gekapselte Bauform heute fast vollständig verdrängt worden.

Maßgebend für diese Entwicklung sind die großen Vorteile der gekapselten Ausführung, vor allem die Betriebssicherheit, Übersichtlichkeit, ihre mechanische Festigkeit und leichte Unterbringungsmöglichkeit. Letztere besonders gestattet es, eine gute Raumausnutzung zu erzielen, also die Anlage an jeder beliebigen Stelle des Betriebes anzuordnen z. B. in der unmittelbaren Nähe von Arbeitsplätzen und Maschinen, oder an

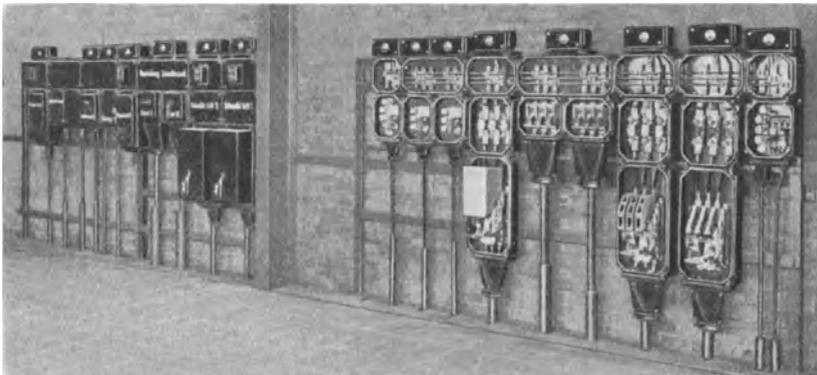


Abb. 419. Verteilungsanlage mit gußgekapselten Schaltgeräten für ein Kesselhaus, Anlage geöffnet, Funkenschutzkappen teilweise abgenommen, ferngesteuerter Motorschutzschalter.

Stellen, an denen die Anlagen durch starken Förderverkehr u. dgl. der Gefahr einer mechanischen Beschädigung ausgesetzt sind. Ein weiterer Vorzug ist die dichte Kapselung, die es ermöglicht, die Anlage in Räumen mit starker Staubentwicklung, Dämpfen und Spritzwasser anzuordnen. Raumersparnis wird dadurch erzielt, daß nicht nur ein besonderer Raum für die Aufstellung überflüssig ist, sondern daß auch der Bedienungsgang hinter der Anlage fortfällt, da die Anlage unmittelbar an der Wand angebracht werden kann. Außerdem können die Anlagen an Stellen errichtet werden, die für andere Zwecke nicht oder nur schlecht verwendbar sind z. B. in schmalen Gängen, an Fensterwänden, in Nischen, an Pfeilern, in Ecken usw. Auch jede Gefährdung der Bedienung durch Berührung spannungsführender Teile ist vermieden.

Ferner ergeben sich große Ersparnisse an Leiterbaustoff und Verlegungsarbeit, weil die Anlage an die Stelle gesetzt werden kann, die sich aus der Berücksichtigung einer einfachen und übersichtlichen Leitungsführung ergibt. Sehr wesentlich ist schließlich die leichte Erweiterungsmöglichkeit bzw. der einfache Umbau, da die betreffenden Kästen bequem auszuwechseln oder neue anzubauen sind.

Entsprechend den Anforderungen in den verschiedenartigsten Be-

trieben sind verschiedene Bauformen entwickelt. Für leichtere Betriebe und einfachere Anlagen kommt die stahlblechgekapselte Bauform in Frage, desgleichen auch die Kapselung aus Isolierstoff, letztere zumal dort, wo Berührungsschutz gefordert werden muß. Das geringe Gewicht dieser Ausführungsformen ermöglicht die Anbringung an leichten Wänden.

Für schwerere Betriebe und solche Stellen, an denen mit dauernder Einwirkung von Dämpfen und Gasen, Wasser u. dgl. zu rechnen ist, sind die gußgekapselten Ausführungen zu bevorzugen. In diesem Fall ist Erdung, Nullung oder Schutzschaltung erforderlich.

Von der **Kraftwerksbedienungsanlage** d. h. von der Schalttafel, dem Schaltpult oder der Schaltwarte sollen, wie schon die Bezeichnung erkennen läßt, alle Schaltungen vorgenommen und der gesamte elektrische Betrieb technisch und betriebswirtschaftlich überwacht werden. Es sind hier demzufolge alle Antriebe für die Betätigung der Schalter, Regler u. dgl., ferner alle Meß- und Steuergeräte zu vereinigen, um in jedem Augenblick den Betriebszustand überprüfen und etwa erforderliche Schalthandlungen auf schnellstem Wege und mit der erreichbar größten Zuverlässigkeit durchführen zu können. Liegt das Kraftwerk im Verbundbetrieb, so ist auch die Fremdstromlieferung einzubeziehen.

Für die Bedienungsanlage ist zunächst grundsätzlich festzulegen, ob sie getrennt werden soll in einen selbständigen Teil für die Maschinen mit ihren Nebenanlagen und in einen solchen für die abgehenden Stromkreise ohne oder mit den zugehörigen Umspannern einschließlich der sonstigen Einrichtungen, oder ob die Zusammenfassung zweckmäßiger ist. Die erste Ausführung wird meist bei großen Kraftwerken mit Umspannern und zahlreichen abgehenden Leitungen oder Kabeln und dementsprechend vielen Meß-, Zähl- und Überwachungseinrichtungen zu wählen sein. Es wird dann die Steueranlage für die Maschinen und u. U. für den Fremdstromanschluß zusammen mit der Hauptüberwachung der Umspanneranlage in einem besonderen Raum, der Schaltwarte, zusammengefaßt. Die Bedienung der Oberspannungsseite der Umspanner erfolgt im angegliederten Umspanwerk selbst, oder bei sehr großen Anlagen ebenfalls von der Schaltwarte durch Fernsteuerung. Bei mittleren Anlagen liegen die Räume mehr und mehr zusammen (Abb. 428). Die Vereinigung der Maschinen- und Verteilungsbedienung auf einer gemeinsamen Schaltwand oder Schalttafel wird dagegen bei kleinen und mittleren Anlagen bevorzugt¹.

Für die Durchbildung der Bedienungsanlage gelten folgende allgemeine Gesichtspunkte: Die Meßgeräte müssen übersichtlich und leicht ablesbar angeordnet sein. Besonders ist auf die Blendungsgefahr durch falsche Fensteranordnung hinzuweisen, ein Fehler, der meistens erst nach Fertigstellung des Baues bemerkt wird. Auf eine gute Lage der Regler- und Schalterantriebe zu den bei Vornahme von Schaltungen zu beobachtenden Meßgeräten ist besonders zu achten. Sind mehrere Maschinen- und Verteilungsstromkreise vorhanden, so soll jeder Stromkreis sein eigenes z. B. durch Längs- und Querleisten auffällig abgegrenztes

¹ Probst, H.: Die Entwicklung der Schaltwarte. ETZ 1937, Heft 12 S. 327.

Schaltfeld mit allen für die Überwachung des Betriebes notwendigen Vorrichtungen erhalten. Möglichste Übereinstimmung in der Zusammenstellung und Feldeinteilung nach dem Schaltbild ist naturgemäß anzustreben. Die Maschinenfelder sind vorteilhaft in die Mitte zu legen, die Felder für die abgehenden Stromkreise und Nebenanlagen zu beiden Seiten, gegenüber oder anschließend anzuordnen. Diese Form bietet die bequemste und besonders für das Parallelschalten die sicherste Übersicht, sofern die Meßgeräte für das Synchronisieren in der Mitte der Betätigungstafel liegen.

Auf eine klare und leicht leserliche Beschriftung ist besonderer Wert zu legen, desgleichen auf eine blendungsfreie künstliche Beleuchtung, worüber später noch gesprochen wird.

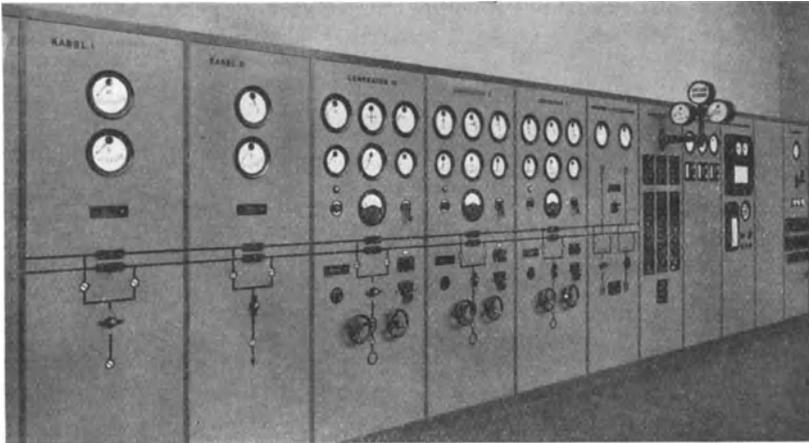


Abb. 420. Hochspannungsschalttafel mit Blindschaltbild für ein Kraftwerk mit 3 Maschinen, Parallelschaltung, Meß- und Meldeanlagen, abgehende Kabel.

Zur übersichtlichen Zusammenfassung der Antriebe und Meßeinrichtungen wird entweder die stehende Schalttafel oder das Schaltpult, beide getrennt bzw. zusammengebaut, gewählt.

Die stehende **Schalttafel** (Schaltwand) gestattet eine übersichtliche Anordnung aller Meßgeräte, Schalterantriebe usw., sowie eine gute Verlegung aller Meß- und Steuerleitungen, eine jederzeitige leichte Überprüfung aller Anschlüsse, störungsfreie und bequeme Instandsetzungsarbeiten, gute Reinigung und Überwachung. Das sind betriebliche Vorteile, die nicht zu unterschätzen sind. Dazu kommt weiter bei Maschinenspannungen bis etwa 15 kV und öllosen oder ölarmen Schaltgeräten der unmittelbare Einbau der Schaltgeräte auf der Rückseite, so daß der Schaltwand in den meisten Fällen der Vorzug zu geben ist. Abb. 420 und 421 zeigen eine solche Schalttafel in der Vorder- und Rückseite. Aber auch bei der Trennung der Geräteanlage von der Bedienungsanlage wird die Schalttafel bevorzugt gewählt.

Die Schaltwand für eine größere Anlage wird aus einer Reihe von Schalttafeln zusammengebaut.

Ist der für die Schalttafel zur Verfügung stehende Raum in der Breite beschränkt, oder wird die Längenausdehnung zu groß und damit für die Übersicht unbequem, so wird entweder eine nach der Seite zu winklige oder gebogene Aufstellung einzelner Felder benutzt, oder die Tafel in

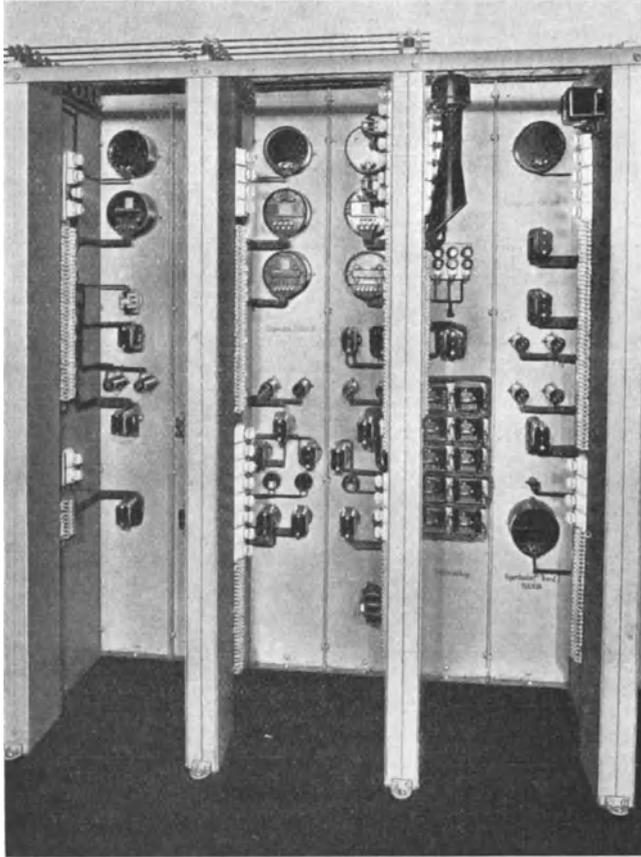
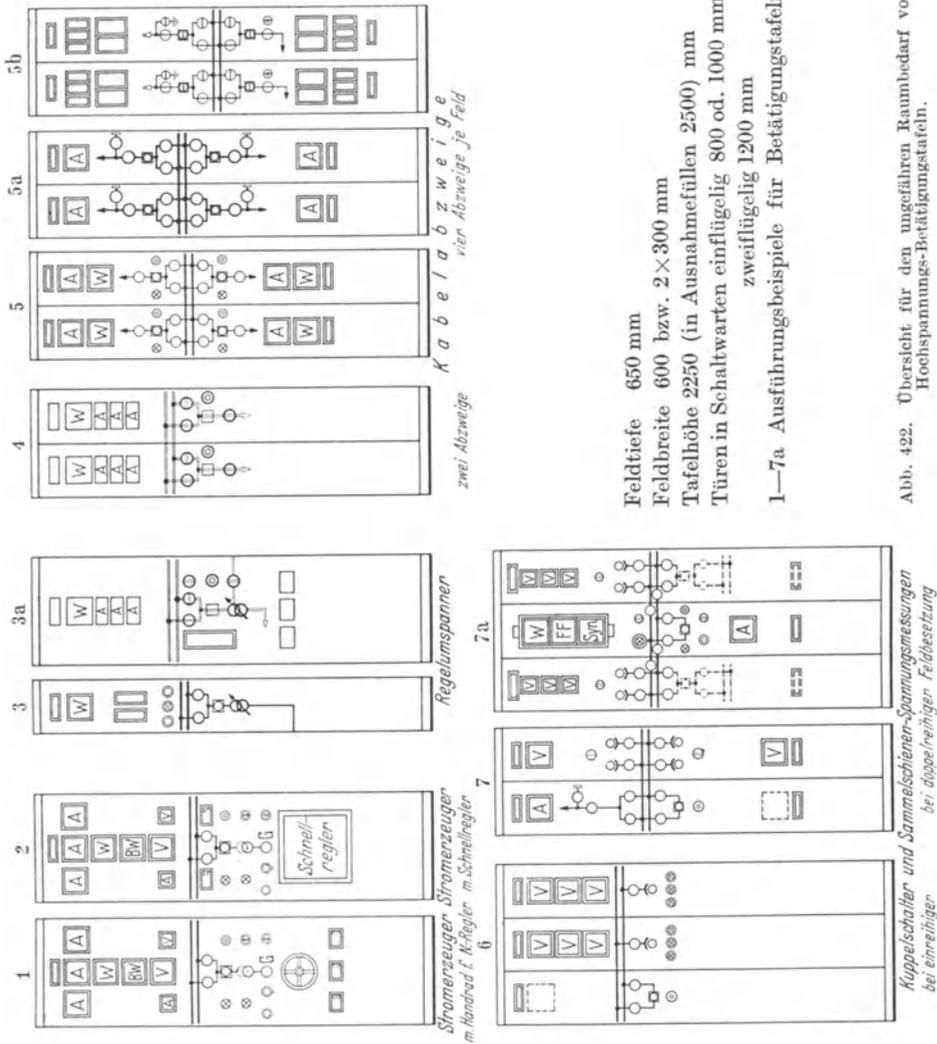


Abb. 421. Rückansicht eines Schalttafel-Schaltfeldes mit der Meßgerätebefestigung und der Anlage der Steuer- und Meßleitungen.

zwei hinter- oder über- bzw. untereinander aufzustellende Teile zerlegt. Die gebogene oder gewinkelte Form hat den Nachteil der beschränkten Erweiterbarkeit und fordert zudem besonders gute Lichtverteilung.

In Abb. 422 sind die Abmessungen für Schalttafeln in Hochspannungsanlagen angegeben, die für Eigenuntersuchungen zur Bestimmung des Raumbedarfes wertvolle Dienste leisten werden. Aus dem Schaltbild ergibt sich die Zahl der Meßgeräte und Schalter oder Schalterantriebe bzw. Steuerschalter, so daß die verschiedensten Ausführungsformen zusammengestellt werden können.

Die einzelnen Schalttafeln bestehen aus Blech oder Duroplatten, die in Eisengerüste oder in anderer Form zusammengebaut werden. Die Breiten der einzelnen Tafeln können nach der Anordnung und den Ab-



Feldtiefe 650 mm
 Feldbreite 600 bzw. 2 × 300 mm
 Tafelhöhe 2250 (in Ausnahmefällen 2500) mm
 Türen in Schaltwarten einflügelig 800 od. 1000 mm,
 zweiflügelig 1200 mm
 1—7a Ausführungsbeispiele für Betätigungstafeln

Abb. 422. Übersicht für den ungefähren Raumbedarf von Hochspannungs-Betätigungstafeln.

messungen der aufzunehmenden Schalt- und Meßgeräte gewählt werden; auch die Höhenabmessungen unterliegen keiner Beschränkung, wobei sie an sich durch die gute Ablesbarkeit der höchstgelegenen Meßgeräte bestimmt sind und nicht über 2500 mm gewählt werden sollten. Jedes Schaltfeld wird auf der Vorderseite entsprechend gekennzeichnet und auf der Rückseite gegen das Nachbarfeld als Stromkreistrennung durch

eine Zwischenwand getrennt, die die erforderlichen Flächen zur Verlegung der Steuer- und Meßleitungen hergibt (Abb. 421) und gegebenenfalls zur Befestigung von Hilfssammelschienen dient. Marmorplatten werden heute selbst für kleinste Anlagen kaum mehr benutzt. Sie sind feuchtigkeitsaufnahmefähig, verschmutzen leicht, gestatten keine Änderung der aufgebauten Geräte, sind zudem teuer in Beschaffung und Unterhaltung.

Der Aufbau einer Schaltwand aus einzelnen Blechtafeln bietet die größte Bewegungsfreiheit, den einfachsten Zusammenbau im Kraftwerk, beste bautechnische und elektrische Vorbereitung im Lieferwerk. Auch das befriedigende Aussehen der Schalttafeln oder der ganzen Schaltwand ist an jeder Verwendungsstelle zu erreichen. Ein sorgfältig gewählter matter Anstrich kann dazu wesentlich beitragen. Jede unnötige Verzierung ist fortzulassen. Die einfachen Linien wirken durch sich selbst.

Die Meßgeräte, Steuerschalter, Meldeanzeiger werden heute fast unterschiedslos in die Tafeln eingelassen, so daß alle Anschlüsse auf der Rückseite liegen. Zur Raumersparnis werden nur für die Hauptanzeigergeräte — die Spannungs- und Leistungsmesser — Meßgeräte mit größerem Skalendurchmesser gewählt, alle übrigen Meßgeräte in kleiner Bauform verwendet. Besonders platzsparend sind die rechteckigen und quadratischen Meßgeräte mit senkrechter und waagerechter Skala (Abb. 424, 432, 433).

Über die Anordnung der Meßgeräte ist grundsätzlich nichts Besonderes zu sagen. Bei Raumbeschränkung werden sie untereinander gesetzt. Ist Platz vorhanden, setzt man die betrieblich wertvolleren Meßgeräte möglichst nebeneinander, wodurch die Beobachtung erleichtert wird. Die Meßgeräte zum Parallelschalten und zur Leistungs- und Frequenzregelung, vornehmlich beim Verbundbetrieb, sollen für den Schaltwärter von allen Bedienungsstellen aus gut sichtbar hervorgehoben werden (Befestigung auf drehbarem Wandarm, beleuchtete Skalen). Ist die Schalttafel in ihrer Längenausdehnung beschränkt, so ist ein die Übersicht beeinträchtigendes Zusammendrängen der Meßgeräte dadurch zu vermeiden, daß alle betrieblich erst in zweiter Linie notwendigen Meßgeräte, insonderheit solche für wirtschaftliche Feststellungen wie schreibende Leistungsmesser, Zähler, Meßwerke u. dgl. auf einer zweiten Tafel oder auf der Rückseite der Schaltwand untergebracht werden, worauf bereits hingewiesen wurde.

Ist der für die Bedienungsanlage zur Verfügung stehende Raum für die Unterbringung aller Bedienungseinrichtungen auf den Schaltwänden nicht ausreichend, dann wird entweder noch ein Schaltpult nach Abb. 423 oder eine Ausführung nach Abb. 424 gewählt. Auf dem Schaltpult werden in der Regel die Maschinenbedienungseinrichtungen untergebracht,

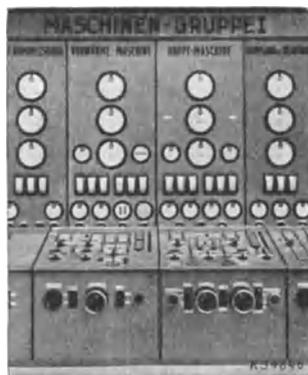


Abb. 423. Schaltpult und Schalttafel.
Getrenntaufstellung.

so daß nach dieser Richtung eine vollständige Trennung vorhanden ist, die die Durchführung von Schaltungen sehr erleichtert und bei entsprechender Besetzung der Bedienungsanlage mit Schaltwärtern auch beschleunigt.

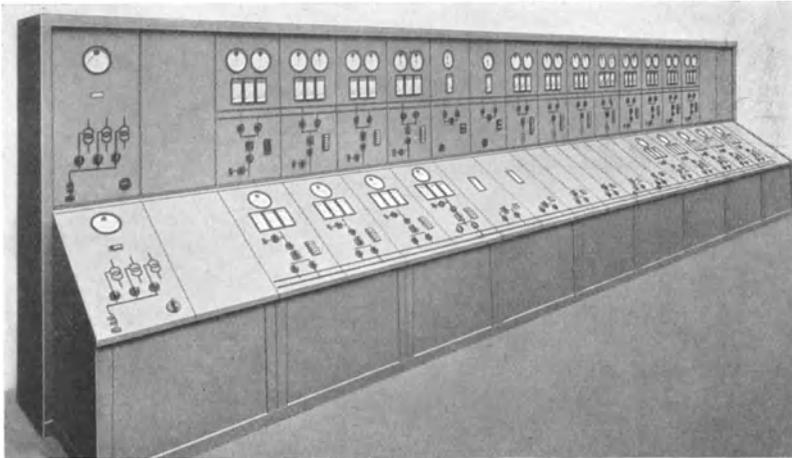


Abb. 424. Schaltpult und Schaltwand zusammengebaut mit Blindschaltbildern.

Das **Schaltpult** (Abb. 425 und 426) ist hinsichtlich seiner Übersichtlichkeit begrenzter auch dann, wenn die Meßgeräte auf einer schräggestellten

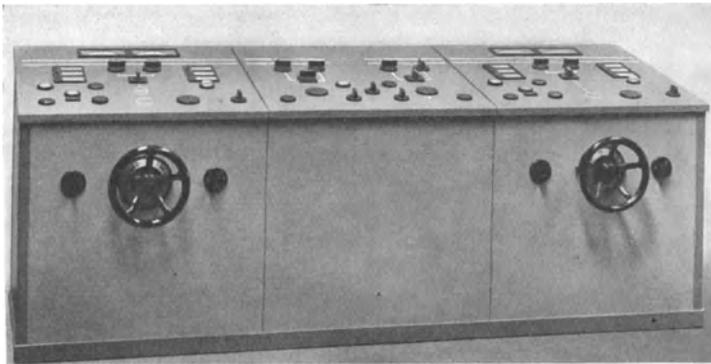


Abb. 425a. Freistehendes Schaltpult geschlossen.

Ansatzfläche (Abb. 426) untergebracht werden. Ferner ist die Zugänglichkeit zu den Leitungen und Anschlüssen naturgemäß umständlicher. Es ist dazu erforderlich, entweder die Pultplatte in einzelne hochklappbare Teile zu zerlegen (Abb. 426), oder die Rückwand zu entfernen (Abb. 425b). Die erste Form ist betrieblich nicht sehr erwünscht, weil

sie die Bedienung hindert und Arbeiten zumeist nur im abgeschalteten Zustand des betreffenden Pultteiles gestattet.

Ist unter dem Schaltpult ein Kabelkeller vorhanden, so kann nach Abb. 427 unter dem Schaltpult ein Arbeitsgang geschaffen werden, von

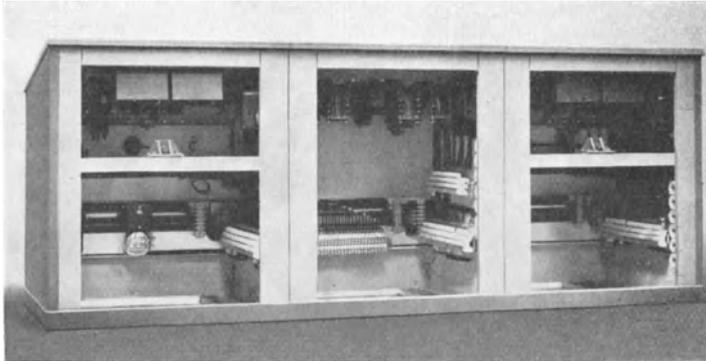


Abb. 425b. Rückseite des Schaltpultes nach Abb. 425a. Verkleidungsbleche entfernt.

dem aus Untersuchungen und Instandsetzungsarbeiten, auch Neuverlegen von Leitungen u. dgl. vorgenommen werden können. Die spannung-



Abb. 426. Freistehendes Schaltpult geöffnet.

führenden Anlagenteile sind durch Abschlußplatten gegen Berührung abzudecken. Eisernes Gitterwerk statt dieser Blechplatten ist zu vermeiden, um jede Gefährdung durch unachtsames Hineinstecken von Werkzeug, Drahtenden und ähnlichem auszuschließen.

Die gegenseitige Aufstellung von Schaltpult und Schaltwand läßt zwei Lösungen zu. Bei derjenigen nach Abb. 428 und 429 hat

der Schaltwärter beim Schalten das Gesicht nach dem Maschinenraum. Er kann infolgedessen auch Vorgänge an den Maschinen überblicken. Diese Anordnung ist von Vorteil, wenn eine Verständigung zwischen Schalttafel- und Maschinenwärter gut und zuverlässig möglich ist, wenn also der Maschinenraum nicht zu große Abmessungen aufweist. Befindet sich dagegen die Schaltbühne an einer Stirnwand oder bei einer großen Längenausdehnung in der Mitte des Maschinenraumes, so hat die Aufstel-

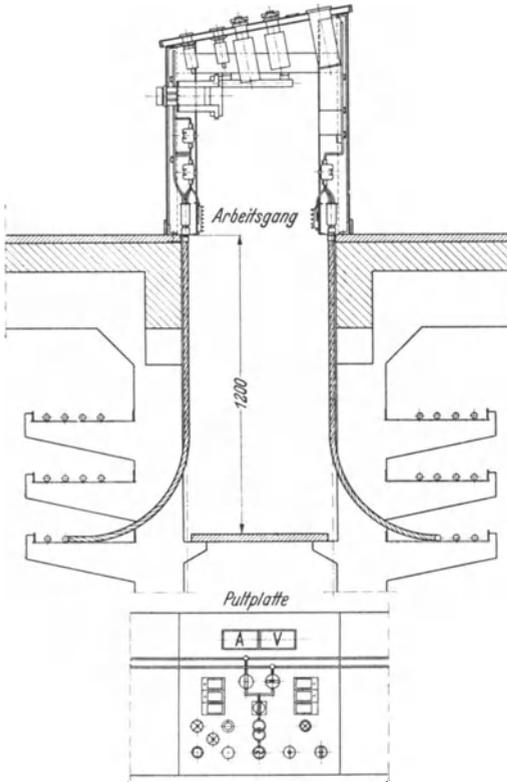


Abb. 427. Schaltpult mit Kabelführung und Arbeitsgang.

lung des Schaltpultes mit dem Blick zu den Maschinen nur beschränkten Wert (Abb. 431), ist in kleineren Werken unter Umständen sogar unvorteilhaft. Der Schaltwärter könnte durch unbeabsichtigte Zeichen oder an sich belanglose Vorgänge im Maschinenraum, die er nicht genau erkennen kann, verleitet werden, bestimmte Schaltungen anders vorzunehmen oder gar zu unterlassen, obgleich hierzu kein Grund vorliegt. In solchen Fällen ist es besser, wenn von der Schaltbühne aus der Maschinenraum z. B. beim

Parallelschalten von Stromerzeugern nicht übersehen wird, wenn also die Schalttafelbedien-

ung völlig unabhängig von den Vorgängen im Maschinenraum ist. Das wird durch Drehen des Schaltpultes um 180° erreicht. Dann kann der Schaltwärter sowohl die Geräte des Schaltpultes als auch diejenigen auf der Schaltwand, ohne seinen Platz zu verlassen oder sich umdrehen zu müssen, übersehen (Abb. 430). Da das Schalten und Regeln der Maschinen nur nach den Lastverhältnissen zu erfolgen hat, ihr eigenes, ordnungsmäßiges Arbeiten schon an den Meßgeräten auf dem Schaltpult zu erkennen ist, so sollte auch aus diesem Grund die Bedienung des Schaltpultes nach der Schaltwand gerichtet sein. Hinzu kommt, daß zum Einregeln einer parallelzuschaltenden Maschine heute die Drehzahlverstellung auf elektrischem Weg stets vom Schaltwärter unmittelbar vorgenommen wird.

Kann infolge beschränkter Raumverhältnisse die Aufstellung von

Wandtafeln und Schaltpult nicht durchgeführt werden, wie das in Umformerwerken vorkommt, weil gerade bei diesen Anlagen, die sich zu-



Abb. 428. Schaltwarte eines Dieselmotorkraftwerkes mit Schaltpult für die Maschinen und Schalttafeln für die 15-kV-Verteilung (Ausblick in den Maschinenraum).

meist in bewohnten Gegenden befinden, der Grund und Boden sehr teuer ist, also hinsichtlich der Raumabmessungen unbedingt gespart

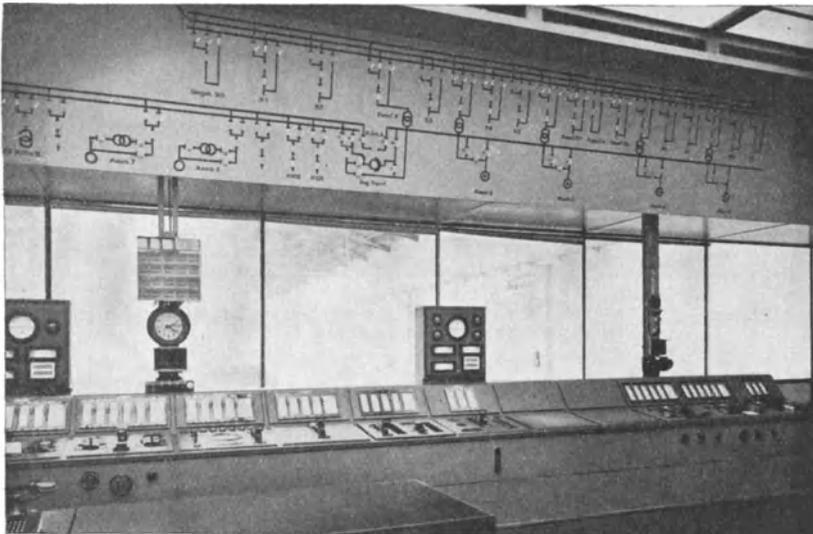


Abb. 429. Schaltwarte mit Schaltpult für die Dampf-Turbomaschinen (Überblick über den Maschinenraum) und Blindschaltbild.

werden muß, so kann man das Schaltpult auch unmittelbar mit der Wandschalttafel zusammenbauen. Ein Ausführungsbeispiel hierfür zeigt

Abb. 424. Diese Form hat wohl den Vorteil der geringen Raumerfordernis und der Vereinigung aller Schaltgeräte zu geschlossenen Gruppen, aber den Nachteil, daß die Übersicht stark beeinträchtigt wird.

Der Platz für die Bedienungsanlage. Kann sie im Maschinenraum selbst untergebracht werden, was jedenfalls bei kleineren Anlagen und bei Gleichstromanlagen schon aus Ersparnis an Bedienungsleuten stets

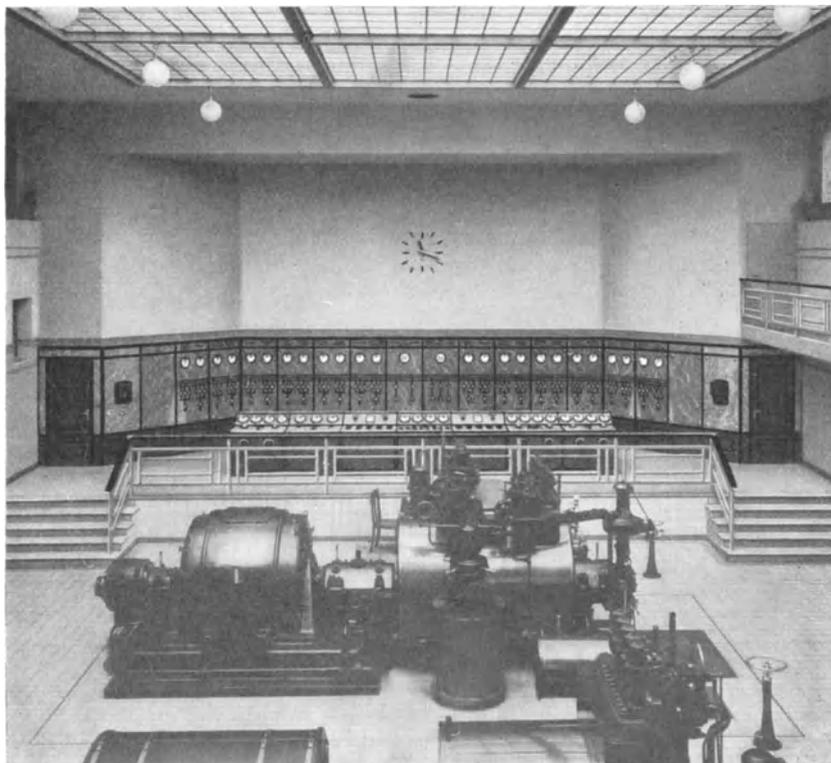


Abb. 430. Schaltpult und Schaltwand erhöht auf Maschinenhausflur für ein Dampfturbinen-Industriekraftwerk (A. Junghanns, E. G. Breslau).

anzustreben ist, so hat sie dort nur dann einen Zweck, wenn ihr der betrieblich richtige Platz zugewiesen werden kann. Dieser richtet sich nach der Aufstellungsform der Maschinen zueinander, der Höhe der Maschinen über dem Maschinenhausflur und der Größe des Maschinenraumes (Abb. 431). Bei höher bauenden Maschinen wie Kolbenmaschinen und Wasserturbinen geringer Drehzahl muß sie erhöht entweder auf einem Podium oder auf einer Galerie untergebracht werden (Abb. 430 und 445a). Der Raum unterhalb einer Galerie kann zur Unterbringung von anderen Teilen der Schaltanlage oder von Hilfsmaschinen benutzt werden. Aus den folgenden Abbildungen ausgeführter Anlagen ist dieses zu ersehen.

Durch eine zweckentsprechende Aufstellung der Bedienungsanlage kann bei kleineren Werken auch wie oben bereits angedeutet an Bedienungspersonal gespart werden, weil der Schaltwärter zumeist ohne weiteres die Zeit hat, auch die Maschinen zu beaufsichtigen. Zum schnellen Eingreifen bei Störungen, Schalterauslösungen und Betriebsvorkommnissen anderer Art sind dann lauttönende Meldeeinrichtungen zugleich mit weit sichtbaren Anzeigevorrichtungen einzubauen. Der Weg zwischen Schaltstelle und Maschine muß dann einfach und in jeder Weise schnell und sicher begehbar gestaltet sein.

Die Schaltwarte. Ist die Bedienungsanlage unmittelbar mit dem Maschinenraum verbunden, stört aber das Geräusch der laufenden Ma-

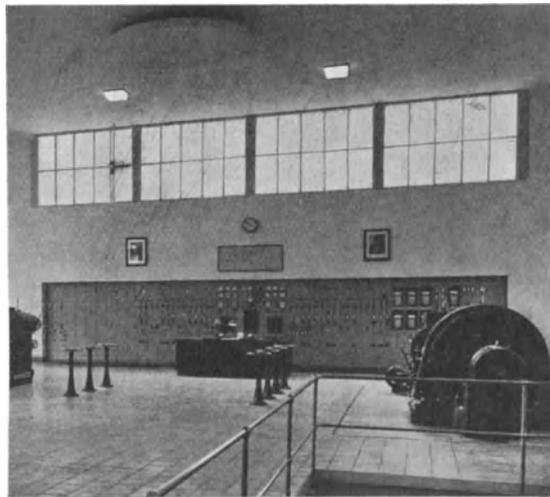


Abb. 431. Schalttafel im Maschinenraum auf Maschinenhausflur.

schinen, und ist auch sonst eine ständige persönliche Verbindung zwischen Schalt- und Maschinenbedienung nicht erforderlich oder unerwünscht, so wird neuerdings die Bedienungsanlage gegen den Maschinenraum durch eine schallsichere Wand abgetrennt. Für den Ausblick nach dem Maschinenraum wird diese Wand durch Fenster unterbrochen (Abb. 250 im Band III/1, Abb. 428 und 429). Dadurch wird die Bedienungsanlage betriebstechnisch vollständig frei von der Maschinenanlage. Man bezeichnet sie dann als Schaltwarte.

In großen Dampfkraftwerken wird diese Schaltwarte schon aus der gesamten Raumeinteilung — dann u. U. auch vollständig getrennt vom Maschinenraum — heute fast stets gewählt. Im Band III/1 sind hierfür einige Beispiele gezeigt worden.

Bei großen Wasserkraftwerken verlangen die hohen Raumbeschaffungskosten, wenn sie aus einer Vergrößerung der teureren Fundamente entstehen, ebenfalls eine Abtrennung aller Nebenanlagen, Nebenräume und damit auch der Bedienungsanlage vom Maschinenhaus. Sie werden

dann in einem besonderen Gebäude in der Umgebung des Kraftwerkes untergebracht.

Bei den Maschinen werden neben Steuer- und Befehlsempfängergeräten nach S. 457 nur Meßgeräte für Leistung oder Strom vorgesehen, da in diesem Fall die Maschinenwärter lediglich die Höhe und die Änderung der Belastung und das sonstige richtige elektrische Arbeiten der Stromerzeuger zu überwachen haben. Irgendwelche Schalter-, Reglerantriebe u. dgl. dürfen dem Maschinenwärter nicht zur Hand gegeben werden, damit er nicht in die Lage kommt, die Vorrichtungen des Schaltwärters ohne dessen Anordnung und Wissen zu stören oder zu beeinflussen, selbst wenn plötzlich eine Störung an einer Maschine eintritt. Die Begründung hierfür liegt darin, daß der Maschinenwärter sich einmal aus den Angaben der Meßgeräte über die Ursachen und sonstigen Erscheinungen bestimmter Betriebsvorgänge kein richtiges Urteil bilden kann, und auch bei Maschinenstörungen erst der Schaltwärter verständigt werden muß, ehe z. B. ein belasteter Stromerzeuger plötzlich abgeschaltet wird. Die Maschinenbedienung darf also in keinem Fall in die Aufgaben der Schaltbedienung eingreifen, weil sonst schwere Betriebsstörungen und Unterbrechungen für die Gesamtanlage die Folge sein können. Der Verkehr zwischen Maschinenraum und Schaltwarte wird dann durch die bereits behandelten Meldeanlagen herbeigeführt, durch die der Maschinenwärter jederzeit in der Lage ist, den Schaltwärter bei Unregelmäßigkeiten an den Maschinen so rechtzeitig zu verständigen, daß letzterer seine Schaltungen, Verschiebungen in den Belastungsverhältnissen der Maschinen u. dgl. entsprechend einrichten kann. Besonders gesichert wird die Maschinenbedienung, wenn Notsignale nach der Schaltwarte gegeben werden können, eine Ausführung, die stets gewählt werden sollte.

Abb. 432 und 433 zeigen die Ausgestaltung solcher Kraftwerkswarten und Abb. 434 den räumlichen Aufbau einer Innenanlage für ein Großkraftwerk mit Eigenbedarfsumspanner und Steuerbatterie.

Der Platzbedarf der Warte für Schaltwände, Schaltpulte, Wärterplätze, Fernsprecher, Nebenanlagen und Verbindung mit Aufenthaltsräumen, Betriebsbüro, Geräteanlagen usw. muß sorgfältig festgestellt werden. Hier ist gegebenenfalls auf Erweiterungen ganz besonders Bedacht zu nehmen. Aus den Angaben in Abb. 435 läßt sich dazu ein ungefähres Bild gewinnen, wenn Breit- oder Schmaltafeln gewählt werden. Bei guter Entwurfsbearbeitung kann viel an Raum und damit an Kosten gespart werden.

Ohne auf weitere Einzelheiten näher einzugehen, die aus dem bisher Gesagten unschwer festzustellen sind, wird bei neuzeitlichen Dampfkraftwerken in der Warte auch die gesamte Kesselsteuerung vereinigt und dadurch die Betriebsüberwachung und die Betriebsführung an eine Stelle zusammengezogen. Die heutigen Fernmeß- und Fernsteuereinrichtungen sind bereits soweit durchgebildet und im praktischen Betrieb erprobt, daß Bedenken hinsichtlich Zuverlässigkeit und Sicherheit nicht erhoben werden können. Für Großwerke im Verbundbetrieb ergibt sich daraus auch die Möglichkeit des besten wirtschaftlichen Einsatzes aller Betriebsmittel und eine vereinfachte Betriebsleitung. Allerdings kommt

dazu die ständige Überwachung der Übertragungsanlagen zur Warte, die ein entsprechend vorgebildetes und straff geschultes Personal ver-



Abb. 432. Schaltwarte mit Schalttafeln; fahrbare Parallelschaltmeßgeräte.

langt. Ersparnisse an laufenden Betriebsausgaben sind mit einer solchen Mechanisierung des Gesamtbetriebes kaum zu erzielen.



Abb. 433. Schaltwarte mit Schaltpulten für die Maschinen und Schalttafeln für die Verteilungsanlagen.

Für Wasserkraftwerke insbesondere auch für Pumpspeicherwerke ist eine zusammengefaßte Steuerung von der Warte aus vom Öffnen der Rohrverschlüsse bis zum Parallelschalten auf das Netz schon mehrfach ausgeführt worden. Selbst bei größten Maschineneinheiten können

dadurch für das Zuschalten eines Maschinensatzes oder für das Übergehen aus dem Liefer- in den Pumpbetrieb und umgekehrt Zeiten bis herab zu 1 Min. erreicht werden.

Die Schaltwarte großer Kraftwerke muß infolge der allgemeinen Raumeinteilung sehr oft innerhalb der Gesamtgebäudeanlage an einen

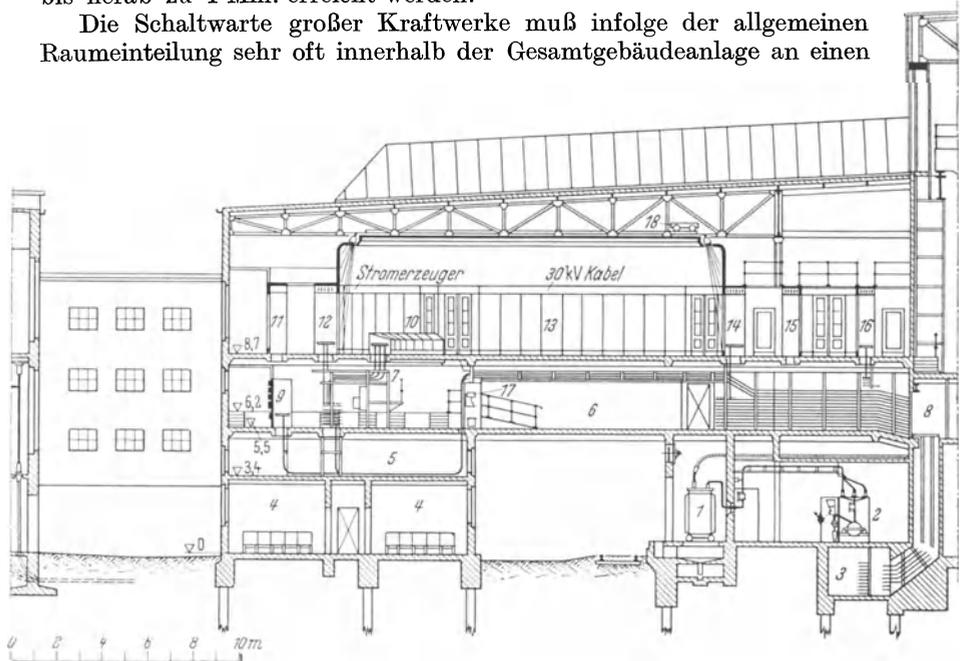


Abb. 434. Schaltwarte mit Steueranlagen für ein Großkraftwerk.

- 1 Eigenbedarfsumspanner,
- 2 Eigenbedarfsschaltanlage,
- 3 Kabelkeller für Steuer- und Meßkabel,
- 4 Batterie,
- 5 Kabelzwischenboden,
- 6 Verbindungsgang,
- 7 Kabelzwischenboden,
- 8 Kabelschacht,
- 9 Zählerschalttafel,
- 0 Schaltwarte, Schaltpult,
- 11, 12 Schaltwände für Meßwerke,
- 13 bis 16 Schaltwände für Abgänge,
- 17 Meßwandler,
- 8 Wagen für Oberlichtbedienung.

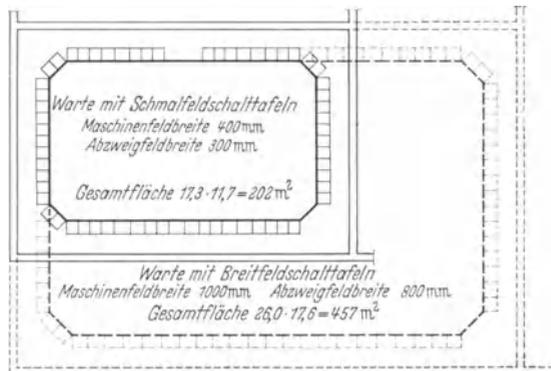


Abb. 435. Vergleichende Darstellung des Grundflächenbedarfes für Schaltwarten mit schmalen und breiten Schalttafeldern.

Platz gelegt werden, der entweder vollständig eingebaut ist und von keiner Stelle natürliche Tagesbeleuchtung erhalten kann, oder diese nur durch Oberlichter zu gewinnen ist. In beiden Fällen ist die blendungs-

und schattenfreie natürliche und künstliche Beleuchtung der Schaltwände und Schaltpulte eine sehr schwer zu lösende Aufgabe. Der Betrieb muß aber unter allen Umständen verlangen, daß alle Meßgeräte, Meldelampen, leuchtende Schaltbilder zu allen Zeiten von allen Stellen der Warte ohne Standortsveränderung sicher erkennbar sind. Für die künstliche Beleuchtung ergeben Strahler über den Oberlichtern, seitliche Lampen, mittelbare Lichtverteilung über Rückstrahler und eine entsprechend ausgebildete Raumdecke nur selten die volle Erfüllung der Beleuchtungsbedingungen. Neuerdings ist daher dieser Frage ganz besondere Aufmerksamkeit zugewendet worden. Abb. 436 zeigt

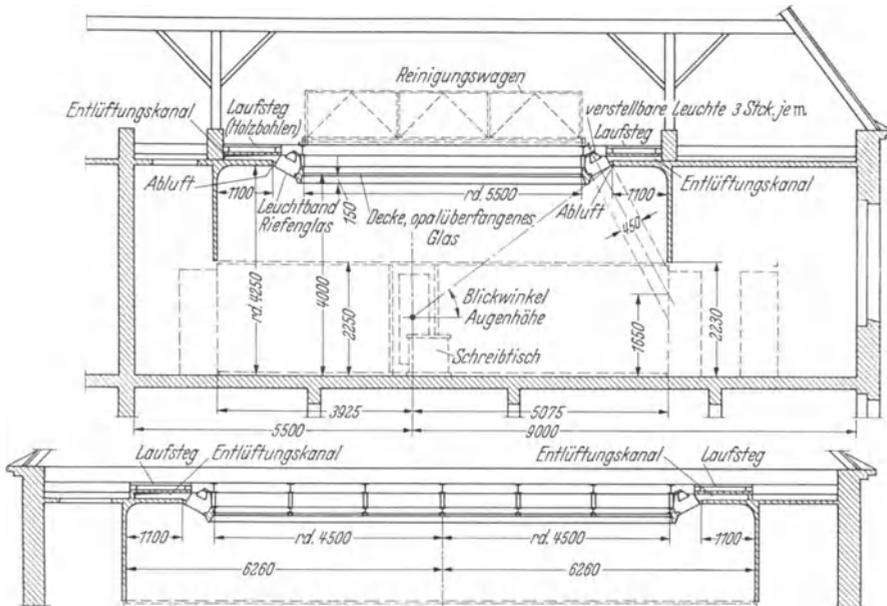


Abb. 436. Schnittzeichnung für die blendungs- und schattenfreie künstliche Beleuchtung einer Schaltwarte (Wutenbeleuchtung).

eine Lösung durch Wutenbeleuchtung, die allen Anforderungen zu entsprechen in der Lage ist. Aus dem Vergleich der Abb. 437a und b bei Tages- und künstlichem Licht ist zu ersehen, daß bei dieser Art der Beleuchtung ein bemerkenswerter Unterschied nicht mehr wahrgenommen werden kann.

In der Schaltwarte sind auch sämtliche Fernsprech- und sonstigen Meldeanlagen zu vereinigen und am zweckmäßigsten auf einem Schreibtisch unterzubringen, der dem aufsichtsführenden Schaltmeister zugleich als Arbeitstisch dient¹.

Wesentlich für die bauliche Durchbildung der Schaltwarte ist ferner die Verlegung der Steuerkabel, die stets in sehr großer Zahl erfor-

¹ Plechl, O.: Die Ausrüstung von Lastverteilstellen für große Netze. BBC.-Nachr 1937 S. 103.

derlich sind. Entweder werden sie im Fußboden in einem besonderen Kabelboden untergebracht oder auch aus der Decke heruntergeführt.

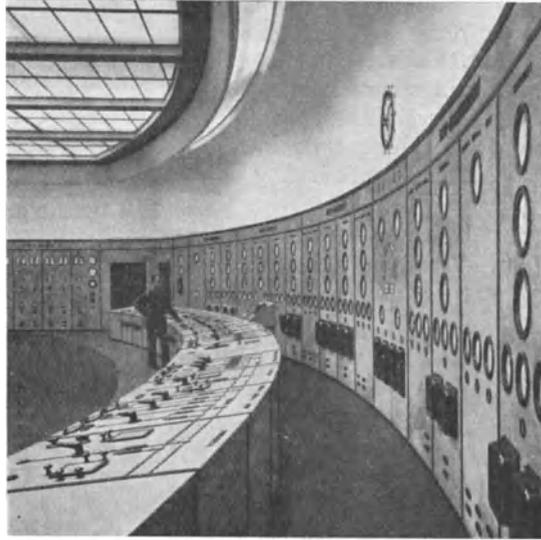


Abb. 437a. Warte mit Maschinenschaltpult und Hauptschaltwand bei Tageslicht.

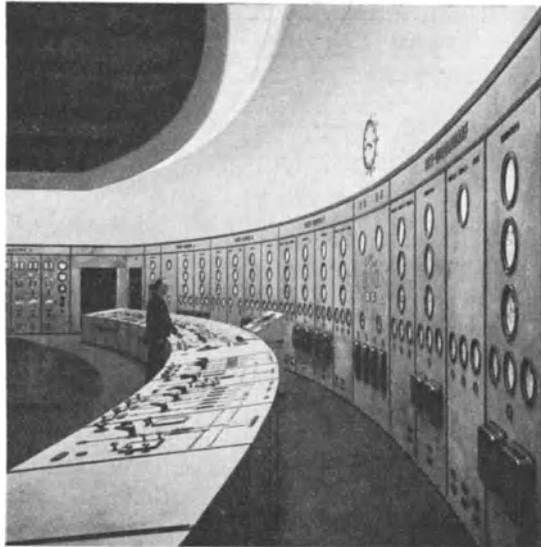


Abb. 437b. Warte mit Maschinenschaltpult und Hauptschaltwand bei künstlicher Beleuchtung.

Die Verlegungsform richtet sich nach den örtlichen Verhältnissen. Besonders ist dabei zu verlangen, daß keine Ratten und Mäuse, keine Rei-

nigungsabwässer und dgl. in die Kabelräume eindringen können, daß jederzeit leicht an alle Kabel herangekommen werden kann, daß auch Auswechslungen oder Hinzufügen neuer Kabel ohne Schwierigkeiten und ohne Betriebsstörungen durchführbar sind. Dabei ist auf das Heranbringen der Kabeltrommeln bei der Bemessung der Zuwege, Durchgänge und Türen zu achten. Um die Ausbreitung eines Kabelbrandes einzuschränken, sind streckenweise feuersichere Abschlüsse durch Mauerwerk oder Sand vorzusehen. Die hierzu verwendeten Baustoffe dürfen aber keine chemischen Angriffe auf die Kabelumhüllungen herbeiführen. Auch dieses ist nicht zu vergessen. Jedes Kabel ist besonders zu kennzeichnen.



Abb. 438. Kabelkeller für Haupt- und Steuerkabel.

Abb. 438 zeigt einen Kabelkeller mit eisernen Pritschen. Die Übersicht ist gut, die Anlage an sich als allen Ansprüchen entsprechend zu bezeichnen.

Werden die Steuer- und Meldeleitungen als einfache Leitungen mit besonderer Isolation in Rohren verlegt, so muß auch dann die Leitungs- oder Rohrführung mit guter Übersicht und Sorgfalt vorgenommen werden. Das gibt für den späteren Betrieb große Erleichterungen in der Prüfung, der schnellen Fehlerrückmeldung und -beseitigung. Die Kabel- und Steuerleitungspläne einer Anlage müssen auf das genaueste aufgenommen und jederzeit auf dem laufenden gehalten werden. Bei der Übernahme der Bauten durch den Betrieb müssen diese Pläne bereits vorliegen.

Schließen sich an die Warte noch Räume für Schaltwärter, Betriebsleiter, Aufenthalt an, so sollen sie in ihrer Lage so gewählt werden, daß der Verkehr die Schaltwärter im Dienst nicht stört oder behindert. Dazu gehört Vermeidung von Treppen und Durchgangsverkehr, richtiges Aufschlagen der Türen, Verhütung von Zugluft.

Das Leuchtschaltbild¹. Auf allen Wand- und Pultschalttafeln wird

¹ Dietzel, W.: Die Grundformen der BBC-Leuchtbilder. BBC-Nachr. 1937 S.126. Zeidler, Fr.: Das Baustein-Schaltbild, ein neues Hilfsmittel für die Betriebsüberwachung. AEG-Mitt. 1939 Heft 5 S. 257.

das zugehörige Schaltbild einpolig mit allen Kennzeichen durch besondere farbige Leisten aufgetragen, in die die Schalterstellungenlampen oder sonstige Anzeigevorrichtungen mit farbigen Leuchten, drehbaren Strichplatten u. dgl. so eingebaut sind, daß der Schaltwärter jederzeit die Stellung aller Trenn- und Leistungsschalter zu den Sammelschienen und den abgehenden Stromkreisen unmißverständlich erkennen kann. Auch Röhrenleuchten mit unterschiedlichen Lichtfarben für die Sammelschienen und die Schalterstellungen sind im Gebrauch. Aus den vorhergegangenen Abbildungen sind diese Leuchtschaltbilder zu ersehen.

Werden Lampen für die Schalterstellungen verwendet, so gibt man der Stromzuführung einen Hauptschalter, der sämtliche Lampen gleichzeitig ein- und ausschaltet, um im Gefahrsfall durch das Einschalten der

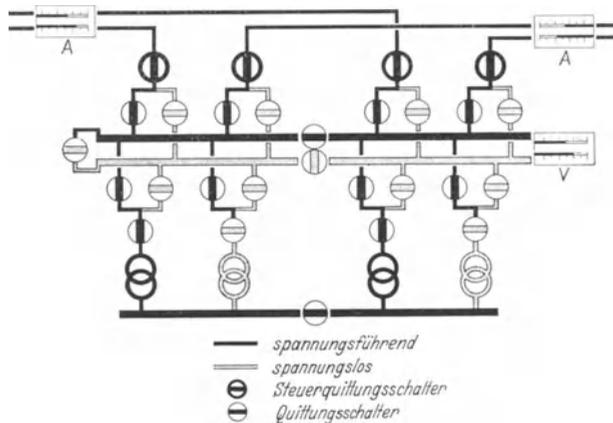


Abb. 439. Leuchtschaltbild mit Rückmeldung und Quittierung.

Leuchtschaltbilder besser für das Auge die Schalterstörung erkennen zu können und zudem bei Ruhe im Betrieb an Strom und Lampen zu sparen.

Die selbsttätigen Schalterstellungszeiger nach Abb. 439 sind oft noch besser als die Lampen und zeigen zudem dauernd ihre Stellung, so daß das Zu- und Abschalten entfällt. Außerdem vermeiden diese Anzeigevorrichtungen eine Unsicherheit, die bei den Lampen im Durchbrennen des Leuchtfadens liegt und unter Umständen zu längerem Fehlersuchen, auch zu Fehlschaltungen führen kann.

Das Leuchtschaltbild auf der Schaltwand oder dem Schaltpult muß derart angeordnet sein, daß eindeutig nach ihm geschaltet werden kann, daß es also jederzeit im blendungsfreien Blickfeld des Schaltwärters liegt und jede Veränderung im Netzzustand klar, eindeutig und schnell erkennen läßt (Abb. 440). Blindschaltbilder, an denen Änderungen des Schaltzustandes von Hand vorgenommen werden müssen, sollen möglichst nicht zur Anwendung kommen, da an diesen Irrtümer nicht vermeidbar sind.

Die Netzbefehlsstelle (Hauptkommandostelle, Hauptlastverteiler). Für große Netze mit mehreren Kraftwerken, großen Verteilungsleitungen, verbundbetrieblichem Zusammenschluß mit benachbarten Anlagen und zahlreichen Umspannwerken im Ringbetrieb wird die gesamte Betriebsführung in einer Netzbefehlsstelle zusammengefaßt. Die selbständigen Aufgaben und Schalthandlungen der einzelnen Kraft- und Schaltwerke werden dadurch zum größten Teil aufgehoben. Nur den Anordnungen der Netzbefehlsstelle ist zu folgen. Sie setzt auch die Fahrpläne der einzelnen Kraftwerke fest, bestimmt die Frequenz- und Regelmaschinen, die Ausnutzung von Fremdstrombezug und das Zusammenarbeiten mit den verbundenen anderen Unternehmungen.

Je nach dem Umfang der Zusammenfassung erhält die Netzbefehlsstelle Einrichtungen zur Fernmessung, Fernsteuerung und Fernmeldung,

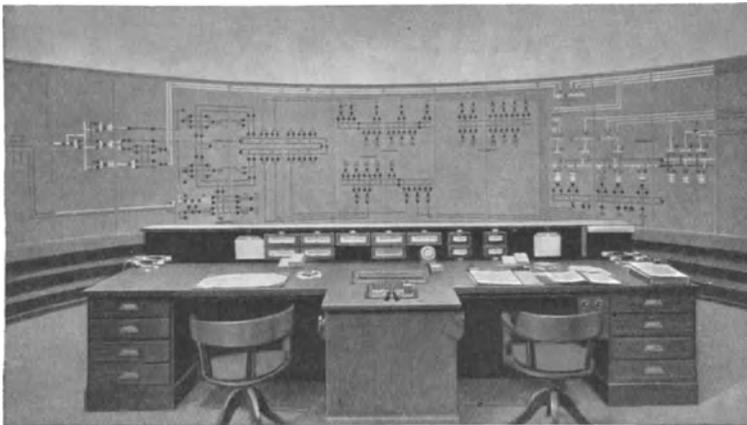


Abb. 440. Lastverteiler mit Blindschaltbild der Gesamtanlage.

sowie Fernsprechanlagen nach allen für die Netzregelung und die Bedarfsdeckung wichtigen Stellen entweder nur mit einem persönlichen Verkehr für die Ausführung von Handlungen oder mit unmittelbarer Beeinflussung der Steuerstellen.

Für die Ausgestaltung einer Netzbefehlsstelle ergeben sich die Richtlinien aus den gestellten Aufgaben, die nach zwei Seiten zu unterscheiden sind. Die erste bezieht sich auf die eigentliche Sicherung des Betriebes bei Störungen und deren schnellster Behebung, die zweite auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtbetriebes also auf die Überwachung des wirtschaftlichen Einsatzes und die beste Ausnutzung aller Betriebsmittel, Leitungen usw. Demnach haben sich die Einrichtungen der Netzbedarfsstelle bei vollständiger Ausrüstung zu erstrecken auf:

die Fernmessung der verschiedenen Werte für Wirk- und Blindstrom, Leistungsfaktor und Spannung in Bezug und Lieferung, gegebenenfalls für die Prüfung und Auswertung der verschiedenen Betriebsvorgänge mit zusätzlichen Schreibgeräten;

die Fernmeldung der Schalterstellungen für Trenn- und Leistungsschalter, Spannungsregelschalter und sonstige Meldestellen, wie Gefahrmelder für Temperatur und dergleichen, mit oder ohne Rückmelder;

die Fernschaltung für die Schalter, die Maschinenregler und besondere Fernumschaltungen oder Fernbefehle.

Über die Fernsprechanlagen ist dem bisher Gesagten nichts Grundsätzliches hinzuzufügen.

Um das gesamte Netz mit allen seinen Anlagen und Einrichtungen stets dem augenblicklichen Schalt- und Betriebszustand entsprechend in der Netzbefehlsstelle vor Augen zu haben, wird wiederum das Leuchtschaltbild benutzt, das heute für diese Zwecke besonders vorzüglich ausgebildet wird. Abb. 440 zeigt eine solche Netzbefehlsstelle.

Auf die technische Durchbildung der Fernübertragungseinrichtungen soll nicht näher eingegangen werden. Es gibt hierzu ein umfangreiches Sonderschrifttum, auf das verwiesen werden muß. Nur eines ist betrieblich besonders zu unterstreichen und zwar die unbedingte Betriebszuverlässigkeit der gesamten Übertragungsanlagen, wobei auf die Bemerkungen auf S. 489 nochmals hingewiesen werden soll.

Über die bauliche Gestaltung einer solchen Netzbefehlsstelle gilt das zur Warte Gesagte in gleichem Maß. Platz muß vorhanden sein, damit auch Schaltpläne bearbeitet, zeichnerische Feststellungen gemacht und vor allen Dingen in Ruhe und ohne jegliche persönliche Beschränkung die Leitung des Betriebes durchgeführt werden kann.

d) Die Geräteanlagen bis 1000 V werden ähnlich wie bei Niederspannung zusammengebaut. Bei größeren Leistungen, Doppelsammelschienen und besonders bei großen Kurzschlußkräften wird die Geräteanlage von der Schaltwand räumlich getrennt und je nach den Raumverhältnissen hinter dieser oder über bzw. unter derselben in besonderen Eisen- neuerdings auch Betongerüsten mit Isoliertrennwänden aufgebaut.

Die kürzeste und klarste Leitungsführung ergibt sich bei Aufstellung der Schaltgerüste hinter der Schalttafel. Damit wird gleichzeitig der Vorteil kürzester Wege für die Beaufsichtigung verbunden. Auch bei Verwendung von ölarmen oder öllosen Leistungsschaltern ist jeder Stromkreis durch Zwischenwände zu trennen.

Von den vielen Möglichkeiten des Aufbaues der Gerätezellen zusammen mit der Schaltwand¹ sind in Abb. 441 einige grundsätzliche Ausführungen für Einfach sammelschienen und in Abb. 442 für Doppelsammelschienen zusammengestellt, die dem Entwurfs- und Betriebsingenieur manche Fingerzeige für die Beurteilung von Angebotsunterlagen oder Umbauten geben werden. Aus solchen Bauelementen wird die Schaltanlage zusammengesetzt. Einheitliche Gesichtspunkte müssen dabei ganz besonders im Vordergrund stehen. Zu den Aufbauformen ist Besonderes nicht zu erwähnen. Die Lage der Schalter und Sicherungen oder der Selbstschalter, der Berührungsschutz, die Leitungsführung, die Antriebe für Leistungs- und Trennschalter und die Stromzu- und -abführung, die stets in Kabeln vorgenommen wird, sind aus den Einzel-

¹ Meiners, G: Der Aufbau der „AEG-Regelbauweise“ von Hochspannungsschaltanlagen. AEG-Mitt. 1938 Heft 11 S. 506.

zeichnungen klar erkennbar. Der Maßstab gibt die Möglichkeit, den Platz- und Raumbedarf für vorbereitende Arbeiten festzustellen.

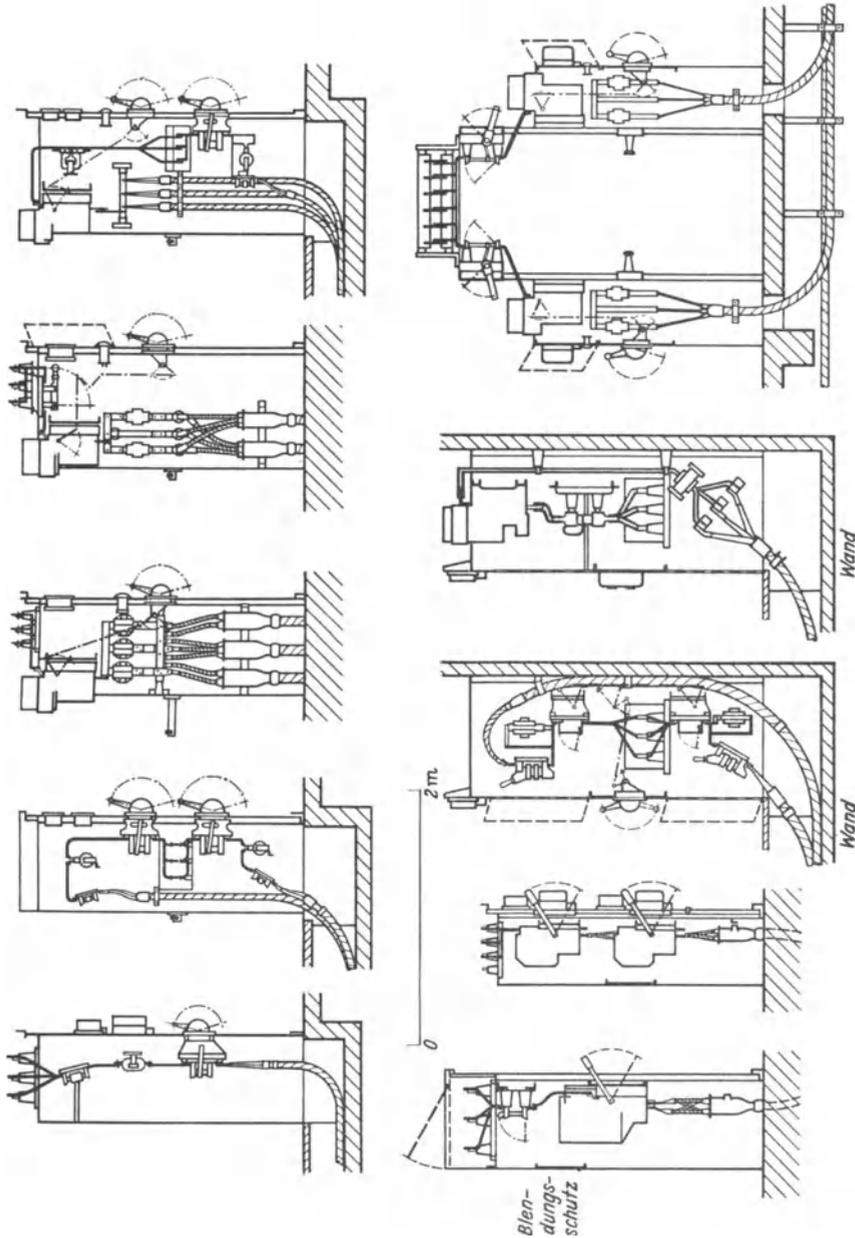


Abb. 441. Zellenaufbau für Schaltanlagen bis 1000 Volt mit Einfachsammschienen (SSW).

e) Die Geräteanlagen über 1000 V. Die kleinen Kraftwerksschaltanlagen — im Gegensatz zu den Umspannungsschaltanlagen — werden bei Span-

Kyser, Kraftübertragung. III/2. 3. Aufl.

nungen bis 3 kV, sofern es sich um gleiche Maschinen- und Verteilungsspannung handelt, und die räumliche Ausdehnung nicht groß ist, mit

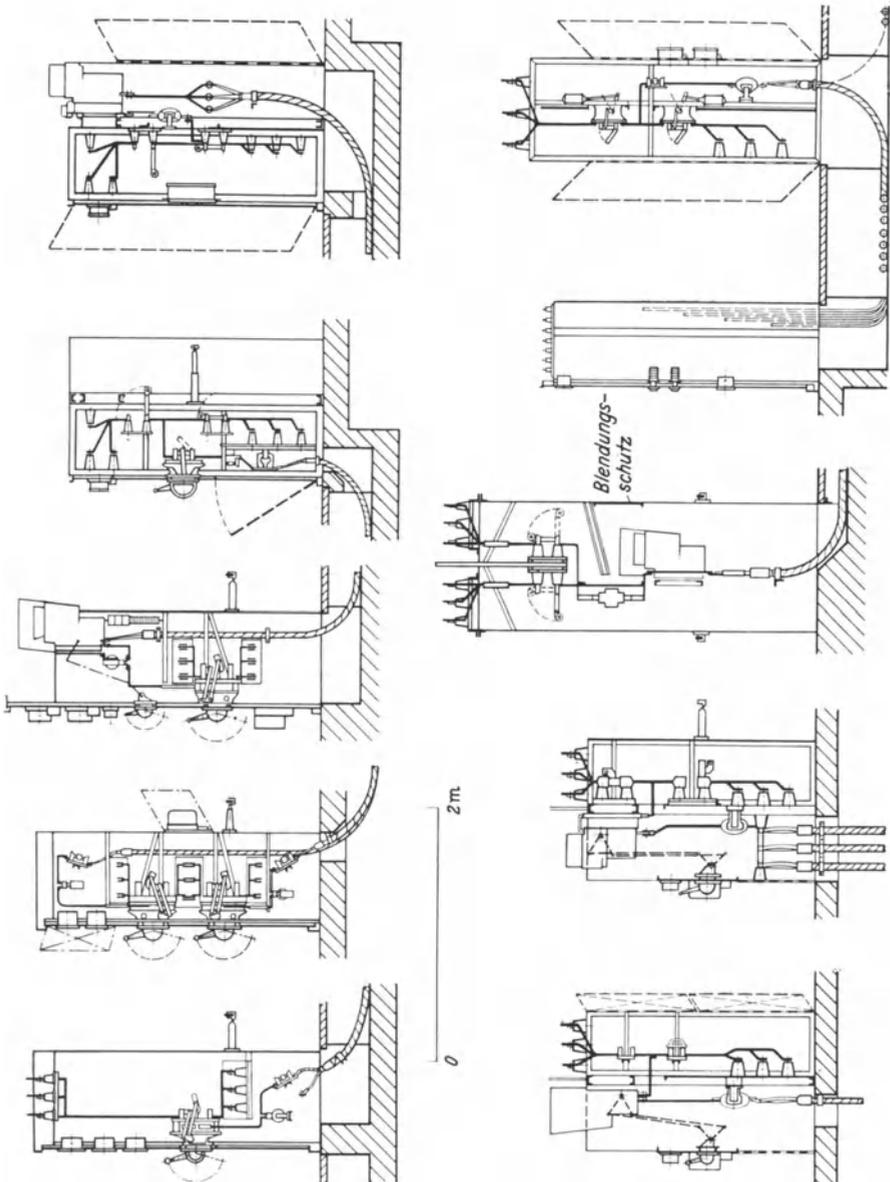


Abb. 442. Zellenaufbau für Schaltanlagen bis 1000 Volt mit Doppelsammelschienen (SSW).

der Bedienungsanlage wiederum zusammengebaut (Abb. 443). Reicht der verfügbare Platz nicht aus, dann muß in Stockwerken je nach den abgehenden Leitungen als Freileitung oder Kabel nach oben oder unten

gebaut werden. Das im folgenden zur Stockwerkbauweise Gesagte gilt auch hier. Abb. 444 zeigt eine Ausführung mit Kabel- und Freileitungsabgängen. Bei höheren Spannungen, größeren Leistungen und umfangreichen Maschinenanlagen muß die Geräteanlage von der Schaltstelle — der Schaltwand, dem Schalterpult oder der Schaltwarte — vollständig räumlich getrennt werden. Das bedingen die größeren Breitenabmessungen jeder Schaltzelle nach den Phasenabständen, ferner die größeren Abmessungen der Schaltgeräte an sich, dann die Zahl der Meßwandler, Trennschalter, Hilfseinrichtungen, Sammelschienen usw. Die gesamte Maschinenanlage wird dann grundsätzlich von der

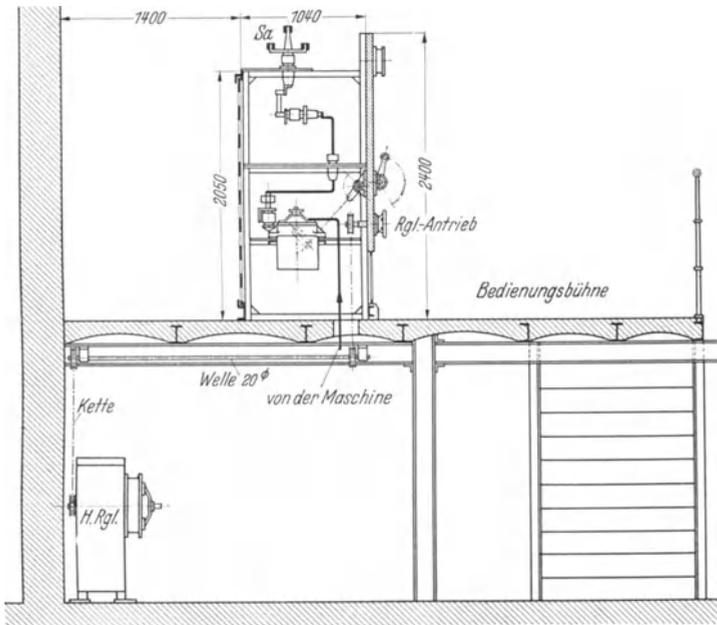


Abb. 443. 3-kV-Maschinenschaltanlage, erhöhte Aufstellung über Maschinenhausflur; Schaltgerüst und Bedienungsfläche zusammengebaut (ältere Bauform).

Schaltwand, dem Schalterpult oder der Schaltwarte aus ferngeschaltet, ferngesteuert und fernüberwacht. Für die Verteilungsanlage wird entweder die gleiche Steuerform gewählt, oder die Schalthandlungen werden vom Bedienungsgang in der Geräteanlage ausgeführt. Zu diesem Zweck sind Bedienungsschränke vorzusehen, die mit den Schaltzellen entweder zu einer Einheit zusammengebaut oder im Bedienungsgang gesondert aufgestellt werden. Meist wird in den Schränken noch das eine oder andere Meß- und Schutzgerät vom Bedienungsgang aus ablesbar angeordnet, damit auch in der Schaltgeräteanlage selbst der Schaltzustand der Anlage übersehen werden kann.

Ist die Spannung für die Verteilungsanlagen gleich der Maschinenspannung, dann wird die Geräteanlage je nach den Raumverhältnissen an eine Längs- oder Stirnseite des Kraftwerkes angebaut

und notfalls wiederum auf mehrere Stockwerke verteilt. Anzustreben ist aus betrieblichen Gründen, die Mehrstockbauweise tunlichst zu vermeiden und die Einstockbauweise durchzusetzen. Bei der Verwendung von ölarmen oder öllosen Schaltern und damit dem Fortfall von geschlossenen Kammern ist heute die Einstockbauweise zumeist ohne beson-

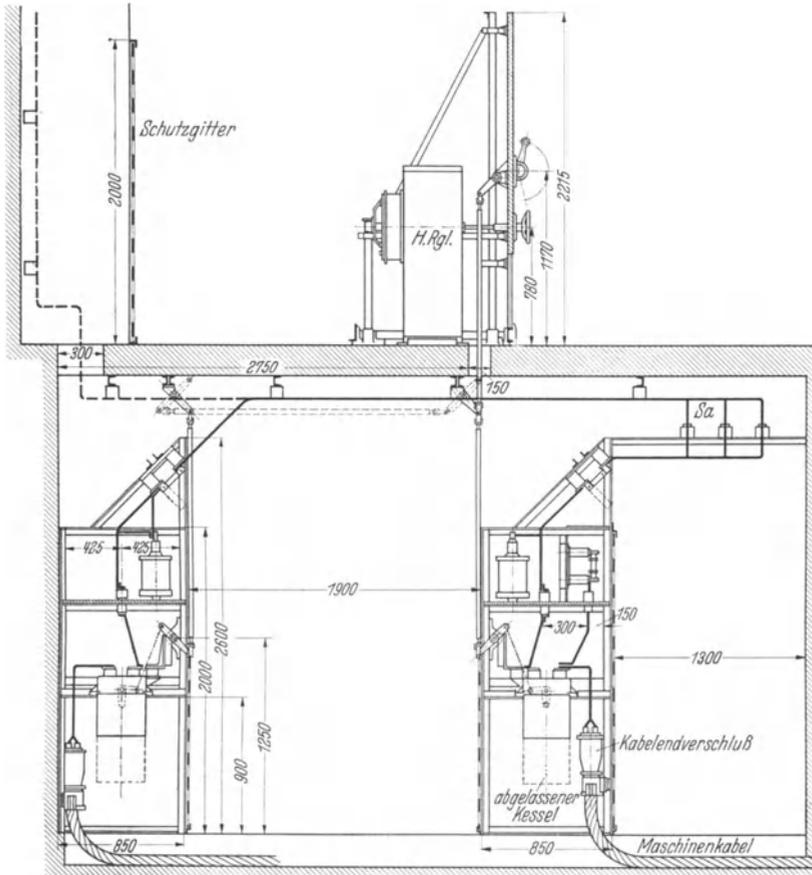


Abb. 444. 3-kV-Maschinen- und Verteilungsschaltanlage, Bedienungstafel und Schaltgerüste untereinander (ältere Bauform).

dere Schwierigkeiten möglich. Sie gibt die billigsten Baukosten, die beste Betriebsübersicht auch für alle Schaltungen innerhalb der Geräteanlage, die einfachste Baudurchbildung, die leichteste Durchführung von Instandsetzungsarbeiten, dazu Ersparnisse an Isolatoren und Durchführungen also an Fehlerquellen recht beachtlicher Art. Um diese Vorteile zu gewinnen, sind, wenn der verfügbare Raum nicht alle Anlagenteile auf eine Fußbodenhöhe unterzubringen gestattet, die Schalter mit ihrem Zubehör und die Sammelschienen mit allen Trennschaltern, sowie alle

Meßwandler und Schutzdrosselspulen in diesem Hauptteil der Schaltanlage zu vereinen und alle Nebenanlagen wie Batterie, Druckluft-erzeugung, Fernsprechanlagen, Unterkunftsräume u. dgl. auf die Stockwerke unter oder über der Geräteanlage zu verteilen. Auch die Lage der Schaltwand oder der Schaltwarte kann unabhängig davon gewählt werden, wenn nur erreicht wird, daß die Hauptgeräteanlage als geschlossenes Ganzes aufgebaut werden kann.

Die Mehrstock-, selbst schon die Zweistockbauweise hat viele Nachteile, von denen die Unübersichtlichkeit bei der Aufsicht und bei Schalthandlungen, ferner die längeren Bedienungswege und die Treppen besonders hervorzuheben sind. Bei sehr umfangreichen Verteilungsanlagen müssen dann auch die Trennschalter ferngesteuert werden, um die bei Handschaltung vom Bedienungsgang aus gefürchteten Fehlschaltungen beim Stromkreiswechsel zu verhindern, gleichzeitig auch die Bedienung bei Instandsetzungsarbeiten vor Gefährdungen durch falsches Trennschalterziehen zu schützen. Ferner wird die Zahl der Isolatoren und Durchführungen und damit diese Art der Fehlerquellen unerwünscht groß.

Liegen zwischen Maschinensammelschienen und Verteilungsanlagen Umspanner, dann gewinnt die Schaltanlagendurchbildung wieder ein anderes Bild. Sind Unterspannungsschalter vorhanden, werden diese zumeist in die geschlossene Maschinenschaltanlage einbezogen, und von hier ab beginnt das eigentliche Umspannwerk bis zur Ober-spannung, das dann oft als getrennte Schaltanlage angegliedert wird.

Bei der Kurzkupplung wird die Maschinenanlage am einfachsten nach jeder Richtung hin. Das Umspannwerk wird in diesem Fall zumeist vollständig getrennt aufgestellt.

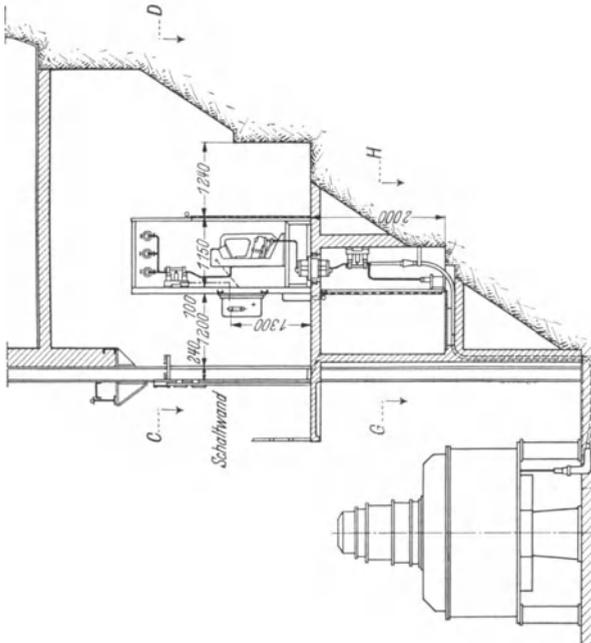
Liegt das Kraftwerk im Verbundbetrieb, so ist aus wehrtechnischen Gesichtspunkten zu verlangen, daß das Umspannwerk stets räumlich weit abseits vom Kraftwerk angelegt wird, damit unter Umständen nur immer eine Gefahrenstelle betroffen werden kann.

Zu diesen Gesichtspunkten für die grundsätzliche Durchbildung der Maschinen- und Umspannerschaltanlage sollen, bevor zu den Einzelteilen übergegangen wird, einige Beispiele kurz behandelt werden.

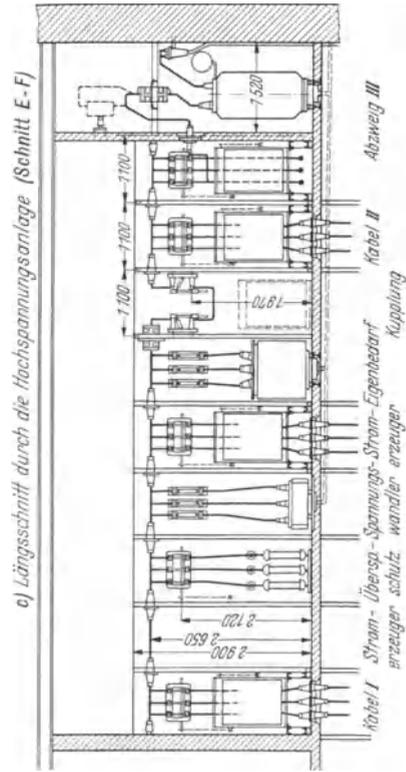
Abb. 445 zeigt eine kleinere Flußwasserkraftanlage für 2 Maschinen mit je einer Leistung von 1200 kVA, die auf Einfachsammelschienen arbeiten, von denen nur 2 Kabel bis zum Anschluß der beiden Freileitungen abgehen. Die Maschinenspannung ist gleich der Verteilungsspannung mit 10 kV gewählt worden. Die Trennwand zwischen Maschinen- und Schaltgeräteraum ist als Schaltwand ausgebildet. Vor dieser befindet sich der Bedienungsgang, der hochgelegt ist und so für die Bedienung einen guten Überblick über den Maschinensaal gestattet. Die Schaltanlage liegt in zwei Stockwerken hinter dem Maschinensaal an einer Längswand. Eine eiserne Treppe vermittelt die Verbindung zwischen dem Maschinen- und den Schalträumen. Als Leistungsschalter sind öllose Schalter vorhanden. Das Kraftwerk liegt im Verbundbetrieb mit einem größeren Verteilungsnetz. Aus dem Grundriß, den Längs- und den Querschnitten sind alle Einzelheiten klar erkennbar.

Die Anlage nach Abb. 446 ist vergleichsweise dem Fluß-Wasserkraftwerk nach Abb. 445 gegenüberzustellen. Hier sind 3 Maschinen mit je 2000 kVA Leistung zur Aufstellung gekommen. Die Maschinenspannung beträgt 6 kV, die Fernleitungsspannung 40 kV. Die Schaltanlage ist längsseits auf der Unterwasserseite über den Turbinenausläufen eingebaut. Querschnitt und Grundriß zeigen die Gesamtdurchbildung. Die Bedienungsanlage liegt erhöht über dem Maschinenhausfußboden und ist in Gestalt einer Warte offen nach dem Maschinenraum gerichtet.

Das Schaltbild zu diesem Wasserkraftwerk zeigt Abb. 446c. Jeder Stromerzeuger hat seinen Erregerumformer, seinen Maschinenschutz (Entregung, Wicklungs- und Erdschlußschutz) und



a) Schnitt durch das Kraftwerk
(Hochspannungsschaltäume und Bedienungsanlage).



c) Längsschnitt durch die Hochspannungsanlage (Schnitt E-F)

Abb. 445a und c.

Abb. 445. Grundrisse und Schnitte durch die Schaltanlage eines 10-KV-Wasserkraftwerkes mit sechsen Maschinen, 2.1500 kVA Drehstrom, Maschinen- und Verteilungsspannung gleich.

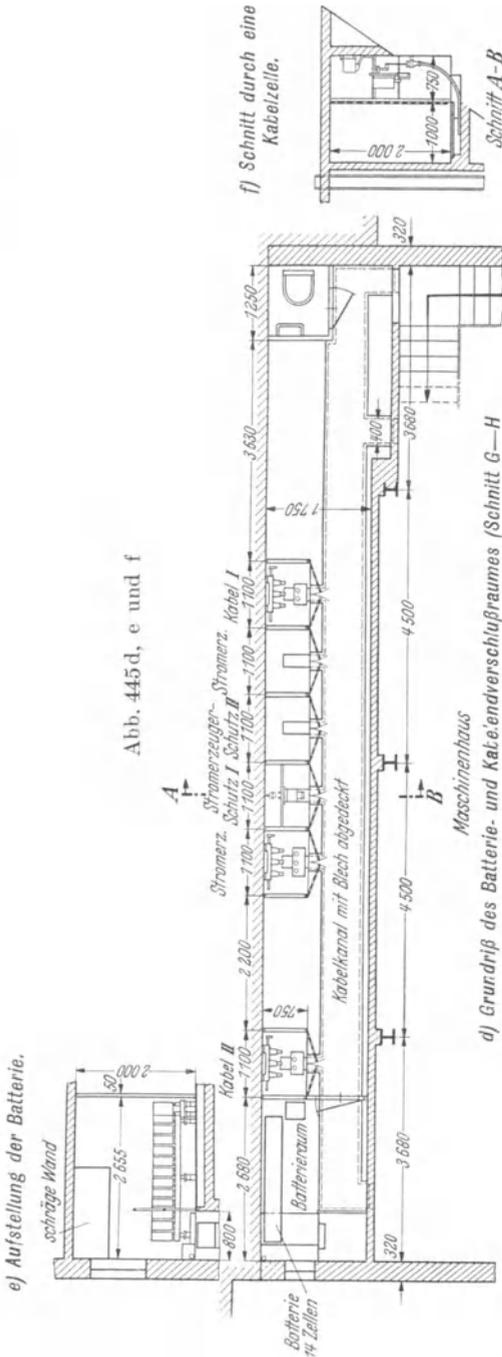


Abb. 445d, e und f

Abb. 445. Grundrisse und Schnitte durch die Schaltanlage eines 10-kV-Wasserkraftwerkes mit stehenden Maschinen, 2 · 1200 kVA. Drehstrom, Maschinen- und Verteilungsspannung gleich.

blick auf die Zahl und Leistung der Umspanner völlig aus, zumal auch nur 2 abgehende Freileitungsstromkreise vorhanden sind. Die Maschinensammelschienen haben einen Kuppelschalter erhalten.

Zur Erdschlußüberwachung liegen an den Maschinensammelschienen je 3 nach Erde geschaltete Spannungszeiger. Die Hochspannungsnullpunkte der beiden Umspanner sind über eine Verbindungsleitung an eine Erdschlußlöschspule angeschlossen.

Die unter- und oberspannungsseitigen Leistungsschalter der Umspanner sind elektrisch gekuppelt und an ein gemeinsames Meßwerk mit unabhängiger Strom-Zeitauslösung gelegt. Die zugehörigen Meßwandler liegen auf der Oberspannungsseite.

Von der Verwendung eines Vergleichsschutzes ist abgesehen worden. Buchholz - Schutzgeräte überwachen den Innenzustand des Umspanner.

Die Parallelschaltungsstellen bei den Maschinen und bei den Freileitungen, die mit *Sy*. bezeichnet sind, desgleichen die für jeden Stromkreis gewählten Meßgeräte sind aus dem Schaltbild zu ersehen.

Für den Eigenbedarf dienen 2 Stromkreise

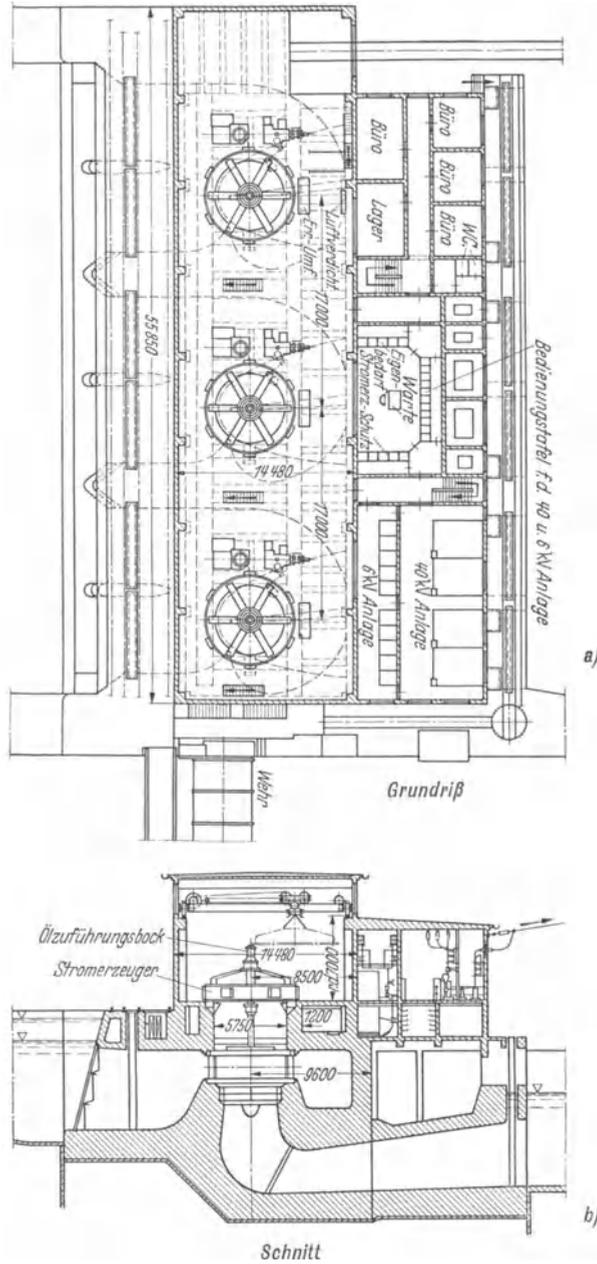


Abb. 446a und b.

Abb. 446a bis c. Wasserkraftwerk mit 3 stehenden Maschinen, je 2000 kVA, angebaute ein-
stöckiger 6/40 kV Schaltanlage und Warte erhöht über Maschinenhausflur, Freileitungsabgänge.

über 2 Umspanner mit je 120 kVA Leistung, die über Leistungstrennschaltern an den 6-kV-Doppelsammelschienen liegen.

Zu Steuer- und Meßzwecken und zur Notbeleuchtung wird Gleichstrom über einen Motor-Stromerzeuger und eine Batterie mit Doppelschalter gewonnen.

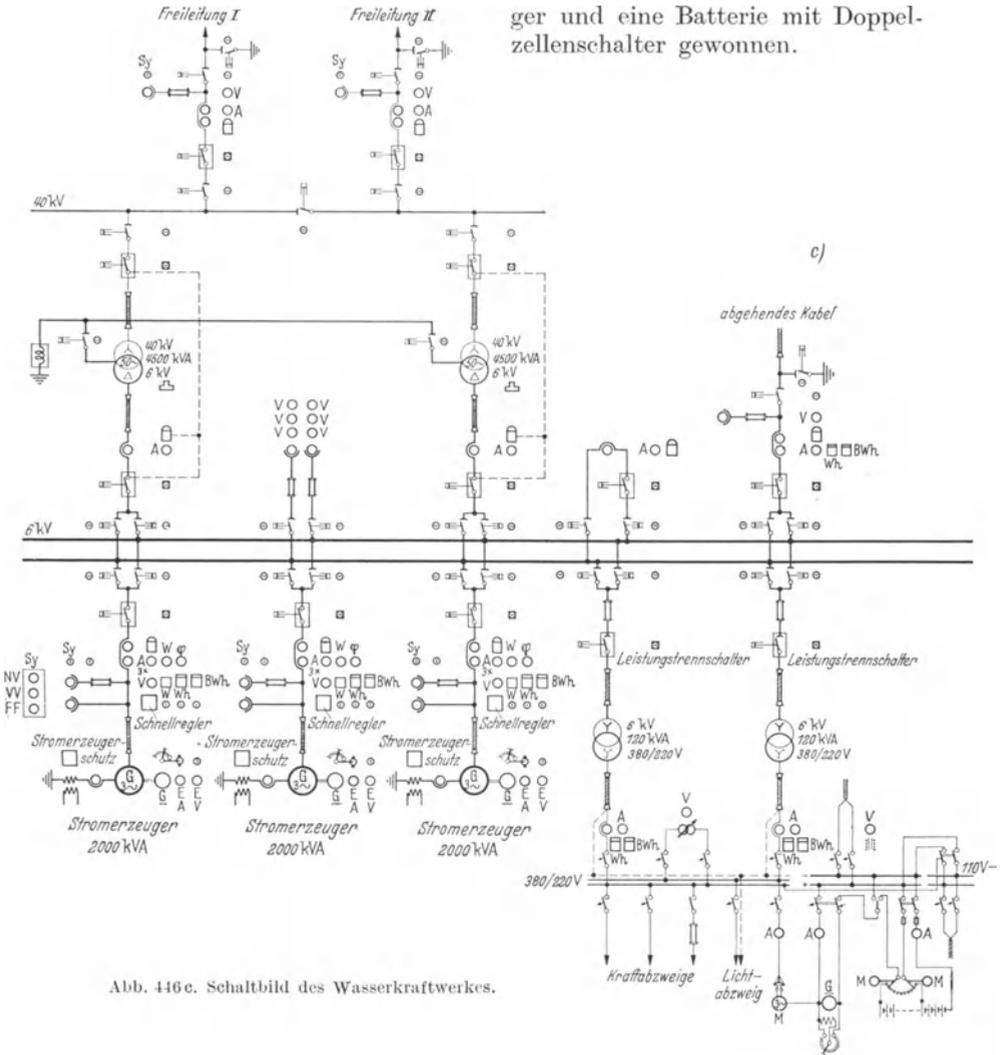


Abb. 446 c. Schaltbild des Wasserkraftwerkes.

Ein Dampfturbinenkraftwerk mittlerer Leistung für ein Industrie-
werk zeigt im Grundriß und Schnitt Abb. 447. Die Maschinenspannung
beträgt 6 kV und ist so gewählt worden, daß die Hauptverteilung über
Kabel unmittelbar erfolgt. Für die Versorgung entfernt er liegender Be-
triebsstätten ist eine Spannung von 15 kV erforderlich, die über drei
Umspanner gewonnen wird. Die Maschinen- und Verteilungsschalt-

geräteanlagen mit Expansionsschaltern sind offen auf der Höhe des Maschinenhausfußbodens aufgestellt. Um die Sammelschienen beaufsichtigen und reinigen zu können, sind hochgelegte Gänge über den Schaltgängen angeordnet. Die Schaltwand ist dem Maschinenraum zugekehrt, liegt auf Maschinenhausflur und gestattet trotzdem einen befriedigenden Überblick über den Maschinensaal, weil die Maschinen selbst nicht wesentlich stören. Die Nebenräume, so insbesondere der Aufenthaltsraum für den Betriebsführenden, liegen mit der Schaltanlage ebenfalls auf gleicher Höhe, so daß ein glatter und ungehinderter Verkehr gewährleistet ist. Über eine Treppe ist das Untergeschoß auf Höhe des Kondensator Kellerfußbodens mit der Schaltanlage verbunden. Hier haben die Umspanner, Schutzdrosselspulen und Kabeltrennschalter ihren Platz erhalten. Besonders ist noch auf die Kabelkanäle für die Steuer- und Meßkabel aufmerksam zu machen.

Eine neuartige Verbindung zwischen Kraftwerk und Höchstspannungs-Umspannwerk zeigt Abb. 448. Bei Wasserkraftwerken bietet, wie bereits erwähnt, im Hinblick auf die Fundament- und damit die Platzbeschaffungskosten die Unterbringung größerer Schaltanlagen mit ihren Umspannern oft recht erhebliche Schwierigkeiten. Bei der Ausführung nach Abb. 448 ist die Kurzkupplung zwischen Maschinen und Umspannern zur Anwendung gekommen. Die Umspanner stehen auf dem Damm-balkenpodium wasserabwärts unmittelbar im Freien. Die 100-kV-Schaltgeräteanlage ist auf einem diesem Podium vorgelagerten Betonpodium aufgestellt. Als Schalter sind Expansionsschalter gewählt worden. Sie stehen zusammen mit den Meßwandlern auf eisernen Böcken. Die Doppelsammelschienen liegen an Masten¹, die in der Längsrichtung der Schaltanlage stehen. Zwischen Umspannern und Hochspannungsschaltanlage liegt ein Gleis. Für den Eigenbedarf ist eine kleine Schaltanlage an der wasseraufwärtigen Längswand des Maschinenhauses angegliedert. Die Steuerung der Maschinen und der gesamten Hochspannungsanlage erfolgt von der Mitte des Maschinensaales aus. Abb. 449 zeigt den Hochspannungsteil dieser Bauform besonders; die Steuerschränke für Bedienung an Ort und Stelle sind klar zu erkennen.

Muß die Schaltanlage vollständig vom Kraftwerk getrennt werden, so gibt Abb. 450 hierfür eine grundsätzliche Ausführungsform, über die Besonderes nicht mehr zu sagen ist.

f) Der Platzbedarf und der innere Aufbau für eine Schaltgeräteanlage ist noch vor der Bearbeitung des Kraftwerksentwurfes jedenfalls in seinen ungefähren Ausmaßen zu bestimmen. Da neuerdings wohl nur noch ölarme oder öllöse Schalter zur Verwendung kommen, ist der Einbau von Ölschaltern hier nicht mehr behandelt.

Wesentlich für den Platzbedarf ist zunächst, ob Sammelschienen für die Unter- und Oberspannungsseite erforderlich und ob die Schalter für jede Sammelschiene in einer oder zwei Reihen bzw. bei Freileitungsabgängen für höchste Spannungen mit diesen Schaltern

¹ Sihler, I.: Neuzeitliche Freiluftanlagen für Betriebsspannungen bis 100 kV. ETZ 1938 Heft 9 S. 213. Probst, Dr. Ing., H.: Grundlegende Bauformen von AEG-Freiluftschaltanlagen. AEG-Mitt. Heft 11 S. 503.

vermischt aufzustellen sind. Liegen Beschränkungen in der Grundfläche des Schalthauses nach Länge oder Breite nicht vor, so gibt die Aufstellung der Schalter in einer Reihe zumeist die einfachste und übersichtlichste Leitungsführung zu den über den Schaltern befindlichen nebeneinander liegenden Sammelschienen (Abb. 451a).

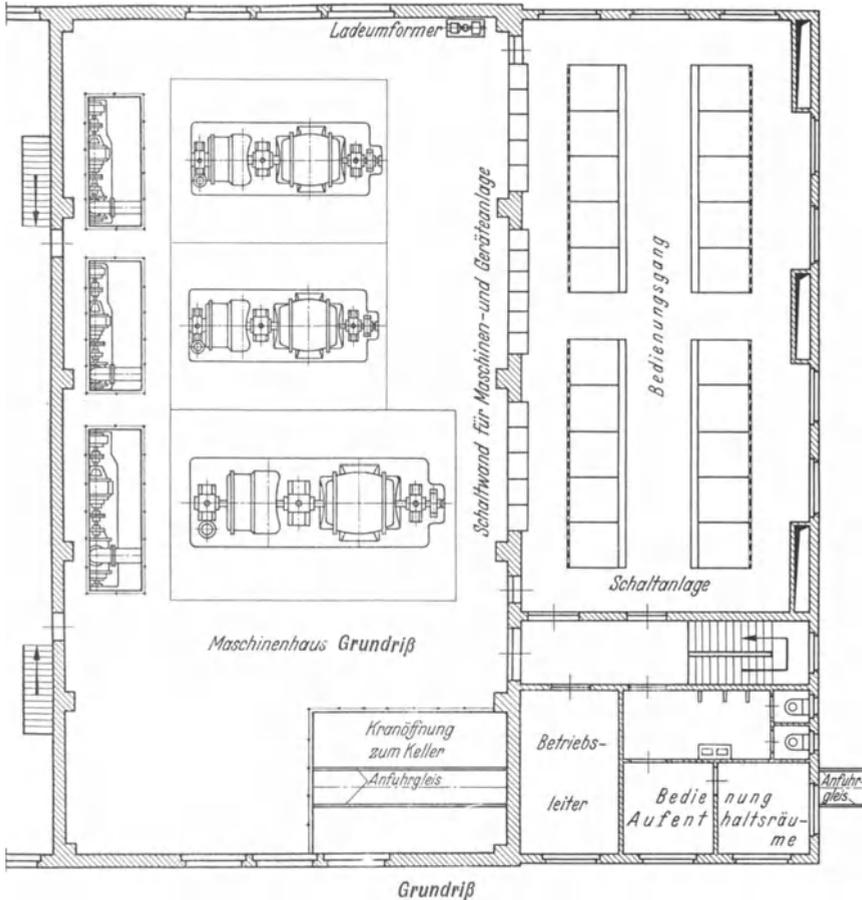
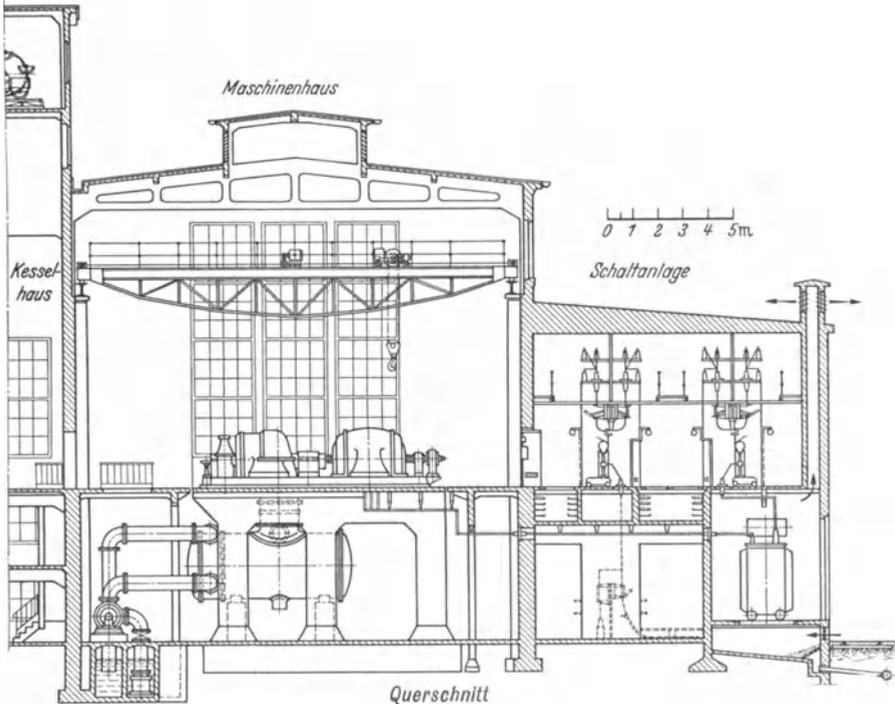


Abb. 447 a.

Abb. 447 a und b. Dampfmaschinenkraftwerk für Industrieanlage. Schalttafel auf Maschinenhausflur im Maschinenraum. Zweistöckige Schaltanlage angebaut.

Müssen dagegen die Schalter in zwei Reihen untergebracht werden, so muß, wenn die Sammelschienen nicht übereinander gelegt werden, was eine Erhöhung des Bauwerkes zur Folge hat, die eine Sammelschiene die zweite hufeisenförmig umschließen (Abb. 451b) oder durch Querverbindungen kreuzen (Abb. 451c), oder es muß in der Platzeinteilung eine gegenseitige Verschiebung vorgenommen werden. Die Anordnung nach Abb. 451a hat den Vorteil, daß im Sammel-

schienenraum nicht drei Sammelschienen vorhanden sind, die unter Umständen zu Fehlschaltungen führen könnten. Bei der zweireihigen



Querschnitt
Abb. 447 b.

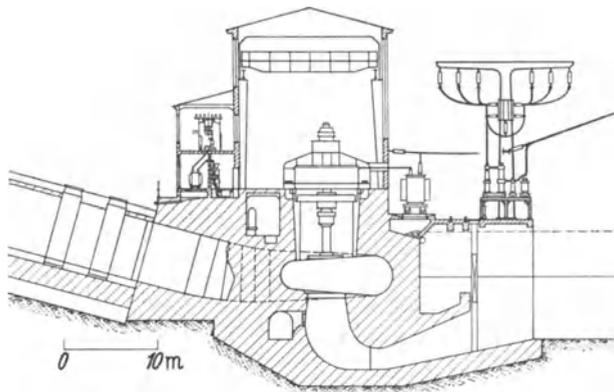


Abb. 448. {Wasserkraftwerk mit stehenden Maschinen. Eigenbedarfsschaltanlage angebaut, Umspanner und 100-kV-Schaltanlage in Freiluftausführung, T-Mast-Bauform.

Schalteraufstellung ist ein etwa notwendiges Verschiebegleis für die Bewegung schwerer Stücke doppelt zu verlegen und gegebenenfalls mit Drehscheiben für das Verfahren zur Werkstatt zu versehen.

Die Trenn- bzw. Schutzwände zwischen den einzelnen Zellen bei Spannungen bis 45 kV müssen aus Isolierstoff, Hartgipsplatten oder doppeltem Stahlblech mit Luftzwischenraum bestehen und nicht etwa aus Drahtgittern, da die heißen Metallgase und -dämpfe bei einem Kurzschluß innerhalb einer Zelle sonst zur Nachbarzelle durchtreten und dort zu Überschlügen an Isolatoren und Durchführungen führen könnten¹.



Abb. 449. Ansicht der 100-kV-Freiluftanlage in T-Mast-Bauform (Siemens-Hochbauweise).

Auch bieten derartige Gitter bei Überholungsarbeiten in einer Zelle gegen spannungsführende Teile benachbarter Zellen für die Bedienung keinen zuverlässigen Schutz. Bei Spannungen über 50 kV werden heute meistens keine Trennwände mehr zwischen die einzelnen Stromkreise eingebaut.

Bei der Durchbildung der Zellen ist der Aufbau der Sammelschienen besonders zu beachten. Unmittelbare Sammelschienenkurzschlüsse sind bei der heutigen Bauweise nur in den aller seltensten Fällen zu erwarten. In den weit aus meisten Fällen wird ein Kurzschluß durch einen Schaltlichtbogen beim fehlerhaften Ziehen eines Trennschalters unter Last hervorgerufen, was trotz aller Vor-

sicht selbst beim besten Schaltwärter, sofern Verriegelungsvorrichtungen fehlen, nicht immer vermeidbar ist. Dem Hochspannungslichtbogen muß daher in erster Linie das Wandern aus der Zelle zu den Sammelschienen, und bei mehreren nebeneinanderliegenden Sammelschienen von einer Sammelschiene zur benachbarten unmöglich gemacht werden. Schon bei Kurzschlußabschaltleistungen von 200 MVA bei 6 kV Nennspannung können die Folgen verheerend sein. Es ist daher unerlässlich, bei größeren

¹ Sihler, I.: Kritische Betrachtung der Bauformen und Baumittel neuzeitlicher Innenraum-Schaltanlagen. ETZ 1936 Heft 3 S. 58.

Abschaltleistungen einen Lichtbogenschutz durch eine Schutzwand zwischen den Trennschaltern benachbarter Sammelschienen und eine Trennwand zwischen nebeneinanderliegenden Sammelschienen selbst vorzusehen. Für diesen Lichtbogenschutz sind verschiedene Ausführungsformen entwickelt worden. Aus Abb. 452 und 453 sind zwei Formen des Lichtbogenschutzes zu ersehen, der hier durch feuersichere Zwischen-

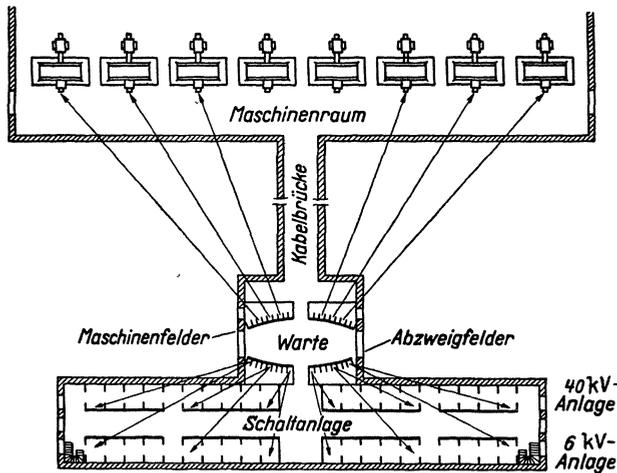


Abb. 450. Raumzeichnung für ein Kraftwerk mit getrennter Warte und Schaltanlage.

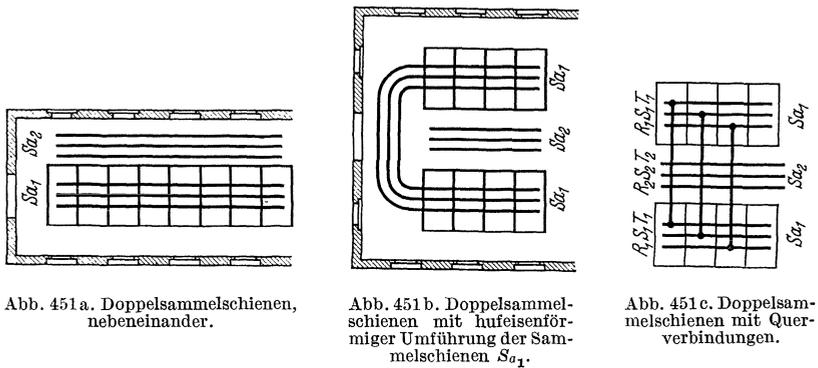


Abb. 451 a. Doppelsammelschienen, nebeneinander.

Abb. 451 b. Doppelsammelschienen mit hufeisenförmiger Umführung der Sammelschienen S_{a1} .

Abb. 451 c. Doppelsammelschienen mit Querverbindungen.

platten und Durchführungen gebildet wird. Die Sammelschienen liegen in einer Ebene. Ein Kurzschlußlichtbogen innerhalb der Zelle wird von den Sammelschienen ferngehalten, so daß diese im Störfall nicht abgeschaltet werden müssen. In Abb. 454 sind die drei Phasen einer Sammelschiene übereinanderliegend angeordnet; der Lichtbogenschutz gegen die Nachbarzellen wird durch die Zellentrennwände zusammen mit den Durchführungen erreicht. Diese Ausführung ist nur dann zu wählen, wenn die Trennschalter mit dem Leistungsschalter mechanisch oder elektrisch so verriegelt sind, daß ein Schalten unter eingeschaltetem Leistungsschalter

unmöglich ist. Allerdings werden durch einen Kurzschlußlichtbogen in der Zelle die Sammelschienen in Mitleidenschaft gezogen, was eine

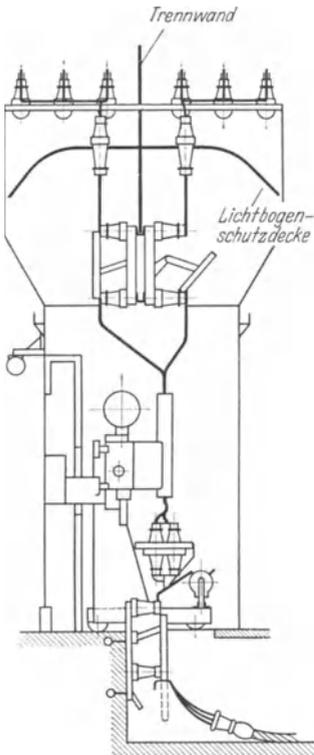


Abb. 452. 10-kV-Schaltzelle mit Druckgasschalter, Doppelsammelschienen, Lichtbogenschutz, Kabelzu- und -abführung (AEG).

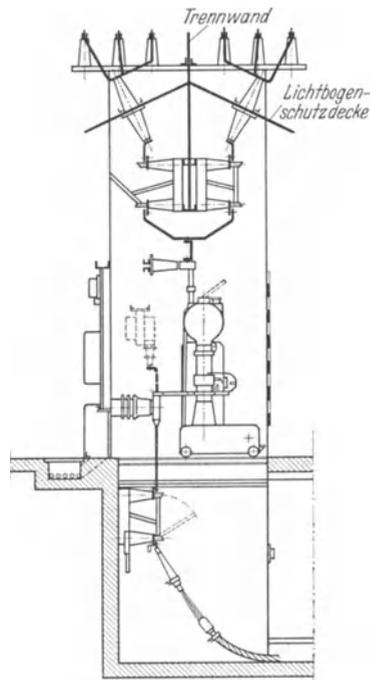


Abb. 453. 15-kV-Schaltzelle mit Expansionschalter, Doppelsammelschienen, Lichtbogenschutz, Kabelzu- und -abführung (SSW).

längere Betriebsunterbrechung zur Folge hat. Einem Wandern des Lichtbogens längs der Sammelschiene ist jedoch vorgebeugt.

Der Lichtbogenschutz in den Zellen nach Abb. 452 und 453 hat den weiteren Vorteil, daß er die beim Lichtbogen entstehenden Metalldämpfe in die Zelle zurückwirft, ihren Austritt in den Bedienungs-gang oder ingegenüberliegende Zellen also verhindert. Die schräge Anordnung der Schutzdecke ermöglicht ferner ein Beobachten der Sammelschienen vom Bedienungs-gang aus.



Abb. 454. 15-kV-Schaltzellen mit Doppelsammelschienen, Lichtbogenschutz durch Zellentrennwände (ältere Ausführung).

Bei dem Aufbau nach Abb. 455 ist das Wandern des Lichtbogens dadurch verhindert, daß zwischen den Sammelschienen und den Sammelschientrennschaltern senkrechte feuersichere Trennwände mit Durchführungsisolatoren liegen. Bei dieser Bauform wird die Raumhöhe geringer und die Ersparnis an Baustoffen für die Eisengerüste größer. Die Kabelendverschlüsse und Kabeltrennschalter liegen in einem halbhohen Stockwerk. Der Aufbau wird dadurch klar und übersichtlich.

Ist die Aufstellung von Schutzdrosselspulen erforderlich, so muß eine zwei-stöckige Bauweise gewählt werden (Abb. 456), bei der im unteren Stockwerk der Kabeltrennschalter und die Drosselspulen und im oberen Stockwerk der Leistungsschalter und die Sammelschienen angeordnet sind. Die Stromwandler sind als Dekkendurchführungs-Stromwandler zwischen Drosselspule und Leistungsschalter eingebaut. Sämtliche Hilfsgeräte wie Druckluftantriebe der Trennschalter, Melde-schaltstücke der Trenn- und Leistungsschalter, Meß- und Steuerleitungen, Klemmleisten und Betätigungskabel sind in einer vor der Hochspannungszelle angeordneten und durch feuersichere Wände gegen diese abgetrennten Niederspannungszelle zusammengefaßt. Bemerkenswert ist der Aufbau der Schutzdrosseln; ihre drei Phasen werden übereinander angeordnet, so daß die Zu- und Ableitungen zu den Spulen der drei Phasen von oben her angeschlossen werden können. Auf diese

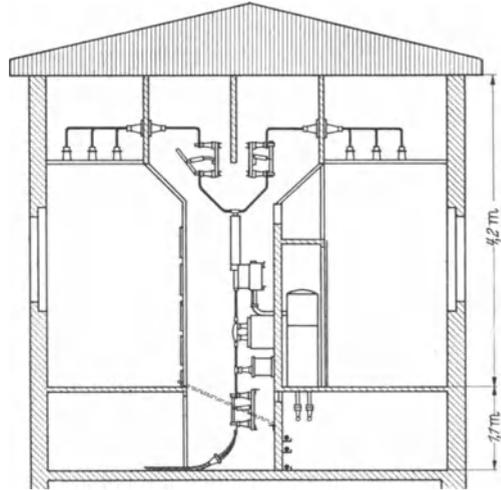


Abb. 455. Schnitt durch eine $1\frac{1}{2}$ -stöckige Schaltanlage mit Druckgasschaltern, Doppelsammelschienen, Lichtbogenschutz, Kabelzu- und -abführung.

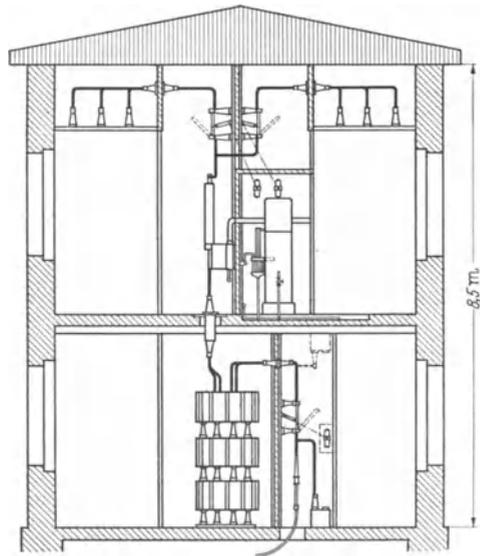


Abb. 456. Schnitt durch eine zwei-stöckige Schaltanlage mit Druckgasschaltern, Doppelsammelschienen, Kurzschlußschutzdrosseln für die Abzweige, Kabelzu- und -abführung.

die Zu- und Ableitungen zu den Spulen der drei Phasen von oben her angeschlossen werden können. Auf diese

Weise fallen die vielen Stützisolatoren fort, die bisher beim Anschluß von Hochspannungsdrosselpulen innerhalb der Hochspannungszelle notwendig waren, um die zu den außen liegenden Anschlüssen der Drosselpulen führenden Hochspannungsleitungen kurzschlußfest abzustützen (Zahlentafel 23).

Bei der Aufstellung einer größeren Zahl von Schutzdrosselpulen

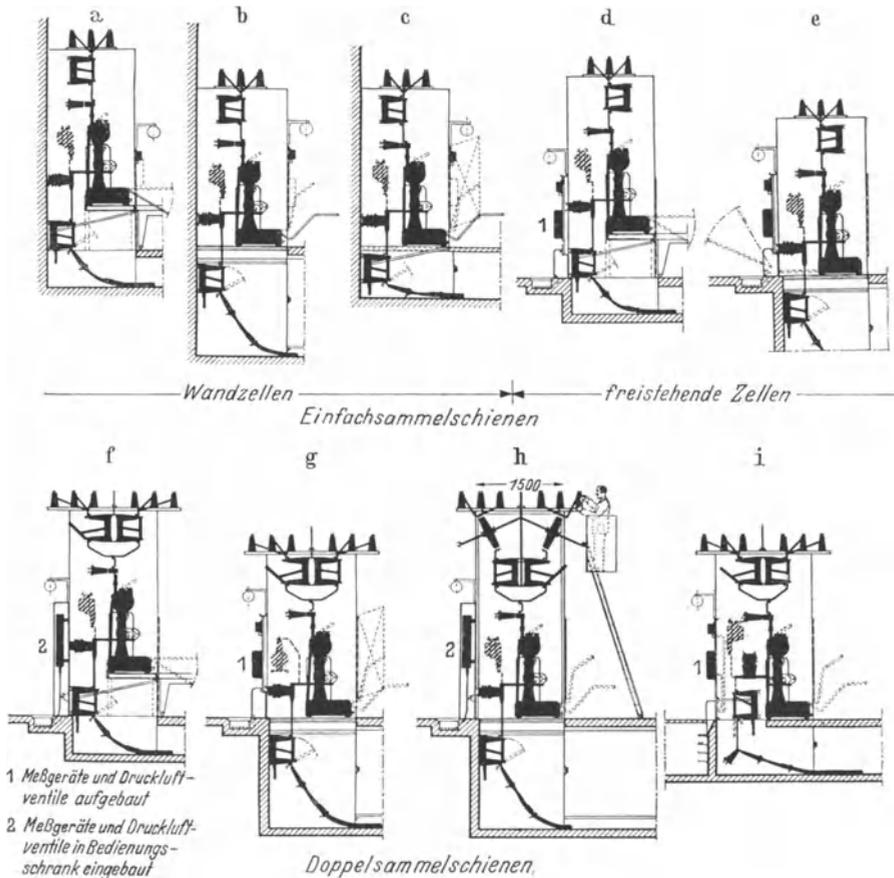
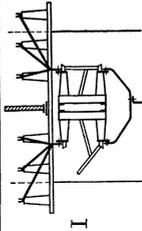
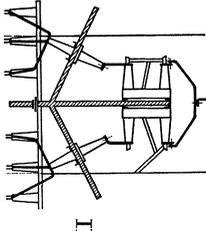
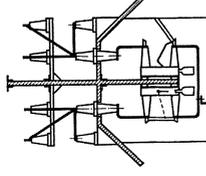
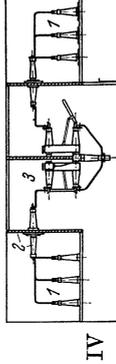


Abb. 457. Zellenbauformen für Hochspannungsschaltzellen mit Einfach- und Doppelsammelschienen, Reihe 30, ölarme Leistungshalter (SSW).

in einem verhältnismäßig niedrigen Kellerraum muß die Erwärmung des Raumes durch die Verluste in den Drosselpulen berücksichtigt werden.

Aus der Zahlentafel 31 sind die Hauptabmessungen feststellbar, die Hochspannungszellen für Spannungen bis 30 kV und für verschiedene Sammelschienenanordnungen erhalten müssen. Zahlentafel 32 gibt die kleinsten Gangbreiten und Abstände für Hochspannungsschaltanlagen in Gebäuden für die Reihe 3 bis 100 an. Auch

Zahlentafel 31.
 Ungefährer Raumbedarf freistehender Hochspannungszellen von 10 bis 30 kV Nennspannung (SSW).

	Reihe 10		Reihe 20		Reihe 30		Sammelschienenanordnung
	mindestens (nach VDE)	möglichst	mindestens (nach VDE)	möglichst	mindestens (nach VDE)	möglichst	
Mindest-Teilungen bei Abschaltleistung	1100 mm	1300 mm	1700 mm	1700 mm	1700 mm	1700 mm	  
Zellentiefe	1350 mm	1650 mm	2200 mm	2200 mm	2200 mm	2200 mm	
Bedienungsgänge einseitig	1000 mm	1200 mm	1000 mm	1500 mm	1000 mm	1750 mm	
	1200 mm	1500 mm	1200 mm	2000 mm	1200 mm	2500 mm	
Bedienungsgänge doppelseitig	1000 mm	1200 mm	1100 mm	1200 mm	1250 mm	1500 mm	
	1000 mm	1200 mm	1100 mm	1200 mm	1250 mm	1500 mm	
Fahrgänge	3700 mm	4500 mm	4800 mm	4800 mm	4800 mm	4800 mm	
	4300 mm	5000 mm	5500 mm	5500 mm	5500 mm	5500 mm	
	4800 mm	5500 mm	6000 mm	6000 mm	6000 mm	6000 mm	
	3300 mm	4000 mm	4300 mm	4300 mm	4300 mm	4300 mm	

Bedienungsgänge von über 15 m Länge sind um etwa 20-30 vH zu verbreitern,
 um eine schlauchartige Wirkung zu vermeiden

diese Zahlenangaben werden oft wertvolle Dienste leisten können. In Abb. 457 sind wiederum Zellenbauformen für diese Schaltanlagen zusammengestellt, die einer weiteren Erläuterung nicht mehr bedürfen.

Der Abschluß der Zellen zum Bedienungsgang erfolgt durch Blechtüren, die die Meßgeräte und die Vorrichtungen für die Schalterbetätigung tragen und die



Abb. 458. Bedienungsgang einer 10-kV-Anlage, zweireihige Aufstellung, Hufeisen-Doppelsammelschienen in Dreieckanordnung, Lichtbogenschutz, Zellen-Blechplattenabschluß.

eingesetzte Rahmen und Ausschnitte zum Beobachten des Zelleninnern erhalten (Abb. 458 und 459). Die entsprechenden Blindschaltbilder werden entweder aufgemalt oder aufgesetzt. Neuerdings wird auch eine Unterteilung der vorderen Abschlußwand derart vorgenommen,

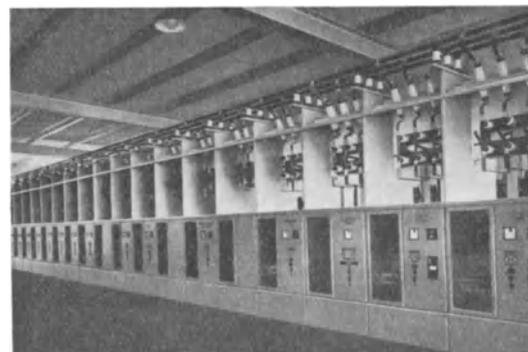


Abb. 459. Bedienungsgang einer 10-kV-Anlage, einreihige Aufstellung, parallele Doppelsammelschienen in einer Ebene, Lichtbogenschutz. Zellen-Blechplattenabschluß mit teilweiser Drahtglasverkleidung.

daß ein Teil der Blechtür durch splitterfreies Glas oder Drahtglas ersetzt wird. Abb. 460 zeigt eine derartige Ausführung. Durch ein solches Drahtglasfenster erhält der Schaltwärter eine

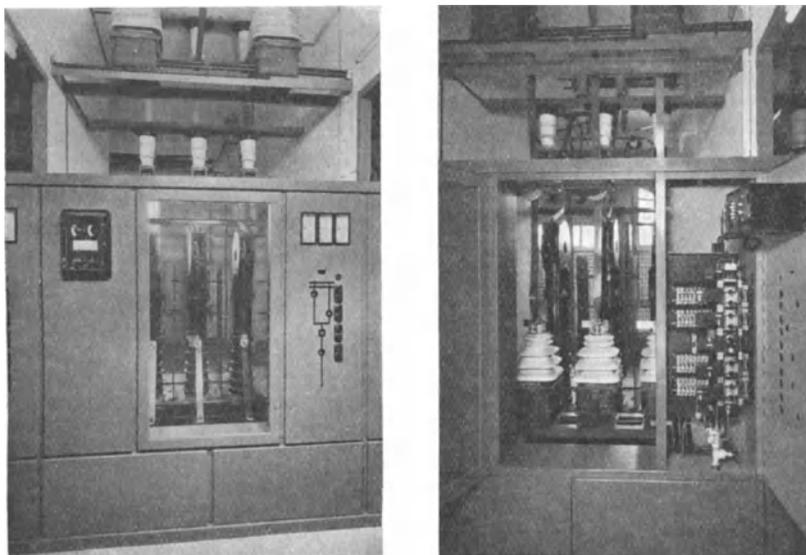
gefahrlose und bessere Einblickmöglichkeit in die Schaltzelle¹. Die Rückseite der Schaltzellen wird mit Drahtgittern gegen zufällige Berührung spannungsführender Teile abgeschlossen. Aus Abb. 461 ist der Gesamtaufbau einer 10-kV-Geräteanlage im räumlichen Gesichtswinkel zu ersehen, aus der ohne weitere Erläuterung das bisher Gesagte klar hervorgeht.

Eine andere Ausführung besteht darin,

¹ Sihler, I.: Siehe Fußnote S. 510.

Auf eine gute, schattenfreie Raum- und Zellenbeleuchtung ist auch hier wieder besonders zu achten, wobei die Lampen derart angeordnet sein müssen, daß sie während des Betriebes gefahrlos ausgewechselt bzw. gereinigt werden können. Da neben diesen Bedingungen der rein persönliche Geschmack für die Auswahl maßgebend ist, sollen weitere Einzelheiten nicht gebracht werden. Auf alle Fälle ist auf Erfüllung luftschutztechnischer Forderungen zu achten.

Bei Spannungen über 50 kV wird die Hochspannungsschaltanlage zusammen mit den Umspannern zumeist von der Kraftwerksanlage



Drahtglasverkleidung in der Blechplattenverkleidung.

Drahtglas- und Blechverkleidung geöffnet.

Abb. 460. Abschluß von Hochspannungszellen nach dem Bedienungsgang (bis Reihe 30).

räumlich getrennt. Soll die eigentliche Schaltanlage in einem Gebäude untergebracht werden, so sind für diese Bauformen in den Abb. 462 bis 466 einige Ausführungen gezeichnet. Der Einbau der Schaltgeräte erfolgt nicht mehr in abgeschlossenen Zellen, sondern es wird die offene Halle gewählt, weil bei diesen Spannungen heute nur noch die ölarmen oder die öllosen Leistungsschalter zur Aufstellung kommen. Werden die Leiterabstände reichlich bemessen, so sind auch bei den größten Kurzschlußleistungen Rückwirkungen von einem auf den anderen Stromkreis und eine Gefährdung des Rauminnen allgemein durch Ruß- und Metaldampfwicklung nicht zu befürchten.

Die offene Halle gestattet beste Übersicht für alle Schalthandlungen und leichte Zugänglichkeit zu allen Anlageteilen von den Bedienungsgängen aus, was aus Abb. 462 unschwer zu ersehen ist. Es ist anzustreben, daß alle Schalter in einer Reihe stehen, wodurch die vorteilhafte Ge-

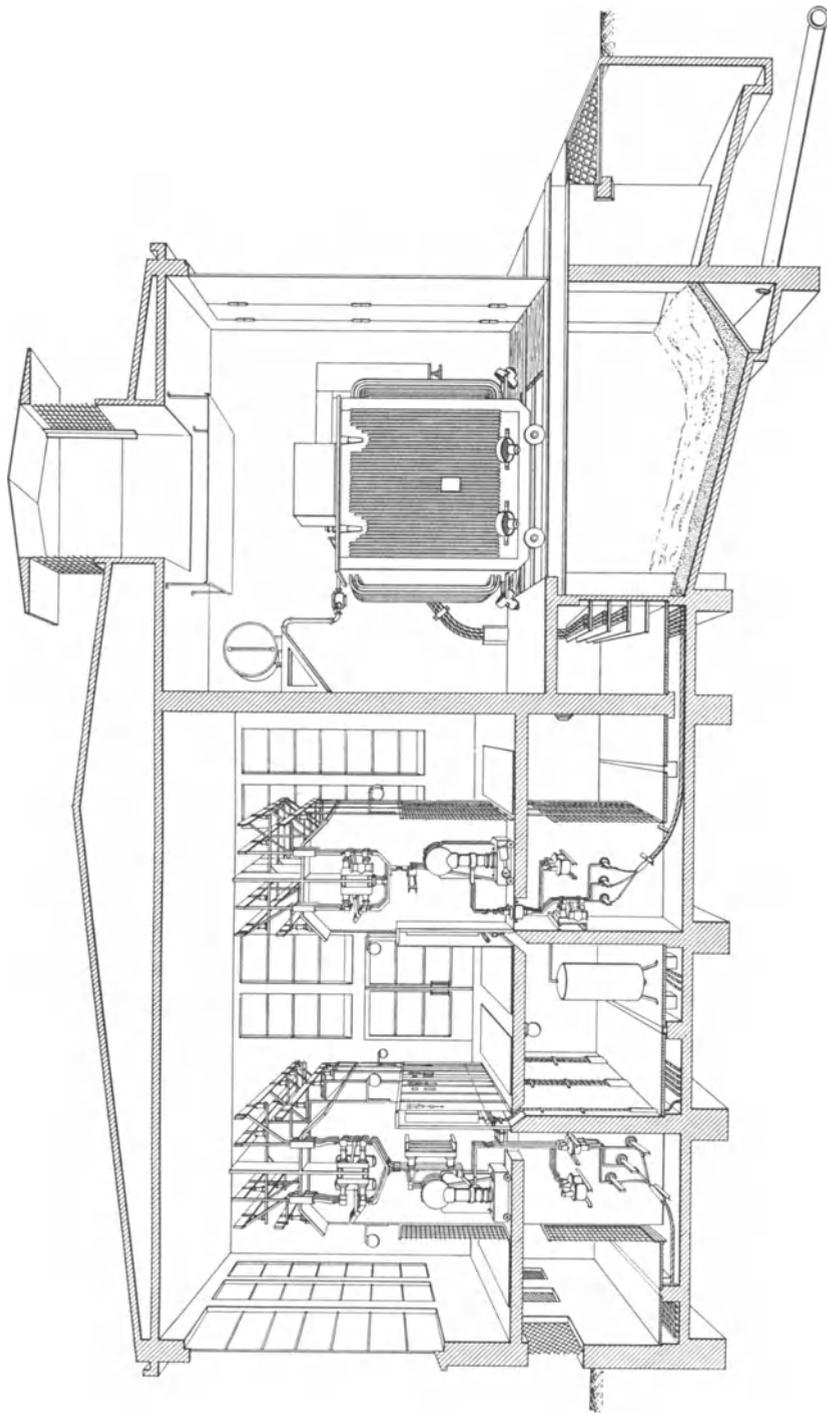


Abb. 461. Bildschnitt durch eine 10-kV-Schaltanlage, Zweireihenaufstellung, Doppelsammelschienen, Hufeisenausführung, Hilfsanlagen, Hufeisenaufstellung, Umspanneraufstellung.

staltung gewonnen wird. In Abb. 463 sind die Umspanner im Schalthaus untergebracht, in Abb. 464 stehen sie im Freien. Hierzu ist auf das im Band I Gesagte zu verweisen. Auf die Freiluftanlage soll ebenfalls nicht eingegangen werden, da sie im Band I hinsichtlich ihres grundsätzlichen Aufbaues im einzelnen behandelt ist.

Die Sammelschienen werden entweder an Hängeisolatoren an der Decke befestigt oder auf Stützisolatoren an Traggerüsten verlegt. Wesentlich ist dabei, daß auf eine leichte und gefahrlose Reinigung und Instandsetzung der Isolatoren und der Sammelschienen besonders zu achten ist. Im ersten Fall geschieht das von einem kleinen Hängewagen aus (Abb. 465), im zweiten Fall von einem Gang im Traggerüst (Abb. 466) Isoliertrennwände zwischen den einzelnen Sammelschiensystemen sind zweckmäßig einmal um Arbeiten an jedem System gefahrloser zu gestalten, zum anderen um bei Kurzschluß auf einem System ein Überspringen des Lichtbogens auf das andere System zu verhindern. Werden noch Strom- und Spannungswandler in einem Gerät vereinigt, oder die Stromwandler mit den Leistungsschaltern zusammengebaut, ferner die Trennerarme mit dem Leistungsschalter mechanisch verbunden, so ergibt das den einfachsten und billigsten Aufbau, weil alle Zwischenbefestigungen der Leiter an Isolatoren unnötig werden, wie das aus Abb. 465 und 466 zu ersehen ist¹. Damit entfallen eine Menge von Fehlerquellen; Durchführungen sind nur noch für die abgehenden Leiter bei ihrem Maueraustritt erforderlich. Anzustreben ist ferner die Aufstellung aller Leistungsschalter und Wandler zu ebener Erde, so daß ohne Zuhilfenahme besonderer Hebezeuge ein schnelles und bequemes Ausfahren ermöglicht wird. Schwenkbare Fahrrollen gestatten ein Ver-

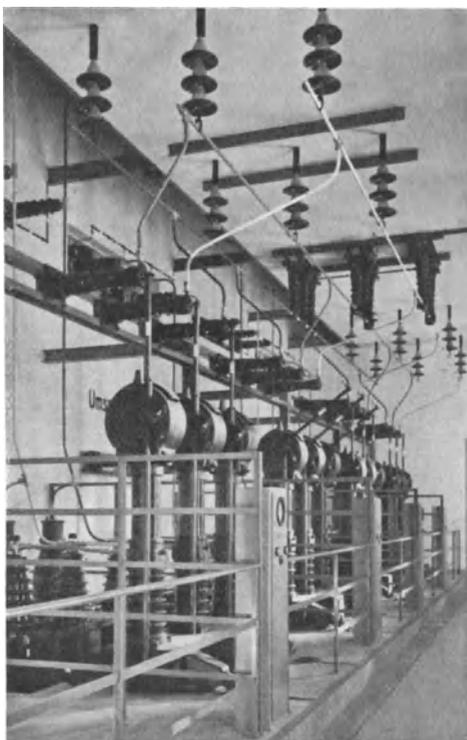


Abb. 462. 50-kV-Einstock-Innenraumschaltanlage in offener Hallenbauform, Einfachsammelschienen, Expansionschalter mit angebauten Trennern.

¹ Schrinner, W.: Innenraumschaltanlagen für Spannungen über 30 kV. ETZ 1937 Heft 50 S. 1338.

fahren der Schalter in beliebiger Richtung. In ähnlicher Weise wie bei den Schaltanlagen bis 30 kV stehen vor den einzelnen Zellen oder diesen gegenüber Schränke zur Aufnahme der Betätigungs- und Überwachungseinrichtungen (Abb. 462 und 465). Aus Abb. 467 ist der Aufbau eines

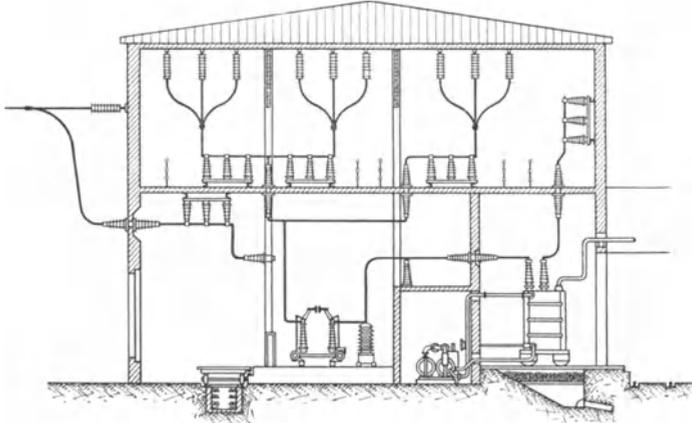


Abb. 463. 100-kV-Zweistock-Innenraumschaltanlage mit öllosen Schaltern, Dreifachsammelschienen an Hängeisolatoren, keine Trennwände, Umspanner eingebaut.

solchen Schaltschranks zu ersehen. Eine einfachere Ausführung zeigt Abb. 462.

g) Die stahlgekapselften Felder für Hochspannung. Eine Sonderausführung für staubige Betriebe und solche Anlagen, bei denen infolge der

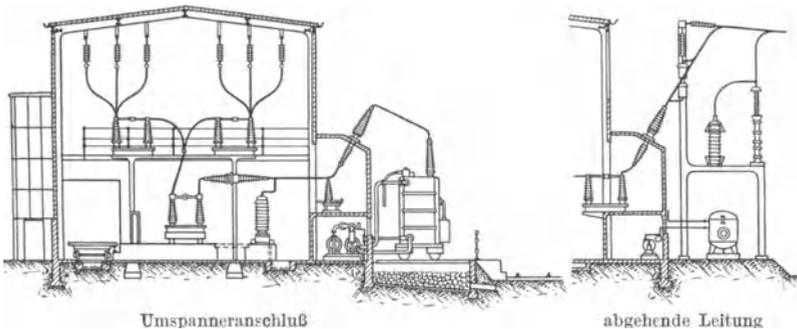


Abb. 464. 100-kV-Hallenanlage mit öllosen Schaltern, Doppelsammelschienen, Umspanner im Freien.

Betriebs- und Bedienungsverhältnisse unbedingter Berührungsschutz gewährleistet sein muß, ist in den stahlgekapselften Schaltfeldern durchgebildet worden. Ein Ausführungsbeispiel mit öllosen Schaltern zeigt Abb. 468. Ein jedes solches Feld ist eine in sich fertig zusammengebaute und geschaltete Anlage, die am Verwendungsort einzeln oder in Gruppen ohne weitere Bauarbeiten aufgestellt werden kann. Die einzelnen Schaltfelder können ausgefahren werden, um sie zu unter-

suchen und zu reinigen. Durch entsprechende Verriegelungen ist dafür gesorgt, daß Betriebssicherheit und Gefahrlosigkeit in der Bedienung gewährleistet sind.

Solche Schaltfelder eignen sich besonders für Industrieanlagen, sind aber auch in Kraftwerken mit beschränkten Raumverhältnissen für die

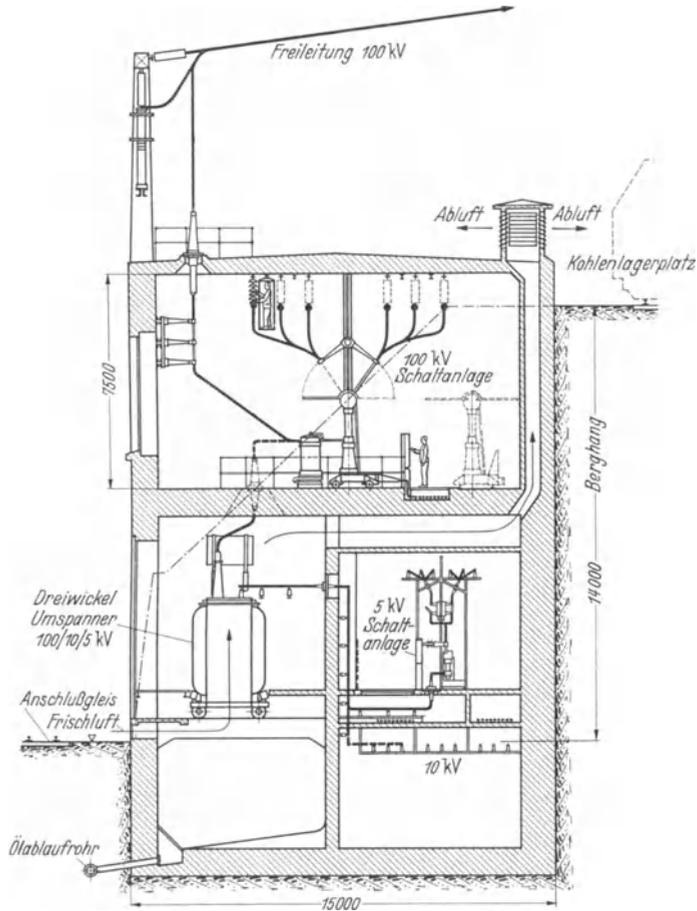


Abb. 465. Zweistöck-Innenraumschaltanlage mit Umspanneraufstellung und 5-kV-Schaltanlage-100 kV offene Halle, Expansionsschalter mit zwei angebauten Trennern, Sammelschienenbedienung durch Wagen.

Eigenbedarfsanlagen sehr brauchbar. Sie werden für 3, 6, 10, 15 und 20 kV mit Nennabschaltleistungen von 100 MVA bei 10 kV und 200 MVA bei 20 kV gebaut. Durch Vereinigung mehrerer Zellen kann eine vollständige Schaltanlage mit Einfach- oder Doppelsammelschienen zusammengestellt werden. Vielfach wird Handantrieb für die Leistungsschalter gewählt. Der Druckluftantrieb ist ebenfalls anwendbar. Im

oberen Teil werden durch Zwischenwände von der Hochspannung getrennt Meßgeräte und Meßwerke eingebaut.

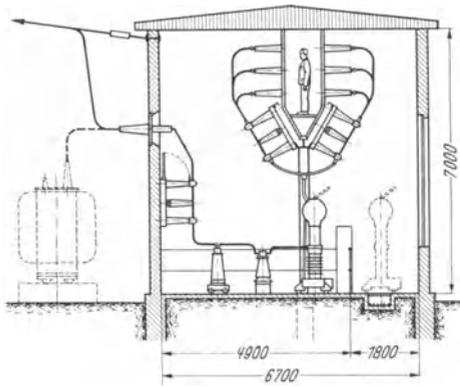


Abb. 466. 60-kV-Innenraumschaltanlage in Säulenbauform, Doppelsammelschienen an Stützisolatoren, innerer Bedienungsgang für Sammelschienen.

h) Baueinheiten. Nur eine kurze Erinnerung des hierzu im Band I und III/1 Gesagten soll der Vollständigkeit wegen eingeschaltet werden. Die Innenschalträume müssen staub-, feuchtigkeits- und frostfrei sein, Licht und Luft haben und in allen Abmessungen reichlich gewählt werden. Fenster dürfen nicht durch Leitungen verbaut werden, der Fußbodenbelag muß ein sicheres gleitfreies Gehen gestatten; Läufer, gebohnertes Linoleum und ähnlicher Fußbodenbelag sind zu vermeiden,

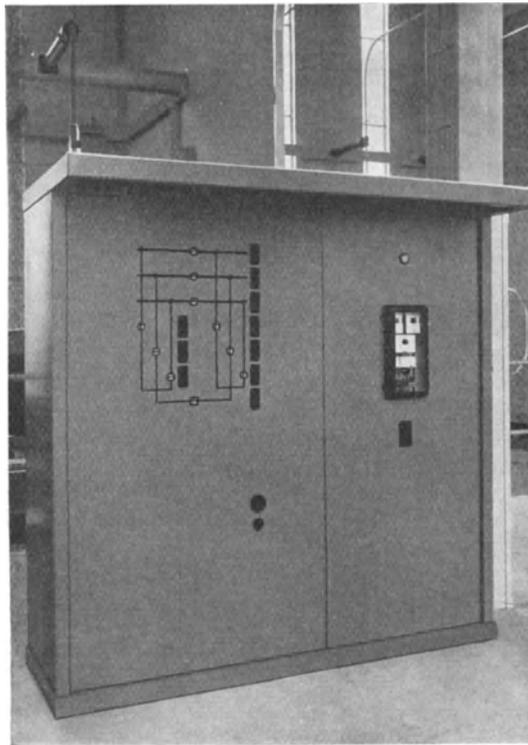


Abb. 467a. Steuer- und Schutzschrank für ein 100-kV-Kuppelfeld, Vorderseite.

Staubentwicklung vom Fußbodenbelag aus ist zu verhüten. Alle Haupt- und Zelleneingänge müssen in ihren Abmessungen auf die Bewegung der eingebauten Schaltgeräte bei Auswechslung abgestellt sein, auch die Lage der Türen muß darauf Rücksicht nehmen. Ausgleichstufen zwischen zwei verschieden hohen Fußböden sind zu vermeiden, da sie nur zu leicht bei Störungen und schneller Schaltwärterbewegung übersehen

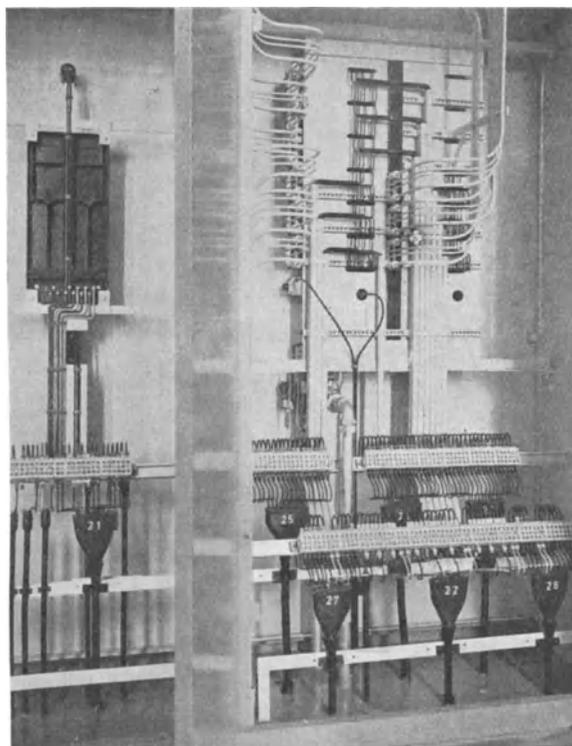


Abb. 467b. Steuer- und Schutzschrank für ein 100-kV-Kuppelfeld. Rückseite.

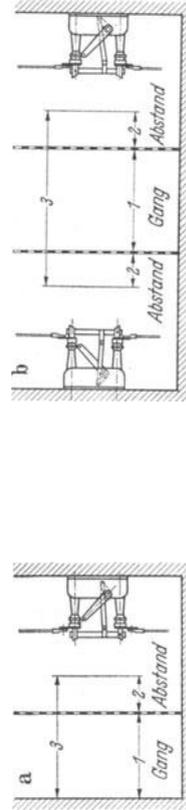
werden können und dann zum Stolpern und Sturz der Schaltwärter führen. Bei Geschoßbauten sollen die Treppen gut begehbar, mit Handläufern und guter Beleuchtung ausgestattet sein. Insbesondere auch die Bedienungsgänge für Überwachung und Prüfung müssen reichliche Abmessungen erhalten. In Zahlentafel 32 sind hierfür Angaben gemacht, die der praktischen Erfahrung entsprechen und über den verbandsmäßigen Festsetzungen liegen. Letztere sollten tunlichst zur Sicherheit der Schaltwärter eingehalten werden. Meldelampen, auch Fernsprecher von den einzelnen Schaltgängen zur Schaltwarte und zum Aufenthaltsraum für das Herbeiholen von Hilfskräften namentlich bei umfangreicheren Schaltungen haben sich immer betrieblich als besonders vorteilhaft erwiesen.

Zahlentafel 32. Kleinste Gangbreiten und Abstände in Innenraum-Hochspannungsschaltanlagen (SSW).

Reihe	einseitig												doppelseitig											
	Abstand der spannungsführenden Teile vom Gang						Prüfgang			Bedienungsgang			Prüfgang			Bedienungsgang								
	Ge-länder		Gitter		Blech		Gangbreite	Gangbreite plus Abstand		Gangbreite	Gangbreite plus Abstand		Gangbreite	Gangbreite plus Abstand		Gangbreite	Gangbreite plus Abstand							
	2	2	2	2	2	3		3	3		1	3		3	3		1	3	3	3				
3	75	500	175	105	800	1300	975	905	1000	1500	1175	1105	1000	2000	1350	1210	1200	2200	1550	1410				
6	100	500	200	130	800	1300	1000	930	1000	1500	1200	1130	1000	2000	1400	1260	1200	2200	1600	1460				
10	125	500	225	155	800	1300	1025	955	1000	1500	1225	1155	1000	2000	1450	1310	1200	2200	1650	1510				
20	180	500	280	210	800	1300	1080	1010	1000	1500	1280	1210	1000	2000	1560	1420	1200	2200	1760	1620				
30	260	500	360	290	800	1300	1160	1090	1000	1500	1360	1290	1000	2000	1720	1580	1200	2200	1920	1780				
45	360	560	460	390	800	1360	1260	1190	1000	1560	1460	1390	1000	2120	1920	1780	1200	2320	2120	1980				
60	470	670	570	500	800	1470	1370	1300	1000	1670	1570	1500	1000	2340	2140	2000	1200	2540	2340	2200				
80	580	780	680	610	800	1580	1480	1410	1000	1780	1680	1610	1000	2560	2360	2220	1200	2760	2560	2420				
100	720	920	820	750	800	1720	1620	1550	1000	1920	1820	1750	1000	2840	2640	2500	1200	3040	2840	2700				

Sämtliche Abstände in mm.

Gangverbreiterung siehe Zahlentafel 31.



Die Beleuchtung der Schalträume und Schaltgänge bedarf besonderer Überlegung. In erster Linie muß sie den Betriebsanforderungen genügen und erst in zweiter Linie architektonisch befriedigen. Auf die Auswechse- lung der Birnen ohne besondere Hilfsmittel (lange Stehleitern) ist schon hingewiesen worden. Auf eine schnelle Verdunkelungsmöglichkeit der Schalträume aus luftschutztechnischen Gründen ist von vorneherein entweder durch Verkleiden der Fenster mit Rollvorhängen oder durch Abschirmung der Beleuchtung Rücksicht zu nehmen (Verdunkelungsum- spanner, abgedeckte Richt- leuchten, die mit vermin- derteter Spannung brennen). Eine Notbeleuchtung ist nicht zu vergessen.

i) Für Wechselstrom ist beim Aufbau der Schalt- anlage in erster Linie auf die **Kraftwirkungen der Kurzschlußströme** Rück- sicht zu nehmen. Über die Ermittlung der Kurz- schlußabschaltleistung zur Auswahl der Schaltergrößen und die **Wärme-Bean- spruchung** der Anlageteile ist bereits im 13. Kapitel ausführlich gesprochen. Als Folge der starken magne- tischen Felder der Stoß- kurzschlußströme werden zwischen den Leitern an- ziehende oder abstoßende Kräfte wirksam, die wie Abb. 469 zeigt, verhee- rende Folgen haben kön- nen. Die Beanspruchun- gen werden noch erhöht, wenn Resonanz zwischen der Eigen- schwingungszahl der Leiter und der einfachen oder doppelten Perioden- zahl des Stoßkurzschlußstromes eintritt. Diese Kräfte müssen für den Aufbau der Schaltanlage und für die Geräte selbst zur Sicherheit für die Gesamtanlage im voraus bestimmt werden.

Im Einphasennetz und beim zweipoligen Kurzschluß im Dreh- stromnetz fließen in den betroffenen Leitern um 180° in der Phasenlage verschobene Ströme gleicher Größe. Für die abstoßende Kraft erhält man die Beziehung (Abb. 470):

$$\begin{aligned}
 K_K &= k_b \cdot 2,04 \cdot I_{K;st_1} \cdot I_{K;st_2} \cdot \frac{l}{a} \cdot 10^{-2} \text{ kg,} \\
 &= k_b \cdot 2,04 \cdot I_{K,st}^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot 10^{-2} \text{ kg/cm.}
 \end{aligned}
 \tag{196}$$

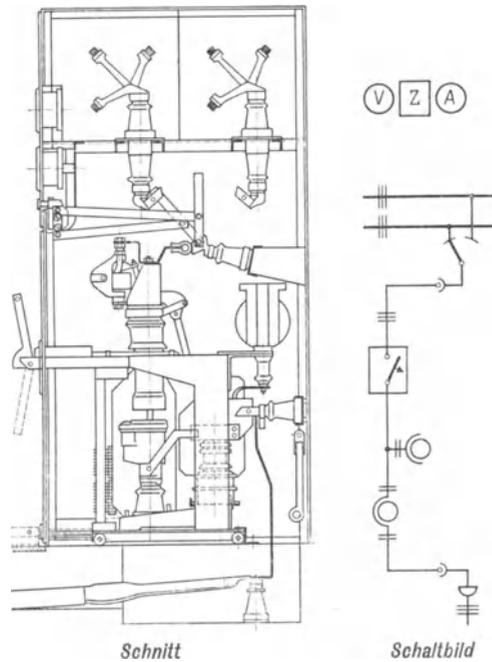


Abb. 468. Stahlgekapselte ausfahrbare Schaltzelle mit Doppelsammelschienen; Schnitt und Schaltbild.

- I_{K, st_1}, I_{K, st_2} Stoßkurzschlußstrom im Leiter 1 bzw. 2 in kA;
- l Länge des Leiters zwischen den Stützpunkten in cm;
- a Abstand der Leiter voneinander in cm;
- k_b Beiwert für Berücksichtigung des Einflusses der Eigenschwingungszahlen.

In Abb. 471 sind Kennlinien für die jeweilige Größe der Kraft in Abhängigkeit vom Stoßkurzschlußstrom und Leiterabstand zusammengestellt unter der Voraussetzung, daß $k_b = 1$ ist.

Obwohl die zwei- und dreipoligen Stoßkurzschlußströme praktisch gleiche Größen

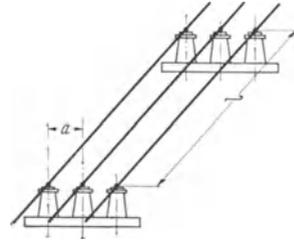


Abb. 470. Maßbild zur Sammelschienen-Kurzschlußbeanspruchung.

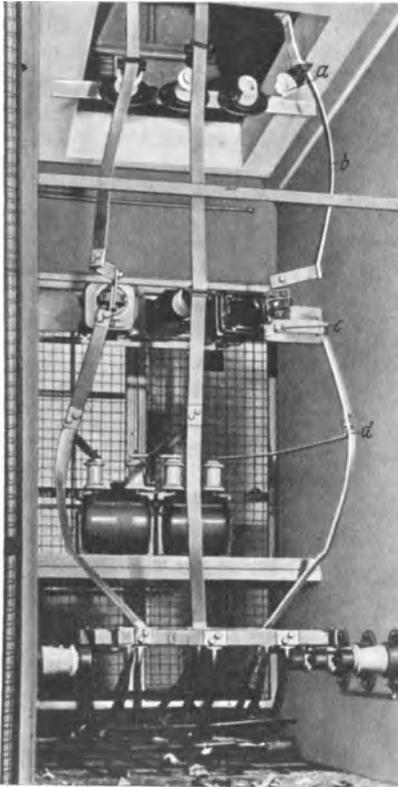


Abb. 469. Kurzschlußzerstörungen in einer 10-kV-Schaltzelle.

a zerstörte Isolatoren, b, d abgegebene Verbindungsleiter, c zerstörter Stromwandler.

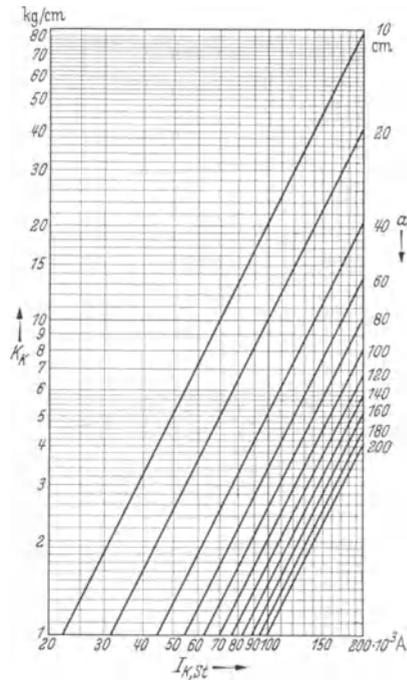


Abb. 471. Mechanische Kraft K_K in kg/cm in Abhängigkeit von Leiterabstand und Kurzschlußstrom beim zweipoligen Kurzschluß ($k_b = 1$).

[$I_{K, st}$ in Amp angegeben.]

haben, sind beim dreipoligen Kurzschluß die wirksamen Kräfte infolge der Phasenverschiebung kleiner. Für diesen Fall und einige allgemein üb-

liche Leiteranordnungen sind die Höchstwerte der Kräfte und deren Angriffsrichtung aus Zahlentafel 33 zu ersehen.

25. Beispiel: In einer Anlage mit Sammelschienenanordnung nach Zahlentafel 33 Verlegung a betrage der Stoßkurzschlußstrom:

$I_{K, st} = 100 \text{ kA}$. Der Abstand der Leiter 1 zu 2 bzw. 2 zu 3 sei: $a = 100 \text{ cm}$.

Die Kraft auf die Leiter 1 bzw. 2 beim zweipoligen Kurzschluß beträgt nach Abb. 471:

$$K_K = k_b \cdot 2,04 \text{ kg/cm}.$$

Für den dreipoligen Kurzschluß wird:

die Kraft auf den Leiter 1: $K_{K_1} = k_b \cdot 0,81 \cdot K_K \cong 1,66 \text{ kg/cm}$,

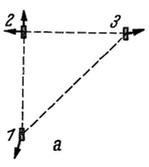
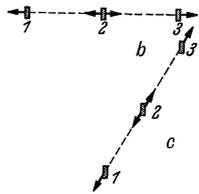
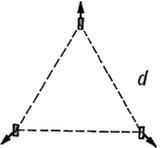
die Kraft auf den Leiter 2: $K_{K_2} = k_b \cdot 0,75 \cdot K_K \cong 1,54 \text{ kg/cm}$,

die Kraft auf den Leiter 3: $K_{K_3} = k_b \cdot 0,81 \cdot K_K \cong 1,66 \text{ kg/cm}$

bei $k_b = 1$.

Bei 120° Phasenverschiebung und sinusförmigem Verlauf der Kurzschlußströme in den drei Leitern erhält man durch Multiplikation der jeweiligen Stromzeitwerte und deren geometrische Addition die Größe und Richtung der wirksamen Kräfte.

Zahlentafel 33. Höchstwerte der auf die einzelnen Leiter wirksamen Kräfte und deren Angriffsrichtung bei dreipoligem Kurzschluß für verschiedene Leiteranordnungen.

Leiteranordnung:	Höchstwerte der auf die einzelnen Leiter wirksamen Kräfte
	$K_{K_1} = k_b \cdot 0,81 \cdot 2,04 \cdot I_{K, st}^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot 10^{-8} = k_b \cdot 0,81 \cdot K_K \text{ kg/cm}$ $K_{K_2} = k_b \cdot 0,75 \cdot 2,04 \cdot I_{K, st}^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot 10^{-8} = k_b \cdot 0,75 \cdot K_K \text{ kg/cm}$ $K_{K_3} = k_b \cdot 0,81 \cdot 2,04 \cdot I_{K, st}^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot 10^{-8} = k_b \cdot 0,81 \cdot K_K \text{ kg/cm}$
	$K_{K_1} = k_b \cdot 0,81 \cdot 2,04 \cdot I_{K, st}^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot 10^{-8} = k_b \cdot 0,81 \cdot K_K \text{ kg/cm}$ $K_{K_2} = k_b \cdot 0,87 \cdot 2,04 \cdot I_{K, st}^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot 10^{-8} = k_b \cdot 0,87 \cdot K_K \text{ kg/cm}$ $K_{K_3} = k_b \cdot 0,81 \cdot 2,04 \cdot I_{K, st}^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot 10^{-8} = k_b \cdot 0,81 \cdot K_K \text{ kg/cm}$
	$K_{K_1} = k_b \cdot 0,87 \cdot 2,04 \cdot I_{K, st}^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot 10^{-8} = k_b \cdot 0,87 \cdot K_K \text{ kg/cm}$ $K_{K_2} = k_b \cdot 0,87 \cdot 2,04 \cdot I_{K, st}^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot 10^{-8} = k_b \cdot 0,87 \cdot K_K \text{ kg/cm}$ $K_{K_3} = k_b \cdot 0,87 \cdot 2,04 \cdot I_{K, st}^2 \cdot \frac{1}{a} \cdot 10^{-8} = k_b \cdot 0,87 \cdot K_K \text{ kg/cm}$

Aus Zahlentafel 33 ist zu ersehen, daß beim dreipoligen Kurzschluß Größe und Richtung der wirksamen Kräfte nicht allein durch die Höhe des Stoßkurzschlußstromes, sondern auch durch die Leiteranordnungen

selbst bedingt sind. Ferner werden bei Leitern nach Anordnung a , b und c die Mittelphasen jeweils zu verschiedenen Zeitpunkten nach zwei Seiten mit dem Höchstwert der Kraft beansprucht, während an den Außenphasen nur einseitige Beanspruchung durch geringere Kräfte auftritt. Für den Mittelleiter ist daher in diesen Fällen die Gefahr der Resonanz besonders groß.

Ferner können unter Berücksichtigung, daß die zulässige Höchstbeanspruchung auf Zug oder Druck bei Porzellanstützern höher ist als die auf Biegung, durch entsprechende Anordnung der Stützer

Zahlentafel 34. Beiwert k_b zur Berücksichtigung des Einflusses der Eigenschwingungszahlen auf die Größe der Kurzschlußkraft.

Eigenschwingungszahlen der Leiter ν_E : Per/s	Beiwert k_b
10	0,4
20	0,6
30	0,9
40	1,0
50	vermeiden
70	1,3
80	1,3
90 ÷ 110	vermeiden
120	1,27
140	1,2
160	1,19
180	1,15

günstigere Beanspruchungsverhältnisse geschaffen werden, wie Anordnung c im Vergleich zu Anordnung b erkennen läßt.

k) Resonanzerscheinungen.

Klingt auch der Stoßkurzschlußstrom allmählich ab, so werden dennoch die Leiter und ihre Befestigungen nach Überwindung ihrer Massenträgheit infolge der zeitlich wechselnden Angriffsrichtung der Kräfte in immer stärker werdende Schwingungen versetzt, wobei der Höchstwert der Beanspruchung erst nach Ablauf mehrerer Perioden er-

reicht ist. Da die wirklichen Kräfte dem Quadrat des Stoßkurzschlußstromes verhältnismäßig sind, werden Schwingungen der Leiter mit einfacher und doppelter Netzfrequenz hervorgerufen. Hinzu kommt, daß jeder stromdurchflossene Leiter infolge seiner Elastizität an und für sich Eigenschwingungen ausführt, von denen aber nur der Schwingung mit Grundfrequenz praktische Bedeutung zukommt. Bei Resonanz zwischen Eigenschwingungszahl der Leiter und erzwungener Schwingung mit einfacher, vor allen Dingen aber doppelter Netzfrequenz wird die mechanische Beanspruchung der Anlageteile wesentlich erhöht. Schon verhältnismäßig niedrige Stoßkurzschlußströme können bei Schwingungsresonanz ebenfalls zu schweren Zerstörungen führen. Es sollen daher Eigenschwingungszahlen der Leiter im Bereich von etwa 50 und 90 bis 110 Per/s vermieden werden. Durch Rechnung und Versuch wurde ferner festgestellt¹, daß bei Eigenschwingungszahlen unter 30 Per/s die tatsächlich auftretenden Kräfte kleiner werden als wie sie die Auswertung der Gl. (196) für den zweipoligen Kurzschluß ergibt, in der $k_b = 1$ zu setzen war. Für Flachleiter, die in Schaltanlagen bis 45 kV fast ausschließlich verlegt werden, sind in Zahlentafel 34 die für k_b in Abhängigkeit von den Eigenschwingungszahlen einzusetzende

¹ Pichler, J.: Short Circuit Forces on Busbars and their Supports in Cellular Switchgear. World Power Sept./Oct. 35.

Werte angegeben. Diese sind in Gl. (196) zur Ermittlung der Kraft K_K bei zweipoligem Kurzschluß einzuführen; die Kräfte beim dreipoligen Kurzschluß sind entsprechend Zahlentafel 33 geringer.

Die sekundliche Eigenschwingungszahl ν_E der Leiter ergibt sich bei Vernachlässigung des Einflusses von Lagerung und Elastizität der Stützisolatoren mit ihrer Befestigung in guter Annäherung zu¹:

$$\nu_E = \frac{22,37}{2\pi \cdot l^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot q}} \text{ Per/s,} \quad (197)$$

E Elastizitätsmodul in kg/cm^2 ,

J äquatoriales Querschnittsträgheitsmoment in cm^4 ,

q Leiterquerschnitt in cm^2 ,

l Leiterlänge zwischen den Stützpunkten in cm ,

ρ Dichte (Masseneinheitswert) in $\text{kg s}^2 \text{cm}^{-4}$.

Durch Einsetzen der in Zahlentafel 35 angegebenen Werte ergeben sich nach Umformung die in Zahlentafel 36 zusammengestellten Beziehungen für die Eigenschwingungszahlen.

1) **Die mechanische Festigkeit der Schaltanlageteile.** Durch Einbau von Stützern und Durchführungen hoher Umbruchskraft bei richtig bemessenen Stützweiten, kurzschlußfesten Leistungsschaltern und Stromwandlern, Trennschaltern mit Sperrvorrichtung, ferner durch Verwendung von Leitern mit großem Widerstandsmoment, Vermeidung von Leiterschleifen und bei geeigneter Abstützung herausgeführter Kabeladern kann volle Kurzschlußsicherheit der Anlage erreicht werden.

Für die Umbruchkraft von Stützern und Durchführungen bis Reihe 45 sind in den VDE-Vorschriften entsprechende Grenzwerte festgelegt. Unter Voraussetzung einer den Isolatorkopf senkrecht zur Achse angreifenden Kraft beträgt diese Umbruchkraft:

in Gruppe A: 375 kg,

in Gruppe B: 750 kg,

in Gruppe C: 1250 kg.

Zur Festlegung der Querschnitte von Sammelschienen und Abzweigleitern muß die durch die tatsächlichen Kurzschlußkräfte hervorgerufene Biegungsbeanspruchung nachgerechnet werden. Die höchstzulässige Biegungsbeanspruchung liegt für:

Kupfer bei etwa 2500 kg/cm^2 ,

Aluminium bei etwa 1100 kg/cm^2 ,

Magnesium bei etwa 1000 kg/cm^2 .

26. Beispiel: Der errechnete zweipolige Stoßkurzschlußstrom betrage $I_{K,St} = 60 \text{ kA}$. Verlegt wird Flachaluminium $60 \cdot 5 \text{ mm}^2$ flachkant bei einem Phasenabstand von 400 mm und einer Stützpunktweite von 1000 mm . Nach Abb. 470 ist die Kraft $K_K = k_b \cdot 1,8 \text{ kg/cm}$. Die Eigenschwingungszahl des Leiters errechnet sich nach Zahlentafel 36 zu:

$$\nu_{E,Al} = 5,17 \cdot \frac{b}{l^2} \cdot 10^5 = 5,17 \cdot \frac{0,5}{10^4} \cdot 10^5 = 25,85 \text{ Per/s.}$$

¹ Hütte Bd. I 26. Aufl. S. 437.

Somit beträgt die tatsächlich auftretende Kraft:

$$K_K = k_b \cdot 1,8 = 0,8 \cdot 1,8 = 1,44 \text{ kg/cm.}$$

Da der Abstand der Stützer 1000 mm beträgt, werden diese mit insgesamt:

$$1,44 \cdot 100 = 144 \text{ kg}$$

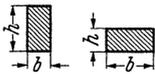
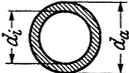
beansprucht. Es genügen Stützer der Gruppe A.

Zahlentafel 35.

a) Festwerte für die Leiterwerkstoffe Cu, Al, Mg zur Ermittlung der Eigenschwingungszahl ν_E Per/s

Werkstoff	Elastizitätsmodul $E: \text{kg/cm}^2$	Dichte $\rho: \text{kg s}^2 \text{cm}^{-4}$
Kupfer:	1100000	$9,08 \cdot 10^{-6}$
Aluminium:	650000	$2,75 \cdot 10^{-6}$
Magnesium:	450000	$1,78 \cdot 10^{-6}$

b) Trägheitsmomente bei verschiedenen Querschnittsformen.

Bauform	Trägheitsmoment $J: \text{cm}^4$	Widerstands- moment $W: \text{cm}^3$	Querschnitt $q: \text{cm}^2$
	$J = \frac{h \cdot b^3}{12}$	$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$	$q = h \cdot b$
	$J = \frac{\pi d^4}{64}$	$W = \frac{\pi d^3}{32}$	$q = \frac{\pi d^2}{4}$
	$J = \frac{\pi}{64} \cdot [d_a^4 - d_i^4]$	$W = \frac{\pi}{32} \cdot \left[\frac{d_a^4 - d_i^4}{d_a} \right]$	$q = \frac{\pi}{4} [d_a^2 - d_i^2]$

Zahlentafel 36.

Eigenschwingungszahlen für die Leiterwerkstoffe Cu, Al, Mg bei verschiedener Bauform.

Werkstoff	Flachleiter $\nu_E: \text{Per/s}$	Rundleiter $\nu_E: \text{Per/s}$	Rohre $\nu_E: \text{Per/s}$
Kupfer . . .	$\nu_E = 3,62 \cdot \frac{b}{l^2} \cdot 10^5$	$\nu_E = 3,13 \cdot \frac{d}{l^2} \cdot 10^5$	$\nu_E = 3,13 \cdot \frac{\sqrt{d_a^2 + d_i^2}}{l^2} \cdot 10^5$
Aluminium .	$\nu_E = 5,17 \cdot \frac{b}{l^2} \cdot 10^5$	$\nu_E = 4,48 \cdot \frac{d}{l^2} \cdot 10^5$	$\nu_E = 4,48 \cdot \frac{\sqrt{d_a^2 + d_i^2}}{l^2} \cdot 10^5$
Magnesium .	$\nu_E = 5,17 \cdot \frac{b}{l^2} \cdot 10^5$	$\nu_E = 4,48 \cdot \frac{d}{l^2} \cdot 10^5$	$\nu_E = 4,48 \cdot \frac{\sqrt{d_a^2 + d_i^2}}{l^2} \cdot 10^5$

Die Biegungsbeanspruchung der Leiter wird unter der Annahme eines beiderseits frei aufliegenden, gleichmäßig belasteten Stabes aus dem Biegungs- und Widerstandsmoment gefunden. Es ist:

das Biegemoment:

$$M_B = \frac{K_K \cdot l}{8} = (144 \cdot 100) : 8 = 1800 \text{ cmkg},$$

das Widerstandsmoment:

$$W = (b^2 \cdot h) : 6 = (6^2 \cdot 0,5) : 6 = 3 \text{ cm}^3,$$

und somit wird die Biegungsbeanspruchung:

$$\sigma_B = 1800 : 3 = 600 \text{ kg/cm}^2.$$

Da die zulässige Biegungsbeanspruchung 1100 kg/cm^2 beträgt, kann der Querschnitt $60 \cdot 5 \text{ mm}^2$ verwendet werden. Wird aus Sicherheitsgründen $k_b = 1$ gesetzt, so ergibt sich σ_B zu 750 kg/cm^2 ; auch in diesem Fall bleibt σ_B unter dem zulässigen Höchstwert.

Für Leistungs- und Trennschalter werden die zulässigen Stoßkurzschlußströme am zweckmäßigsten bei den Herstellern angefragt. Richtwerte sind in den Zahlentafeln 37 und 38 zusammengestellt, die sich auf Regelausführungen beziehen.

Zahlentafel 37. Richtwerte für den zulässigen Stoßkurzschlußstrom bei Leistungsschaltern.

Betriebsspannung kV	Nennstrom A	Abschaltleistung MVA	Zulässiger Stoß- kurzschlußstrom kA
6	400	100 ÷ 125	25 ÷ 30
	600	200	50
	600 ÷ 6000	400 ÷ 600	115 ÷ 150
10	400	100 ÷ 125	15 ÷ 20
	600	200	30
	600 ÷ 6000	400 ÷ 600	70 ÷ 85
20	400	100	8
	600 ÷ 2000	200 ÷ 500	13 ÷ 35
30	600 ÷ 1000	200 ÷ 600	9 ÷ 28
45	600	500	16
45	600	750	24
60	600	1000	24
80	600	1250	22,5
100	600	1500	21,5
200	600	2000	14,5

Für Stromwandler wird nach den Angaben im 18. Kapitel der höchstzulässige Stoßkurzschlußstrom als dynamischer Grenzstrom angegeben. Bei den verschiedenen Ausführungsformen ist allgemein zu beachten, daß Topfstromwandler an Stellen mit hohen Kurzschlußbeanspruchun-

Zahlentafel 38. Richtwerte für den zulässigen Stoßkurzschlußstrom bei Trennschaltern unter Voraussetzung gerader Leiterführung.

Betriebsspannung kV	Nennstrom A	Stützer Gruppe	Zulässiger Stoßkurzschlußstrom kA
10 ÷ 30	200	A	20
	350	A	35
	600	A	65
	600	B	85
	1000	B	105
	1500	B	130
	2000	C	150
45 ÷ 100	3000	C	150
	600	A	35

gen wenig geeignet sind, da infolge der abstoßenden Kräfte der Eingangsisolator in erheblichem Maß gefährdet ist. In diesen Fällen sind Stabwandler zweckmäßiger, die praktisch Stoßkurzschlußströme jeder Höhe aushalten. Infolge der kreisförmigen Anordnung von Primärleiter und Sekundärwicklung wirken auf beide keine zerstörenden Kräfte ein. Für den Betrieb sehr günstig sind auch Stützerstromwandler in Kreuzringform, da hier der gefährdete Eingangsisolator in Wegfall kommt, und der Wandler selbst infolge seines symmetrischen Aufbaues in hohem Maß kurzschlußfest ist. Zahlentafel 39 gibt für verschiedene Wandlerausführungsformen Richtwerte der dynamischen Grenzströme an.

Zahlentafel 39.

Richtwerte für dynamische Grenzströme bei Stromwandlern.

Wanderausführung	Spannungsreihe kV	Dynamische Festigkeit im Vielfachen des Nennstroms $I_w \cdot A$	Umbruchfestigkeit kg
Topfstromwandler	10	$200 \cdot I_w$	250
	20 und 30	$200 \cdot I_w$	375
	45 und 60	$300 \cdot I_w$	750
Querloch-Topfstromwandler und Querloch-Durchführungswandler	10	$240 \cdot I_w$	400
	20	$280 \cdot I_w$	500
	30	$320 \cdot I_w$	600
Schleifenwandler	45	$200 \cdot I_w$	400
	60	$240 \cdot I_w$	500
	80	$280 \cdot I_w$	600
	100	$300 \cdot I_w$	800
Stützerstromwandler	10 ÷ 30	$200 \cdot I_w$	400
	45 ÷ 200	$300 \cdot I_w$	750
Stabstromwandler	10 ÷ 100	praktisch unbegrenzt	250 ÷ 750

m) Die Isolatoren und Leiterdurchführungen; der Sicherheitsgrad. Zur Befestigung der Sammelschienen und blanken Verbindungsleiter,

sowie für den Austritt der Hochspannungsleiter aus dem Gebäude und für den Durchtritt der Verbindungsleiter durch die Wände von Zellen und Trennungsmauern (Umspannerkammern) müssen Stützer und Durchführungen benutzt werden. Hinsichtlich des Isolationswertes und der Baustoffbeschaffenheit gilt das im Band II Gesagte.

Die Isolation der Schaltanlage muß mit der Isolation der Schaltgeräte übereinstimmen, damit an keiner Stelle eine niedrigere Überschlagnspannung gegen Erde oder zwischen den Phasen besteht, die bei Überspannungen besonders gefährdet ist. Es soll daher die Überschlagnspannung nach einheitlichen Gesichtspunkten gewählt werden, wobei zwischen Innenraum- und Freiluftanlagen zu unterscheiden ist. Diese Einheitlichkeit der Geräte- und Leiterisolation findet ihren Ausdruck im Sicherheitsgrad¹ der Schaltanlage für alle Anlageteile. Der VDE hat hierzu, um insbesondere die Geräteisolation auf einheitliche Grundlagen zu bringen, die Leitsätze für den Sicherheitsgrad über 1000 V — LSG VDE 0111/1932 aufgestellt. Als Prüfspannungen für Geräte außer Freileitungsisolatoren werden für nicht geerdete Anlagen festgesetzt bei vollem Prüfgrad:

von 1 bis 2,5 kV $10 U_n$,
über 2,5 kV $2,2 U_n + 20$ kV,

bei eingeschränktem Prüfgrad (nur gültig für Innenraumgeräte):

von 1 bis 10 kV $3 U_n + 2$ kV.

Für zusammengesetzte Schaltgeräte, deren Isolation einerseits, deren Wicklungen oder Widerstände andererseits für verschiedene Spannungen bemessen sind, wird als Nennspannung die Spannung bezeichnet, nach der die spannungführende Wicklung oder der spannungführende Widerstand bemessen, und als Reihenspannung U_r die genormte Spannung, nach der die Isolation bemessen ist. Die Reihenspannung entspricht stets einer der genormten Spannungen.

Der Prüfgrad ist das Verhältnis der Prüfspannung U_p zur Reihenspannung U_r bzw. Nennspannung U_n für solche Geräte, für die keine Reihenspannung besteht (insbesondere Isolatoren, Durchführungen, Kabelendverschlüsse).

Der Sicherheitsgrad der Gesamtanlage oder ihrer Hauptbestandteile (Schaltanlagen, Freileitungen) ist das Verhältnis der geringsten Überschlagnspannung $U_{\bar{u}}$ an irgendeiner Stelle der ganzen Anlage bzw. des betreffenden Teiles zur Betriebsspannung U_b . Der Sicherheitsgrad der Schaltanlage ist nach zwei Richtungen zu beurteilen und zwar einmal nach der Überspannungsbeanspruchung aus atmosphärischen Vorgängen bei Anlagen mit Freileitungen und zweitens nach der Überspannungsbeanspruchung aus Betriebsvorgängen.

Bei der Behandlung der Überspannungsschutzgeräte ist erläutert

¹ Rebhan, J.: Die Sicherheit elektrischer Anlagen gegenüber Stoßspannungen. ETZ 1937 S. 1177. Aigner, V.: Über den Sicherheitsgrad von Hochspannungsanlagen. ETZ 1937 S. 1257. Estorff, W.: Die Bemessung der Isolation elektrischer Hochspannungsanlagen. ETZ 1939 Heft 28/29 S. 825 u. 860.

worden, daß die Höhe der Überspannung bei Freileitungen bestimmt wird aus dem Überschlagswert der Isolatoren bei Spannungsstoß. Da diese Überschlagsspannung bekannt ist, kann somit der Sicherheitsgrad der Freileitungen festgestellt werden, der bei der geringsten Überschlagsspannung — also z. B. einer absichtlich schwächer isolierten Freileitungstrecke — besteht. Wollte man aber diesem Sicherheitsgrad entsprechend auch die Schaltanlage mit allen ihren Einzelteilen isolieren, so käme man, wie vielfache Rechnungen bewiesen haben, zu unmöglichen und unwirtschaftlichen Abmessungen. Aus diesem Grund ist der Sicherheitsgrad der Schaltanlage unter dem Einfluß der Überspannungsschutzgeräte festzulegen. Nach den bisherigen Erfahrungen aus dem praktischen Betrieb ist mit dem Sicherheitsgrad, der sich aus dem Wert der Überschlagsspannungen für die genormten Spannungen nach VDE 0111 bei vollem Prüfgrad ergibt, im allgemeinen auszukommen, sofern die neuesten Überspannungsschutzgeräte nach sorgfältiger rechnerischer und betriebstechnischer Beurteilung der Gesamtanlage oder eines in sich als geschlossen anzusehenden Anlageteiles zur Verwendung kommen. Auf einen genügenden Spannungsabstand zwischen Ansprechspannung des Überspannungsschutzes und Überschlagsspannung der Isolation ist besonders bei hohen Spannungen zu achten.

Der eingeschränkte Prüfgrad und der sich daraus ergebende Sicherheitsgrad ist nur unter den gleichen Gesichtspunkten zu wählen.

Wesentlich ist, daß ältere Anlagen auf ihren Sicherheitsgrad zu überprüfen sind, sofern sie aus kleinen und begrenzten Stromversorgungsverhältnissen in größere z. B. durch Aufnahme in ein größeres verbundbetriebenes Netz eingegliedert werden. Das gilt sowohl für die Geräte- und Leitungsisolation als auch für die Umspanner und Kabel mit ihrem Zubehör unter Berücksichtigung ihrer Reihen- und damit ihrer Prüfspannung bzw. ihrer Überschlagsspannung.

Die Ansicht, Ruhe im Betrieb zu erhalten, wenn die Isolation der Schaltanlagen etwa gleich der der Freileitungen oder entsprechend einer höheren Reihenspannung bei gleichzeitiger Verwendung größerer Isolatoren und Durchführungen gewählt wird, ist nicht vertretbar, da sie jeder technischen und wirtschaftlichen Begründung entbehrt und den Beweis ihrer Richtigkeit fast stets schuldig geblieben ist. Ausgenommen hiervon sind nur vereinzelte Netzpunkte, die aus den ganzen Verhältnissen ihrer Lage und den Geländebeziehungen ihrer Umgebung (besonders gewitterreiche Gegend, durchweg schlechte Erdungsverhältnisse für die Maste) als stark überspannungsgefährdet anzusehen sind. Das ist aber stets besonders zu untersuchen und zumeist erst nach mehrjährigem Betrieb mit Sicherheit feststellbar.

Die Höhe des Sicherheitsgrades ist in deutschen Anlagen heute selten Gegenstand besonderer Untersuchungen, nachdem, wie wiederholt werden soll, bessere und zuverlässigere Überspannungsschutzgeräte durchgebildet und erprobt worden sind. Es liegt daher aus dem Betrieb auch kein Verlangen vor, hierin Änderungen eintreten zu lassen etwa durch Änderung der Prüfspannungen der Schaltgeräte, weil heute der Sicherheitsgrad auch älterer Anlageteile allmählich auf den gleichen Wert

der neuesten Bauten gebracht worden ist, und jede neue Unsicherheit oder Unruhe den Betrieb nur unerwünscht stören würde.

Gegen die Auswirkung von Überspannungen aus Schalt- und atmosphärischen Verhältnissen hat der sich bei Benutzung des vollen Prüfgrades ergebende Sicherheitsgrad in den letzten Jahren zu Bedenken keinen Anlaß gegeben.

Bei Freiluftanlagen ist der Sicherheitsgrad unter entsprechender Wahl der Prüfspannung und Berücksichtigung der Prüfung der Isolatoren unter Regen zu bestimmen, wobei darauf hinzuweisen ist, daß die Stoßüberschlagsspannung praktisch keine nennenswerten Unterschiede bei trockenem und feuchtem Zustand der Isolatoren aufweist.

Zahlentafel 40. VDE-Mindestabstände zwischen blanken Leitern und benachbarten Schaltanlageteilen.

Betriebs- spannung	Mindestabstand		Betriebs- spannung	Mindestabstand	
	bei Innen- anlagen mm	bei Außen- anlagen mm		bei Innen- anlagen mm	bei Außen- anlagen mm
kV			kV		
1	40	—	45	360	470
3	75	—	60	470	580
6	100	—	80	580	720
10	125	180	100	720	900
20	180	260	120	—	1120
30	260	360	150	—	1450
—	—	—	200	—	2000

Hinsichtlich des Sicherheitsgrades in bezug auf die Abstände der Leiter gegeneinander, gegen die Wände, gegen Gebäudeteile und gegen die eigenen Schutzverkleidungen gelten die gleichen Gesichtspunkte. Dazu ist auf die Errichtungsvorschriften für Starkstromanlagen VDE 0101/1934 zu verweisen (Zahlentafel 40). In Anlagen mit hohen Kurzschlußströmen und in Freiluftanlagen mit Berücksichtigung von Wind und Eislast sind größere Abstände — etwa das 1,2- bis 1,4fache der in Zahlentafel 40 angegebenen Werte — erforderlich.

Allgemein gilt für den Betrieb als Grundsatz, daß sämtliche Isolatoren für die einzelnen Spannungen einer Schaltanlage nach einheitlichen Gesichtspunkten und in der Form, sowie in den Abmessungen übereinstimmend gewählt werden. Sie sollen den gleichen Sicherheitsgrad aufweisen. Das vereinfacht auch die Übersicht und die Lagerhaltung wesentlich. Die Normung durch den VDE trägt diesen Betriebswünschen bereits sehr weitgehend Rechnung.

Ferner ist bei der Auswahl der Isolatoren und der Durchführungen nach ihren kleinsten Schlagweiten für die Stoßüberschlagsspannung sowohl für Innen- als auch für Freiluftanlagen die Luftfeuchtigkeit¹ zu beachten, die je nach der Jahreszeit für Deutschland schon in der Ebene Unterschiede bis zu 25 vH aufweisen kann. Wesentlich stärker

¹ Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Trockenüberschlagsspannung von Porzellan-Isolatoren. ETZ 1939 Heft 29 S. 879.

sind die Schwankungen im Gebirge, in trockenen oder an Wasserflächen liegenden Gegenden. Je g/m^3 Feuchtigkeit nimmt die Überschlagnspannung um rd. 1 vH zu (z. B. relative Luftfeuchtigkeit bei $+5^\circ$ etwa 40 vH, dann bis $+25^\circ$ rd. 100 vH). Warme Luft nimmt mehr Luftfeuchtigkeit auf als kalte. Das ist mit Rücksicht auf die Gewitterüberspannungen im Sommer günstig, weil dann die Stoßüberschlagnspannung höher liegt.

Da die Stoßüberschlagnspannung eines Isolators bei positiver Spannung zumeist geringer als bei negativer Spannung ist, wird bei der Festsetzung oder Beurteilung des Sicherheitsgrades hierauf Rücksicht zu nehmen sein. Je mehr sich beide Werte für einen Isolator nähern, um so besser ist dieser und um so zuverlässiger der Sicherheitsgrad.

Die Durchschlagnspannung soll stets höher liegen als die Überschlagnspannung, damit der Isolator früher überschlagen als durchschlagen wird. Auf diese Weise bilden die Isolatoren wiederum gewissermaßen auch eine Sicherheitsfunkenstrecke, denn ein Spannungsüberschlag muß nicht immer notgedrungen eine derartige Beschädigung der Isolatoroberfläche im Gefolge haben, daß dadurch eine Auswechslung notwendig wird, während andererseits ein Durchschlag infolge der Isolatorzerstörung und des Erdschlusses stets zu Betriebsstörungen Veranlassung gibt.

An Stelle von Porzellan werden für Innenräume in Höchstspannungsanlagen und dort, wo infolge großer Kurzschlußströme mit besonders starken mechanischen Beanspruchungen der Isolatoren zu rechnen ist, **Isolierkörper aus Faserstoffen (Repelit) oder Kunstharz (Bakelit, Geax)** benutzt, die sich im allgemeinen gut bewährt haben. Die Isolierkörper werden aus Papier, das mit einer der genannten Massen getränkt wird, nach besonderem Herstellungsgang gefertigt.

Das Repelit (SSW) ist im Gewicht leichter als Porzellan; sein spezifisches Gewicht beträgt 1,25 gegenüber demjenigen von Porzellan 2,3 bis 2,4. Außerdem ist es fester und kann daher im Gegensatz zum Porzellan stärker auf Druck und Zug beansprucht werden. Während bei Porzellan die Biegezugfestigkeit etwa 250 kg/cm^2 für Röhren beträgt, ist diese bei Repelit etwa 500 kg/cm^2 . Seine hohe Dehnung läßt das Repelit für Geräteteile, die starken Schlägen ausgesetzt sind, besonders geeignet erscheinen. Bei den Drehisolatoren von Trennschaltern der höheren Reihen, die auf Verdrehung beansprucht werden, tritt nicht wie bei Porzellan ein Bruch der Isolatorenköpfe auf.

Die Herstellung des Repelits ist weniger von Zufälligkeiten abhängig als die des Porzellans. Sie läßt sich während der ganzen Bearbeitungszeit auf das sorgfältigste beobachten, so daß eine Gewähr für fehlerfreie Stücke im höheren Maß gegeben ist als bei Porzellan.

Bei Durchführungen wird der **Kondensatoraufbau** gewählt, bei dem durch Zwischenschichten von leitenden Stoffen eine gute Feldverteilung auf der Oberfläche und dem Innern erreicht wird. Auf diese Weise kann der Isolierstoff in allen Teilen auf das günstigste beansprucht werden, so daß selbst bei verhältnismäßig kleinen Abmessungen die Durchschlagnfestigkeit einen hohen Wert besitzt. Es können daher Wanddurchführun-

gen aus Repelit wesentlich leichter gehalten werden als solche aus Porzellan. Das Verhalten bei den hohen Prüfspannungen, die die Betriebsspannungen wesentlich überschreiten, ist bei Repelitleitungen günstiger als bei Porzellan, da ein Auftreten von Gleitfunken an der Oberfläche auch bei erheblich über der Prüfspannung liegenden Spannungen nicht auftritt. Durch Lackieren wird ein Schutz gegen den Einfluß der Luftfeuchtigkeit herbeigeführt. Dauernd feuchte Räume sind aber für Aufstellung von Geräten mit Repelitteilen nicht geeignet. Auch für feuchtes Klima z. B. in der Nähe der Meeresküste ist Repelit ungeeignet. Hier kann von der Verwendung von Porzellan nicht abgegangen werden. Wie alle Isolatoren, so müssen auch Repelitisolatoren von Zeit zu Zeit gereinigt werden. Bei diesen Reinigungsmaßnahmen empfiehlt es sich, die lackierte Oberfläche der Repelitkörper mit einem leicht in Ölfirnis getränkten weichen Tuch abzureiben.

Da Repelit nicht dauernd feuchter Luft ausgesetzt werden darf, erhält bei Mauerdurchführungen aus Repelit der ins Freie ragende Teil einen Porzellanüberwurf. Der Raum zwischen Repelitkörper und Überwurf wird mit einer Isoliermasse ausgegossen. Derartige Repelitleitungen sind entweder senkrecht oder geneigt bis zu einem Winkel von 30° zur Waagerechten einzubauen. Es wird dadurch vermieden, daß eine durch die starke Ausdehnung der Isoliermasse bedingte Luftblase infolge der Plastik der Masse den Schutzbereich des Flansches verläßt.

Bakelit (BBC) ist ein Kunstharzerzeugnis, das ebenfalls durch einen besonderen Herstellungsgang gewonnen wird. Das spez. Gewicht beträgt 1,4, der Dielektrizitätsfestwert 3,5 bis 5, die Durchschlagsfestigkeit bei 1 mm Stärke 20 kV, die Wärmebeständigkeit reicht bis 100°C . Bakelit ist gegen Temperaturschwankungen ebenfalls unempfindlicher als Porzellan, weil sich infolge der schlechten Wärmeleitfähigkeit die Oberfläche schnell erwärmt, ohne daß Wärme in das Innere des Bakelitkörpers eindringt. Das Schwitzen wie beim Porzellanisolator ist also nicht vorhanden. Sonst gilt das über Repelit Gesagte auch für Bakelit.

Geax ist ein beiden erläuterten Isolierstoffen ähnliches Erzeugnis, so daß auf dasselbe nicht näher eingegangen zu werden braucht.

n) Die Leiterbaustoffe und die Verlegung. Für die Stromführung innerhalb der Schaltanlage wird Kupfer oder neuerdings in Deutschland auch Aluminium und Magnesium in Form von blanken Drähten, Schienen oder Rohren verwendet. Über Kupfer, seine Strombelastung, die Art der Verlegung und die Ausführung der Geräteanschlüsse, sowie der Verbindungsstellen an Abzweigen ist nichts Besonderes zu sagen, da hier keinerlei Schwierigkeiten auftreten können. Bei großen Strömen werden zumeist mehrere Schienen in rechteckiger Form zusammengeschlossen (gebündelt) und verschraubt. Sie werden dabei mit Luftzwischenräumen verlegt, um die Wärmeabführung durch Schaffung größerer Oberflächen zu erleichtern.

Aluminium ist in großem Umfang erst in den letzten Jahren zur Anwendung gekommen. Die bisher mit diesem Leiterwerkstoff gesammelten Erfahrungen reichen aus, um alle Schwierigkeiten zu beherrschen.

Als eine der Hauptbedingungen für diesen Werkstoff ist zunächst die Reinheit zu nennen, die mindestens 99,5 vH betragen muß. Weiter ist für die Wahl der zu verlegenden Querschnitte als Schienen, Rundstangen, Rohren die Leitfähigkeit bestimmend, die mit $34,8 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$ gegenüber $56 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ für Kupfer eine Erhöhung des Querschnittes bei gleichem Spannungsabfall um 60 vH nötig macht. Durch die Querschnittserhöhung wird nicht nur die geringere Leitfähigkeit, sondern auch die niedrigere Festigkeit des Aluminiums ausgeglichen. Bei Rund- und Hohlleitern, bei deren Verlegung oft Stützweiten von etwa 4 m angewendet werden müssen, kommt weiter ausgleichend noch das geringe spezifische Gewicht hinzu, wodurch der Durchhang eines Al-Leiters bei gleicher Erwärmung um 40 vH geringer ist als der eines gleichwertigen Cu-Leiters. Von grundsätzlicher Bedeutung ist ferner, daß der vergrößerte Al-Querschnitt infolge seines höheren Wärmeaufnahmevermögens sich im Kurzschlußfall unter bestimmten Bedingungen z. B. nur auf 200 bzw. 375°C erwärmt, während unter denselben Verhältnissen ein leitwertgleicher Cu-Querschnitt 300 bzw. 600°C annimmt. Dadurch kann sich auch der geringere Schmelzpunkt des Aluminiums nicht auswirken, und ein örtliches Überhitzen, das mit einem Festigkeitsrückgang verbunden wäre, wird vermieden.

Die Verbindung von Al-Sammelschienen¹ erfolgt durch Gasschmelzschweißung oder durch Verschraubung. Die Gasschmelzschweißung unter Beigabe eines Flußmittels z. B. Firinit ist für alle Querschnitte anwendbar. Die Schweißtemperatur darf aber nicht höher als 325 bis 350° sein, weil sonst die elektrische Leitfähigkeit zu stark herabgesetzt wird.

Bei Schienen von 24 bis 3000 mm^2 Querschnitt werden in der Regel Schraubverbindungen verwendet. Für Ströme von 60 bis 2500 A sind bis zu 14 Schienen parallel nebeneinander anzuordnen.

Unmittelbar vor dem Verschrauben müssen die Stromschlußflächen zur Entfernung der Oxydschicht mit einer groben Feile oder einer Drahtbürste aufgeraut und danach möglichst sofort gegen erneute Oxydation mit einem säurefreien Fett eingestrichen werden². Zur einwandfreien Stromübertragung sind bei Al höhere Flächendrücke als bei Cu nötig; nach den bisherigen Ermittlungen ist ein Mindestflächendruck von $50 \text{ kg}/\text{cm}^2$ erforderlich. Als Schraubenwerkstoff kommt verkadmeter oder feuerverzinkter Stahl mit 55 bis $65 \text{ kg}/\text{mm}^2$ Zugfestigkeit in Frage. Bei größeren Schienenpaketen empfiehlt es sich, an Stelle von Kopfschrauben glatte Bolzen mit doppelseitigem Gewinde zu verwenden, wodurch ein beiderseitiges gleichmäßiges Anziehen der Schrauben möglich ist. Mehr als vier Schrauben werden für eine Verbindung gewöhnlich nicht angeordnet, um eine Anhäufung von Eisen aus elektromagnetischen Gründen zu vermeiden. Nach neueren Versuchen¹ ist auch die Anord-

¹ Metzger, F.: Dauerversuche mit verschraubten Aluminiumverbindungen. AEG-Mitt. 1936 Heft 8 S. 306.

² Richter, R. und Schade, G.: Untersuchungen über die Beständigkeit von Kontaktverbindungen unter besonderer Berücksichtigung von Aluminium. ETZ 1938 Heft 49 S. 1321.

nung von Federringen zwischen Mutter und Unterlegscheibe sehr zu empfehlen; die Federung ergibt eine Vorspannung von etwa 20 kg/cm².

Bei Verbindung von Al- und Cu-Leitern ist Vorsicht geboten, da beide Metalle verschiedene Nennpotentiale haben (Al: - 1,3; Cu: + 0,35). Ist die Verbindungsstelle Feuchtigkeitsniederschlägen ausgesetzt z. B. bei Übergang auf Freiluftanlagen so bildet sich ein Elektrolyt, in dem der Strom vom Al zum Cu fließt und außerhalb der Klemmen in entgegengesetzter Richtung. Korrosionserscheinungen und Schlammabsetzungen sind die Folge. In diesem Fall müssen besondere Verbindungsklemmen verwendet werden, bei denen die mechanischen und elektrischen Berührungsstellen der beiden Metalle in das Innere gelegt und so gegen Korrosion zuverlässig geschützt sind.

Al-Cu-Verbindungen werden in Innenraumanlagen ausschließlich durch Verschrauben ausgeführt. Es genügt dabei, wenn vor dem Verschrauben die Kupferfläche mit der Feile oder einer Drahtbürste aufgeraut wird; die Unebenheiten und die härteren Kupferspäne drücken sich in das weiche Al ein und gewährleisten einen guten Stromschluß.

Die hohen Ströme setzen im Schaltanlagenbau auch für das Anschließen der Zuleitungskabel hohe Flächendrücke voraus. Diese Verhältnisse sind durch Entwicklung gepreßter bzw. gegossener Kabelschuhe mit großen Wickelflanschen berücksichtigt worden, bei denen die Anordnung von vier Schrauben möglich ist. Die einwandfreie Verbindung der Kabelschuhe mit dem Leiter erfolgt je nach Form durch Hülsen oder Gasschmelzschweißung.

Die Wärmeabstrahlung des Al ist verhältnismäßig gering; wird also eine Al-Leiterschiene bei Strombelastung erwärmt, so gibt sie diese Wärme nur ungenügend an ihre Umgebung ab, und der Widerstand des Leiters wächst. Die Belastung eines Al-Leiters kann jedoch erheblich (um etwa 20 vH) gesteigert werden, wenn er mit einem Farb-anstrich versehen wird. Diesem Vorgang liegt das physikalische Gesetz vom „schwarzen Körper“ zugrunde; daher eignet sich ein mattschwarzer Anstrich am besten, aber auch die gewöhnlichen, allerdings matten Phasenfarben nach den VDE-Vorschriften genügen vollkommen.

Vereinzelt werden die Anschlußschrauben für die Schienenverbindungen mit einer besonderen Anlauffarbe gestrichen, die durch ihre Veränderung anzeigt, daß der Anschluß zu stark erwärmt, also überlastet, oder sich in schlechter Stromschlußverbindung befindet.

Die Begleiterscheinungen von Überschlagslichtbögen in Schaltanlagen verlaufen, wie Versuche gezeigt haben, bei Al-Anlagen günstiger und sind mit weniger unangenehmen Folgen behaftet als bei Cu-Anlagen. Die Rauchentwicklung ist geringer als bei Kupfer. Die Rückstände sind nichtleitend.

Der Werkstoff Magnesium ist erst neu in den Schaltanlagenbau eingeführt worden. Die Baustoff-Festwerte wurden, soweit sie zur Beurteilung für die Verwendung im Schaltanlagenbau erforderlich sind, bereits auf S. 300 angegeben. Kommt Mg durch Lichtbogen zur Entzündung, tritt starke Spritzfunkenbildung ein. Die abfallenden Metallspritzer brennen noch längere Zeit weiter, so daß für Schaltgeräte,

Hilfsleitungen, Kabel und die Bedienung besondere Schutzvorkehrungen getroffen werden müssen. Die Anwendung von Mg-Schienen bleibt deshalb vorerst auf Sammelschienen über 500 mm^2 und auf Innenraumanlagen beschränkt. Durch besondere Wände sind die Mg-Sammelschienen von den übrigen Anlageteilen zu trennen. Für Abzweigleitungen in Hochspannungsanlagen, für Niederspannungs-Schaltanlagen in offener und gekapselter Ausführung, Sulfat- und Chloranlagen, sowie in solchen Anlagen, die Lichtbogengasen ausgesetzt sind, wird als Baustoff ausschließlich Cu oder Al verwendet.

In gleicher Weise wie bei Al ist auch für Mg ein Reinheitsgrad von 99,5 vH vorgeschrieben. Zum Schutz gegen salz- und säurehaltige Luft sind blanke Stromschlußflächen mit einem säurefreien Fett zu behandeln. Da Magnesium leichter als Aluminium oxydiert, wird es einer Bichromatbehandlung unterworfen. Mg-Oxyd ist ebenfalls nichtleitend. Aus Gründen besserer Korrosionsbeständigkeit und besserer Wärmeabgabe sollen die gebeizten Magnesiumschienen mit geeigneten Schutzlacken gestrichen werden. Lötverbindungen von Mg-Schienen sind nicht zu empfehlen; autogenes Schweißen hat sich bei Mg als brauchbar erwiesen.

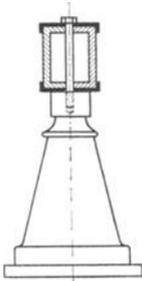


Abb.472. Leiterträger für 11-Leiter.

Lösbare Stromschlußverbindungen können ebenfalls hergestellt werden. Nach Reinigen der Druckflächen können die einzelnen Schienenteile nach Art der Ausführung der Al-Schraubverbindungen zusammengeschraubt werden. Als Flächendruck ist ein solcher von etwa 50 kg/cm^2 zu wählen. Die Verbindungsstellen von Mg mit Al oder Cu sind mit einem geeigneten Lack zu überziehen. Erfahrungen über das Verhalten von Reinformmagnesium in der Nähe von Beton oder in Akkumulatorkammern liegen heute noch nicht vor. Jedenfalls bedarf es noch mancher Versuche, um alle Betriebseigenheiten dieses Baustoffes kennenzulernen.

Bei kleinen und mittleren Anlagen erfolgt die Querschnittsbestimmung für die Maschinenanschlußleitungen, die Sammelschienen und die Geräteverbindungen nur nach der Erwärmung. Bei großen Anlagen ist das nicht mehr zulässig. Insbesondere muß hier auf die Beanspruchung durch die Kurzschlußkräfte, auf den Spannungsabfall und bei Wechselstrom auf die Stromverdrängung im Leiterquerschnitt Rücksicht genommen werden. Der Strom eines Drehstromerzeugers von 20 MW bei $\cos \varphi = 0,8$ und der oft gewählten Maschinenspannung von 6 kV beträgt 2,4 kA je Phase. Das zeigt sofort, daß bei solchen Strömen besondere Berechnungen notwendig werden.

Für die Erwärmung gelten die Gl. 156 u. f.

Die Übertemperatur bei Dauerbelastung soll in der Regel etwa 30° nicht übersteigen. Demzufolge muß bei größeren Strömen der Querschnitt der Leiter auf mehrere parallele Einzelleiter unterteilt werden, für die dann zumeist das Flachprofil oder neuerdings auch das [J]-Profil gewählt wird (Abb. 472). Sind mehrere Parallelleiter erforderlich, so werden sie mit einem bestimmten Zwischenraum etwa gleich der einfachen, oft

Zahlentafel 41. Zulässige Dauerbelastung in A für Verlegung in Innenräumen bei einer Lufttemperatur von 30° C und einer Übertemperatur von 30° C.

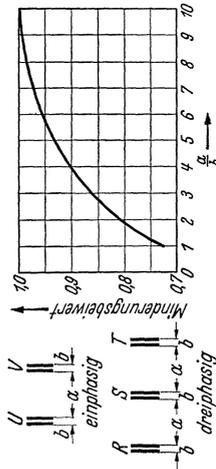
Nennstrom A	Flachleiter aus Kupfer						Flachleiter aus Aluminium						Flachleiter aus Magnesium											
	Ge-wicht		bei Gleich-strom		bei Wechsel-strom		Ge-wicht		bei Gleich-strom		bei Wechsel-strom		Profil		bei Gleich-strom		bei Wechsel-strom		Profil		bei Gleich-strom		bei Wechsel-strom	
	kg/m	mm ²	blank	mit An-strich	blank	mit An-strich	kg/m	mm ²	blank	mit An-strich	kg/m	mm ²	blank	mit An-strich	mm ²	blank	mit An-strich	mm ²	blank	mit An-strich	kg/m	mm ²	blank	mit An-strich
60	0,40	15·3	155	185	155	185	0,12	15·3	120	145	120	145	120	145	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	0,54	20·3	200	240	200	240	0,17	20·3	150	185	150	185	150	185	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
200	0,67	25·3	240	290	240	290	0,34	25·5	230	280	230	280	230	280	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
350	1,07	30·4	325	400	325	400	0,55	40·5	355	455	355	455	355	455	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
350	1,43	40·4	415	515	415	515	0,68	50·5	430	550	430	550	430	550	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
600	2,23	50·5	570	710	565	700	1,36	60·10	635	820	625	810	625	810	60·10	600	780	600	780	60·10	600	780	600	780
600	2,67	60·6	630	785	615	770	0,82	60·5	500	650	490	640	490	640	80·10	800	970	800	970	80·10	800	970	800	970
1000	4,30	60·8	860	1080	840	1050	1,64	80·10	880	1070	850	1040	850	1040	2·50·10	1,70	1030	2·50·10	1,70	1030	1,70	1030	1,70	1030
1500	6,40	6·6	1310	1550	1210	1440	3,28	60·10	1460	1740	1340	1590	1340	1590	2·60·10	2,06	1200	2·60·10	2,06	1200	2,06	1200	2,06	1200
1500	6,40	6·6	1310	1550	1210	1440	3,28	60·10	1460	1740	1340	1590	1340	1590	2·60·10	2,06	1200	2·60·10	2,06	1200	2,06	1200	2,06	1200
2000	14,24	2·80·10	2440	2850	2060	2420	4,36	80·10	1860	2220	1640	2030	1640	2030	2·80·10	2,74	1500	2·80·10	2,74	1500	2,74	1500	2,74	1500
3000	19,80	2·100·10	2920	3420	—	—	6,56	2·120·10	2600	3120	—	—	—	—	2·120·10	4,12	2140	2·120·10	4,12	2140	4,12	2140	4,12	2140
3000	21,40	2·120·10	3420	4000	—	—	9,84	2·120·15	3100	3700	—	—	—	—	2·160·15	6,88	3280	2·160·15	6,88	3280	6,88	3280	6,88	3280
3000	28,48	2·160·10	—	—	3150	3700	13,12	2·160·15	—	—	—	—	—	—	2·200·15	8,26	3350	2·200·15	8,26	3350	8,26	3350	8,26	3350

Bemerkungen zur Zahlentafel: Vorausgesetzt ist Wechselstrombelastung mit 50 Per/s. Die Werte gelten für einen lichten Abstand $a \approx 10 \cdot b$, wobei a den lichten Abstand und b die Breite der Schienenpakete bedeutet. Für $a < 10b$ sind die Stromwerte mit einem Minderungsbeiwert gemäß nebenstehender Kennlinie zu vervielfachen. Es soll jedoch $\frac{a}{b}$ nicht kleiner als 2 sein.

Die Werte für gestrichene Schienen gelten unter der Voraussetzung, daß die Außenflächen des Schienenpaketes gestrichen sind. Die Strombelastungen gelten nur für aufrecht nebeneinander gestellte Schienen. Bei liegend über- oder nebeneinander verlegten Schienen gelten die Werte nur bis zu 1,5 m Schienenlänge.

Alle in der Zahlentafel angegebenen Belastungen gelten für eine Übertemperatur der am stärksten belasteten Schiene eines Paketes von $t_{max} = 30^\circ C$. Dieses trifft bei 2 und mehr parallelen Schienen für die Schiene zu, die der Rückleitung oder der benachbarten Phase zunächst liegt. Für eine von 30° verschiedene Übertemperatur t_x ergibt sich die zugehörige Strombelastung I_x aus der Beziehung:

$$I_x = I_{300} \sqrt{\frac{t_x}{30}}$$



Zahlentafel 42. Zulässige Dauerbelastung in A für Rundkupfer, Kupferrohr, Rundaluminium und Aluminiumrohr in Innenraumanlage bei 30° Lufttemperatur und 30° Übertemperatur.

Rundkupfer						Rundaluminium					
Durchmesser	Gewicht	bei Gleichstrom		bei Wechselstrom 50 Per/s		Durchmesser	Gewicht	bei Gleichstrom		bei Wechselstrom 50 Per/s	
		blank	mit Anstrich	blank	mit Anstrich			blank	mit Anstrich	blank	mit Anstrich
mm	kg/m					mm	kg/m				
10	0,699	210	250	210	250	10	0,21	160	190	160	190
16	1,79	410	480	410	480	16	0,55	310	380	310	380
20	2,80	550	660	535	640	20	0,86	420	500	410	490
30	6,33	950	1150	900	1085	30	1,93	720	900	690	870
Kupferrohr						Aluminiumrohr					
20/16	1,0	325	390	430	480	20/14	0,44	300	360	300	360
23/19	1,17	370	450	470	540	30/22	0,89	490	610	490	610
26/22	1,35	410	500	530	600	40/32	1,23	640	820	640	820
26/20	1,92	490	600	630	720	50/44	1,21	645	850	645	850
26/18	2,46	560	675	720	810	60/54	1,46	760	1000	760	1000
30/24	2,26	560	690	710	800	70/66	1,15	715	975	715	975
30/22	2,90	640	780	810	920	80/76	1,32	800	1100	800	1100
40/34	3,12	750	920	915	1050	90/86	1,48	900	1230	900	1230
40/32	4,00	850	1050	1030	1200	70/64	1,70	870	1190	870	1190
50/44	3,95	920	1150	1100	1300	80/74	1,96	980	1340	980	1340
50/42	5,10	1050	1300	1250	1470	90/84	2,22	1090	1500	1090	1500

auch der doppelten Schienenstärke zu Bündeln vereinigt (Abb. 473 und 474). Die Strombelastung muß dann um etwa 3 vH zurückgesetzt werden, wenn die Schienen hochkant, um etwa 8 vH, wenn sie flach angeordnet werden. Im waagerechten Verlauf soll daher die Hochkantverlegung bevorzugt werden.



Abb. 473. Leiterträger für 2 bis 4 Hochkantschienen.

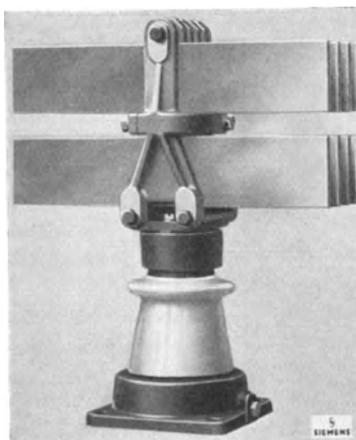


Abb. 474. Leiterträger für 4 bis 8 Hochkantschienen.

Für Verbindungsleiter bis etwa 600 A wird an Stelle der Flachschiene auch der runde Volleiter gewählt. Dabei ist darauf zu achten, daß der kleinste Querschnitt nicht unter einem Durchmesser von etwa

7 bis 8 mm genommen wird. Bei höheren Spannungen soll dieser Mindestdurchmesser 10 mm nicht unterschreiten. Bei Spannungen über 35 kV wird Rohr verwendet, einmal um an Baustoff zu sparen und dann um Strahlungsverluste zu vermeiden. Aus Zahlentafel 41 und 42 sind die zulässigen Dauerbelastungsströme für die Leiterbaustoffe Cu, Al und Mg bei den verschiedenen Querschnittsformen zu ersehen.

Sehr zu empfehlen ist in einer Schaltanlage möglichst

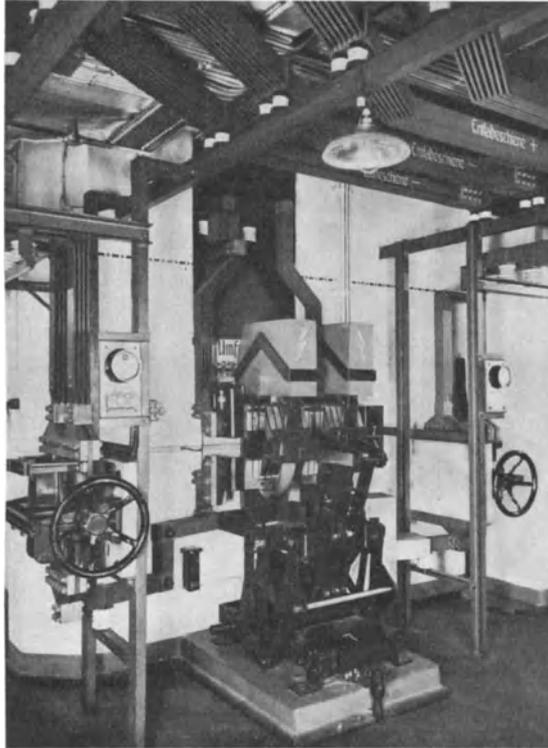


Abb. 475. Leiterverlegung bei großen Strömen in einem Gleichrichterwerk; Anschluß an Schnell-
schalter.

gleichartige Profile und Baustoffe zu benutzen also entweder Flachsienen oder Runddrähte oder Rohr.

Für Gleichstrom werden die Schienen nebeneinander angeordnet (Abb. 475). Besonderes ist dabei nicht zu beachten, da sich der Strom gleichmäßig auf die Leiter verteilt.

Für Wechselstrom ist auf die Stromverdrängung (Skinneffekt) und den Blindspannungsabfall zu achten.

Infolge des Skinneffektes, der Selbstinduktion und der gegenseitigen Induktion verteilt sich der Strom ungleich über den Leiterquerschnitt. Insbesondere können Leiter, welche aus mehreren parallelen Schienen

zusammengesetzt sind, in den einzelnen Schienen erhebliche Temperaturunterschiede aufweisen. Bei Einfachleitern tritt die Induktionswirkung weniger in Erscheinung, weil hier Wärmeausgleich möglich ist. Der Skineffekt kann bei Strömen bis etwa 350 A vernachlässigt werden.

Aluminium ist hinsichtlich der Stromverdrängung ungünstiger als Kupfer. Da die Wirbelstromverluste ungefähr verhältnismäßig mit der Frequenz, der Leitfähigkeit des Baustoffes und dem Quadrat des Querschnittes anwachsen, hat Aluminium nur etwa 65 vH der Wirbelstromverluste von Kupfer gleichen Querschnittes, aber über 160 vH dieser Verluste bezogen auf gleichen Leitwert¹.

Um bei großen Strömen eine möglichst gleiche Strombelastung der Leiter zu erhalten, werden bei längeren Niederspannungs-Hochstromleitungen Stromweichen oder Zusatzeisen-drosseln verwendet. Abb. 476 zeigt den Grundgedanken solcher Weichen und Abb. 477 und 478 die praktische Ausführung. Hinsichtlich der Leiterform am vorteilhaftesten sind Rohr-, Kasten- oder auch C-Profile.

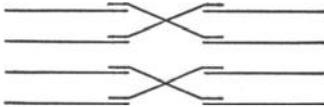


Abb. 476. Stromweiche für 4 Leiter.

Der Wirkspannungsabfall spielt zumeist keine Rolle, weil die Strombelastung und die Länge der Leiter gering sind.

Wohl zu beachten ist aber weiter der Blindspannungsabfall. Es gilt hierzu alles im Band II über die Berechnung des induktiven Spannungsabfalles Gesagte in gleicher Weise. Da bei großen Strömen stets

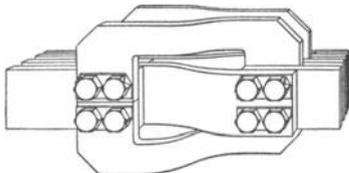


Abb. 477. Feste Stromweiche.

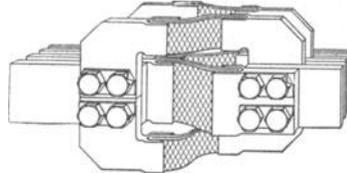


Abb. 478. Biegsame Stromweiche für längere Leiter.

mehrere Schienen zu einem Leiter zusammengeschlossen werden, ist die ungleiche Stromverteilung infolge der Selbstinduktion und der gegenseitigen Induktion für die Erwärmung der einzelnen Schienen und für den Spannungsabfall zu beachten.

Das Neben inanderverlegen von mehr als 4 Flachleitern ist bei Wechselstrom mit Rücksicht auf die ungleiche Stromverteilung auf die innen liegenden Leiter wenig zweckmäßig. Abhilfe kann dadurch geschaffen werden, daß man beispielsweise statt drei Flachleiter nur zwei breitere Flachleiter vom gleichen Gesamtquerschnitt verlegt. Bei mehr als 4 nebeneinanderliegenden Schienen sind diese nach Abb. 474 zu verlegen.

¹ Schwenghagen, H.: Arch. Elektrotechn. Bd. 17 (1926) S. 537. Johann, Dr. H.: Anordnung von Sammelschienen für hohe Stromstärken VDE-Fachberichte 1935 S. 71. Pink, R.: Neuartige Abstützung von Sammelschienen einer Hochspannungsanlage mit besonders hohen Anforderungen. AEG-Mitt. 1939 Heft 5 S. 253.

Auch die gegenseitige Anordnung der einzelnen Phasen in einer Ebene, im Dreieck, in einer Verschachtelung oder in andere Form muß besonders untersucht werden. Es würde zu weit führen, hierauf im einzelnen einzugehen. Jedenfalls ist bei großen Schaltanlagen das Angebot auch auf die Beurteilung dieser Verhältnisse zu überprüfen, wobei Leitermenge, Leiteranordnung, gegebenenfalls Verdrillungen (Abb. 476), Spannungsabfall und Erwärmung gegenüberzustellen sind.

Zu beachten ist weiter, daß hohe Wechselströme infolge ihrer Streufelder in benachbarten Eisenteilen hohe Erwärmungen herbeiführen können, und der Spannungsabfall dadurch vergrößert wird. Darauf ist der Schaltanlageaufbau ebenfalls zu prüfen.

Die Einwirkung des Kurzschlußstromes auf die Schaltanlagenleiter ist im 13. und 18. Kapitel behandelt worden. Besonders ist darauf hinzuweisen, daß hohe Kurzschlußströme für die Verbindungsstellen, Geräteanschlüsse, Abzweigstellen usw. gefährlich werden, weil an diesen die Erwärmung größer wird und dann sog. Spratzfeuer auftritt, das zu Überschlägen führen kann.

Die Leiterverlegung. Die Schalter sind mit elastischen Zwischenstücken an die Leiter anzuschließen, damit die Stütz- oder Durchführungsisolatoren durch die Erschütterungen beim Schalterausschalten nicht beschädigt werden.

Für längere Sammelschienen sind zum Längenausgleich bei Temperaturänderungen etwa alle 16 m federnde Ausgleichstücke vorzusehen. Um eine gleichmäßige Verteilung der Längenausdehnung auf alle Ausgleichstücke zu erzielen, wird zweckmäßigerweise in der Mitte zwischen zwei Ausgleichstücke ein Stützer angeordnet, an dem die Schiene zu befestigen ist.

Auch sämtliche Steuer-, Melde- und sonstigen Niederspannungsleitungen zu Hilfsgeräten, Schalterantrieben, Niederspannungstromkreisen der Meßwandler usw. sind sehr sorgfältig und übersichtlich unter Benutzung von Anschlußklemmen und Klemmleisten anzuordnen. Sie sollen nach Möglichkeit in abgedeckten Kanälen im Fußboden der einzelnen Stockwerke oder nach Abb. 461 in den Schaltzellen verlegt werden, damit sie jederzeit leicht zugänglich sind und untersucht werden können. Das Einziehen mehrerer Steuerleitungen in ein Rohr ist nicht zweckmäßig, da eine Prüfung sehr schwer durchführbar ist, und es nur zu leicht vorkommen kann, daß ein Teil der Schaltanlage außer Betrieb gesetzt werden muß, weil eine an sich bedeutungslose Störung in einer Melde- oder Steuerleitung eingetreten ist. Nach dieser Richtung wird noch häufig gefehlt. Außerdem empfiehlt es sich, die Steuerleitungen usw. mit verschiedenen Farben, Bezeichnungsschildern oder Prüfmarken zu versehen, sofern es sich um eine größere nebeneinander liegende Anzahl handelt, damit auch auf diese Weise eine leichte Untersuchung bewerkstelligt werden kann. Als sehr gut hat sich die Benutzung von vieladrigen Kabeln erwiesen.

Die Stromzuleitung von den Maschinen zu den Schaltgeräten erfolgt, sofern die Maschinengehäuse nicht durch den Fußboden hindurchtreten, also eine Unterkellerung des Raumes nicht

erforderlich machen (kleine Stromerzeuger), zumeist durch Kabel (ohne Juteumspinnung wegen der Brandgefahr), die im Maschinenhausfußboden in gemauerten Kanälen oder Tonrohren verlegt werden. Die Kabel müssen vorzüglich isoliert und besonders gegen Feuchtigkeit geschützt sein, da sich durch Kondenswasserbildung bei Temperaturschwankungen oder durch andere Ursachen Feuchtigkeit in den Kanälen bilden kann. Es ist aus diesem Grund auch für eine gute Belüftung dieser Kanäle Sorge zu tragen. Bei blanken Kupferschienen oder Aluminiumschienen auf Isolatoren in Kanäle verlegt ist Vorsicht geboten. Eine solche Ausführung schließt die Gefahr in sich, daß durch Fremdkörper, Schimmelbildung auf den Isolatoren, Ratten u. dgl. Erd- und Kurzschlüsse zwischen den einzelnen Polen oder Phasen herbeigeführt werden können.

Bei Maschinen, die eine Unterkellerung erfordern, sollen die Anschlußklemmen am tiefsten Punkte des Maschinengehäuses liegen; die Ableitung erfolgt dann entweder auch durch Kabel oder bei großen Strömen und begehbarem Keller durch blanke, auf Isolatoren hoch verlegte runde oder rechteckige Kupfer- bzw. Aluminiumschienen.

Für sehr große Ströme empfiehlt es sich, die Pole oder Phasen vollständig räumlich zu trennen, also einen besonderen Kanal für jeden Pol anzulegen, um Kurzschlüsse sicher zu verhüten.

o) Die Erdung. Nach den VDE-Vorschriften¹ müssen in Schaltanlagen mit Spannungen über 250 V gegen Erde alle Metallbauteile, die im Regelbetrieb spannungslos sind, aber infolge eines Fehlers Spannung gegen Erde annehmen können (z. B. Durchbruch der Isolation, Lichtbogenüberschlag, Bruch eines Stützers u. dgl.) gut leitend mit Erde verbunden werden. Hierzu gehören u. a. alle nicht spannungsführenden Metallteile von Maschinen, Umspannern, Schaltgeräten, ebenso die Metallgehäuse oder Frontringe aller unmittelbar an Netzspannung angeschlossenen Meßgeräte, sofern sie nicht isoliert eingebaut oder durch besondere Maßnahmen gegen zufällige Berührung geschützt sind. Sind die Meßgeräte an Meßwandler angeschlossen, brauchen ihre Gehäuse nicht geerdet zu werden, da die Niederspannungswicklungen aller Meßwandler einpolig zu erden sind. Die Gehäuse der Meßwandler selbst sind mit Erdungsschraube versehen und ebenfalls an die Erdleitung anzuschließen. Des weiteren sind die Gerüste der Schaltanlage, Kabelendverschlüsse und zugängliche Muffen, die Flansche der Durchführungen und Stützer gleichfalls zu erden. Die in den Hochspannungsanlagen verlegten Peschel-, Stahlpanzer oder ähnliche Rohre sind vor Austritt aus den Hochspannungszellen ebenfalls mit Erde zu verbinden. Geräte, Isolatoren, Durchführungen u. dgl., die in einen gemeinsamen Eisenrahmen eingebaut sind, brauchen nicht einzeln geerdet zu werden; es genügt die Erdung des gemeinsamen Einfaßeisens an einer Stelle. In Duro- und ähnlichen eisenarmierten Anlagen, sowie bei eisernen Gerüsten läßt sich durch Verschweißen oder durch geeignetes Verschrauben der einzelnen Stoßstellen des Eisengerüsts eine wesentliche Vereinfachung der Ge-

¹ Leitsätze für Erdungen in Wechselfspannungsanlagen über 1 kV. VDE 0141.

samterdleitung erzielen. Als gutleitende Verbindung hat sich u. a. auch für Stahlbinderschalttafeln eine Verschraubung unter Verwendung von Zahnscheiben erwiesen. Alle zu erdenden Geräte werden durch sogenannte Abzweigungen auf kürzestem Weg an eine Haupterdleitung angeschlossen. Die unter sich zu verbindenden Haupterdleitungen werden über Bänderder mit Rohr- oder Tränkerdern außerhalb der Schaltanlage verbunden.

Für Haupt- und Abzweigungen werden im Regelfall Flachleiter aus feuerverzinktem Bandedeisen oder Rundleiter aus Kupfer verwendet. Bei Eisen genügt ein Querschnitt von 100 mm^2 , bei Kupfer ein solcher von 50 mm^2 . Die Verbindung der einzelnen Teilstücke der Erdleitungen hat durch gesicherte Klemmen zu erfolgen. Als sehr zweckmäßig haben sich Befestigungsklemmen mit Schlagdübel für die Verlegung an Wänden aus Ziegelsteinen, Beton u. dgl. gezeigt.

Die Rohrerder werden im Regelfall aus feuerverzinkten Gasrohren mit $1\frac{1}{2}''$ Durchmesser von 2 m Länge hergestellt; die Bänderder aus feuerverzinktem Bandedeisen mit 90 mm^2 Querschnitt sind mindestens 25 bis 30 cm tief im Erdboden zu verlegen. Die Rohrerder werden am zweckmäßigsten an den Ecken eines Vielecks angeordnet und durch feuerverzinkte Bänderder untereinander und strahlenförmig mit den Haupterdungsleitungen der Schaltanlage verbunden. Der Abstand der Rohrerder soll mindestens 3 bis 4 m betragen.

Um bei schlechten Bodenverhältnissen (sandigem Boden) mit geringen Mitteln gute Erdungsanlagen zu erzielen, verwendet man Tränkerder (gelochte Rohrerder), die mit einer Sodalösung gefüllt sind. Die Füllung ist je nach der Bodenbeschaffenheit in Zeitabständen von $\frac{2}{3}$ bis 1 Jahr zu erneuern. Die Köpfe der Tränkerder müssen daher leicht zugänglich sein, um das Nachfüllen der Flüssigkeit ohne Schwierigkeiten durchführen zu können. In gleicher Weise wie die Rohrerder sind die Tränkerder mit den Haupterdungsleitungen der Schaltanlage über Bänderder zusammenzuschließen.

Die Anzahl der Rohr- bzw. Tränkerder und damit Umfang und Kosten einer Erdungsanlage sind einmal durch die Ströme bestimmt, die von der Erdungsanlage überzuleiten sind und zum zweiten durch den spezifischen Erdwiderstand am Erderort selbst. Zuverlässige Messungen über den spezifischen Erdungswiderstand an Ort und Stelle lassen sich nur mit Sondergeräten (Erdungsmesser von S. & H.) durchführen. Schutz- und Betriebserdungen sind im allgemeinen getrennt anzulegen. Die Blitzableiter der Schaltanlagegebäude können ohne weiteres an die Schutzerdung angeschlossen werden.

Vierter Abschnitt.

Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen.

19. Die Wirtschaftlichkeit.

a) **Einleitung.** Ist die gesamte Anlage — sei es Neuanlage oder Erweiterung eines Kraftwerkes, Beschaffung neuer Betriebseinrichtungen, Bau einer Leitungsstrecke, Neuanschluß von Abnehmern, Änderung in der Betriebsmittelzuführung zum Kraftwerk, kurz die Aufwendung irgendeines größeren Kapitals für die technischen Einrichtungen eines Unternehmens — entworfen und in den Kosten zusammengestellt, so ist die Schlußarbeit die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit. Aus dieser soll klar hervorgehen, welchen wirtschaftlichen Wert die Anlage im Rahmen des Gesamtunternehmens hat, ob ein bisheriger technischer Zustand mit entsprechendem Gewinn zu ändern empfehlenswert ist, bzw. ob ein neu zu errichtendes Werk oder Teile einer bestehenden Anlage mit Einnahmen rechnen können, die neben der Deckung der Betriebsausgaben auch eine Verzinsung, Abschreibung und Rücklagen, sowie einen angemessenen Gewinn zu erzielen gestatten. Aus der Wirtschaftlichkeitsberechnung z. B. für ein Kraftwerk soll hervorgehen, welche Selbsterzeugungskosten entstehen und mit welchen Preisen für die Leistung und die nutzbar abgegebene kWh gerechnet werden kann. Dabei spielt es letzten Endes keine Rolle, ob es sich um eine Eigenanlage oder ein öffentliches Werk handelt, denn beide müssen bei guter Betriebsleitung wirtschaftlich arbeiten.

Wirtschaftliche Untersuchungen theoretischer Art, oft auch mit Zuhilfenahme höherer mathematischer Rechnungsformen, wie sie im Schrifttum häufig zu finden sind, sollen für die hier anzustellenden Betrachtungen nicht vorgenommen werden. Die Praxis rechnet sehr einfach und nüchtern, zumal die Erzeugungs- und Abnahmeverhältnisse immer so stark innerhalb eines Jahres und weiter über längere Zeiträume schwanken, daß theoretische Feststellungen praktisch zumeist wertlos sind.

In den verschiedenen Abschnitten dieses Werkes ist stets weitgehendst darauf hingewiesen worden, welchen Einzelheiten einer Anlage nicht nur nach der technischen, sondern auch nach der wirtschaftlichen Seite besondere Beachtung zu schenken ist. Grundlegend gilt hier wie überall, daß das technisch Beste unter richtiger Wür-

Besondere wirtschaftliche Untersuchungen und Zahlenangaben für die Wahl der Stromart werden in diesem Abschnitt nicht behandelt. Für Gleichstrom ist zu verweisen auf:

Rachel, A.: Die technisch-wirtschaftliche Seite der Gleichstrom-Hochspannungsübertragung. Elektr.-Wirtsch. 1935 Heft 32 S. 717.

digung seiner Vorzüge immer noch das Billigste ist. Dieses darf nicht aus dem Auge verloren werden, nur hat der Ingenieur bei der Wahl der verschiedenen Ausführungsformen ernst und vorsichtig zu Werke zu gehen.

Die Wirtschaftlichkeit für eine Gesamtanlage oder für Teile derselben (einzelne Maschinen, einzelne Strecken, Erweiterungen, Einführungen von technischen Neuerungen u. dgl.) wird bestimmt durch die Höhe des Baukapitals, seine Ausnutzung und die laufenden Betriebsausgaben.

Nur dann, wenn die Wirtschaftlichkeit für die Anlage selbst oder durch sie für andere Teile des Unternehmens gewährleistet ist, sollte der betreffende Entwurf zur Ausführung kommen, vereinzelt Fälle ausgenommen, in denen die Betriebsführung oder die Betriebssicherheit den Ausschlag gibt. Aber auch hier müssen dann mittelbare wirtschaftliche Vorteile verbunden sein.

Die Aufstellung jeder Wirtschaftlichkeitsberechnung, sei es auf dampftechnischem, wärmetechnischem, wassertechnischem, elektro-technischem Gebiet ist keine einfache Aufgabe, die mit wenigen Zahlen abgetan werden kann. Will man nicht genauer in diesen Stoff eindringen, so sollte man wirtschaftliche Untersuchungen ganz unterlassen, denn wenn schon strenge Feststellungen immer noch einen bedeutenden Grad von Unsicherheit besitzen, so ist das vollends der Fall bei oberflächlichen Rechnungen. Mehr Schaden und Enttäuschungen sind dann oft die betrübliche Folge.

Besonders sorgfältige Erwägungen nach allen Richtungen müssen vorausgehen, wenn die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerkes für die öffentliche Versorgung festgestellt werden soll. Die Erörterungen besonders im Band III/1 lassen unschwer erkennen, welche Unsicherheiten nicht nur bei jeder Neuanlage, sondern auch bei jeder Erweiterung bestehen, weil die Stromabsatzverhältnisse in keinem Fall so sicher vorausgesehen werden können, daß sie eine feste Grundlage für alle Rechnungen bilden. Bei Eigenanlagen für industrielle Betriebe ist das ungleich einfacher. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung für diese wird sich aus dem folgenden allgemeiner gehaltenen leicht herauschälen lassen, so daß ein besonderes Eingehen auf diesen Fall unterbleiben kann. Auch alle rein technisch-wirtschaftlichen Untersuchungen, wie sie im Band I bis III/1 behandelt und als geklärt vorausgesetzt werden, fallen nicht in diesen Abschnitt. Es soll vielmehr festgestellt werden, mit welchen Preisen die erzeugte elektrische Arbeit an bestimmter Stelle dem Verbraucher zur Verfügung gestellt werden kann, so daß einmal das Kraftwerk wirtschaftlich arbeitet, ferner aber auch wettbewerbsfähig ist. Daß letzteres heute ganz besonders wieder in Erscheinung tritt, muß ein Grund mehr dafür sein, nichts außer acht zu lassen, denn in jedem Fall ist auf die Zukunft Rücksicht zu nehmen, die mit der Änderung der allgemeinen wirtschaftlichen Verhältnisse zu teuer und technisch unwirtschaftlich gebaute Anlagen in schwerste finanzielle Gefahren bringen könnte.

b) Die Anlagekosten werden durch den Umfang der Anlage bestimmt. Bei der Feststellung dieser Kosten wird oft nicht die Sorgfalt angewendet,

die unbedingt zu verlangen ist. Soll die Wirtschaftlichkeit untersucht werden, so ist der gesamte Umfang der Anlage zu berücksichtigen einschließlich aller Nebenkosten, Nebeneinrichtungen, Grund und Boden, Gebäude, Straßen, Fracht, Verpackung, Einbau, gegebenenfalls auch Bauzinsen bei längerer Bauzeit. Einen Teil dieser Kosten unter dem Sammelposten „Unvorhergesehenes“ mit ein paar Prozent berücksichtigen zu wollen, ist eine viel geübte Praxis, die nur zu oft das Ergebnis liefert, daß das Unvorhergesehene tatsächlich in des Wortes vollster Bedeutung unvorgesehene Summen (nicht nur kleine Beträge) ergab, die überraschend hoch ausfielen. Also sollte der entwerfende Ingenieur in der Entwicklung von Anlagekosten sehr vorsichtig und gewissenhaft sein. Damit gewinnt er gleichzeitig die notwendigen Grundlagen für die richtige Erfassung aller Einzelkosten. Ganz besonders ist ferner darauf zu achten, daß die Baukosten nicht unzulässig überschritten und durch fortgesetzte Entwurfsänderung unsicher gemacht werden, bis die Inbetriebsetzung und damit die nutzbringende Verwertung der Anlage einsetzt. Hierauf ist im Band III/1 wiederholt und nachdrücklichst aufmerksam gemacht worden.

Bei Vergleichsberechnungen zwischen Eigenanlage oder Anschluß an ein öffentliches Kraftwerk, wie sie namentlich für industrielle Unternehmungen und größere Städte notwendig sind, ist der Umfang der Anlagen auch hinsichtlich der Aushilfseinrichtungen (Reserve) zu prüfen. Diese letzteren sind es oftmals, die die Anlagekosten so wesentlich beeinflussen, wenn sie auf die jederzeit gesicherte Leistung bemessen werden, daß der Anschluß an ein größeres öffentliches Werk vorteilhafter wird, ganz abgesehen von wehrwirtschaftlichen Gesichtspunkten (Luftschutz, Brennstoffheranführung, Mangel an Bedienungsleuten).

Bei Wärmekraftwerken ist auch die Beschaffung und Lagerung der Betriebsstoffe mit einzuschließen und zwar dann besonders, wenn bei Kohlenfeuerung nicht eigene Gruben vorhanden sind.

Aus überschläglichen Vorentwürfen den Umfang einer Anlage festzustellen und die zu erwartende tatsächliche Ausführung durch prozentuale Zuschläge zu berücksichtigen, kann zu völlig falschen Zahlen führen. Namentlich bei Wasserkraftanlagen besteht hier die Gefahr, sich stark zu unterschätzen. Dennoch muß man bei allerersten Voruntersuchungen oft auf solche ungefähren Richtpreise zurückgreifen, um erste Grundlagen für Kraftwerkskosten zu schaffen, die dann mit den Baukosten für die Leitungen und Umspannwerke die erste Ermittlung des jährlichen Kapitaldienstes und daraus diesen Anteil an den Selbstkosten gestatten.

Aus der Einzelaufstellung der Baukosten ist festzustellen, welche besonderen Zusatzanlagen wie z. B. mechanische Kohlenfördererinnenrichtungen, Anschlußgleise oder Wasserkanalanschluß, Aschebeförderung u. dgl. die Anlagekosten verteuern. Auf diese Teil-Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen der Gesamtkostenfeststellung muß besonders hingewiesen werden. Einzelheiten hierzu wie überhaupt zu Maschinenanlagen sind im Band III/1 in breitem Umfang behandelt.

Bei der Gesamtkostenermittlung ist noch der Zinsaufwand zu

berücksichtigen, der für das Baukapital während der Bauzeit entsteht. Bei großen Bausummen wird dieser Kostenanteil nach dem Zahlungsplan im einzelnen festgestellt. Mit einem solchen Zahlungsplan genauestens nach Bestellung und Baufortschritt durchgearbeitet lassen sich oft recht beachtliche Ersparnisse an Bauzinsen erreichen. Bei kleineren Anlagen verfährt man zumeist etwas summarischer, indem man je nach der Lage auf dem Geldmarkt 6 oder 8 vH als Bauzinsen, gegebenenfalls einschließlich Kapitalunkosten je Baujahr zuschlägt und damit dann gleichzeitig auch die eigenen Büro- und Verwaltungskosten mit erfaßt, die während der Bauzeit anfallen.

Für erste Feststellungen sind in den Zahlentafeln 43 bis 45 Richtpreise für die Gesamtkosten je aufgestelltes kW für Wärme- und Wasserkraftwerke zusammengestellt. Sie können naturgemäß keinen Anspruch auf große Genauigkeit erheben, da die jeweiligen Verhältnisse stets verschieden sind und zahlreiche Einzelheiten mitspielen, deren Erfassung in summarischer Form nicht möglich ist.

Bei Dampfkraftwerken ergeben sich Preisunterschiede nach der Art des Brennstoffes und nach der Ausführung mit Kühlturm- oder natürlicher Wasserkühlung für die Kondensation. Umfangreiche Entladeanlagen, Wege, Kanäle, Brücken, Straßen, Wohnhäuser für die Bedienung sind nicht berücksichtigt.

Zahlentafel 43. Anlagekosten für 1 kW aufgestellte Kraftwerksleistung bei Dampfkraftwerken.

Voraussetzung: Dampfspannung, Dampftemperatur, Speisewasserhältnisse, Kohlenbeschaffung, Leistungsaufteilung auf mehrere Maschinen unter Berücksichtigung entsprechender Aushilfe nach wirtschaftlich und betrieblich heute als gut zu bezeichnenden Annahmen: Maschinenspannung 3 bis 10 kV.

Leistung kW	Steinkohle RM	Braunkohlenbriketts RM
1000	etwa 450 ÷ 500	etwa 500 ÷ 600
5000	„ 380 ÷ 420	„ 450 ÷ 500
10000	„ 280 ÷ 320	„ 400 ÷ 420
25000	„ 240 ÷ 280	„ 300 ÷ 350
50000	„ 220 ÷ 240	„ 250 ÷ 300
100000	„ 200 ÷ 220	„ 220 ÷ 250

ohne Kosten für Grund und Boden, ohne Umspanner mit überspannungsseitiger Schaltanlage, ohne Bauzinsen und ohne Bauleitungskosten.

Die niedrigen Werte in Zahlentafel 43 gelten für Anschluß der Kondensationsanlagen an nahegelegene Frischwasserstellen mit guten Temperaturverhältnissen, die höheren Werte für Anlagen mit Rückkühlung durch Kühltürme. Für die Feuerung sind Steinkohlen mit $H_u = 7600$ kcal/kg oder Braunkohlenbriketts mit H_u etwa 4600 kcal/kg vorausgesetzt. Bei Rohkohle erhöhen sich die Werte um etwa 8 bis 10 vH ohne Berücksichtigung der Anfuhr- und Aufbereitungsanlagen.

Die Baukosten nach Zahlentafel 43 verteilen sich mit etwa:

20 vH auf Gebäude, Fundamente, massive Schornsteine,

40 vH auf Kesselanlagen mit Zubehör, Rohrleitungen, Speisewasserreinigung und Speisepumpen,

- 25 vH auf Dampfturbinen mit Stromerzeugern, Kondensationsanlagen, Rohrleitungen dazu,
 10 vH auf die Schaltanlagen für die Stromerzeuger mit Sammelschienen für die Maschinenspannung ohne Umspanner,
 5 vH auf Sonstiges (kleine Bauänderungen, Nebenkosten).

Bei Diesel- und Gasmaschinen kommen geschlossene Kraftwerke größeren Ausmaßes in Deutschland nur selten vor, so daß hierfür Gesamtpreise je kW nur für Leistungen bis 10000 kW aufgenommen wurden. In jedem Fall wird ein Kostenanschlag eingezogen werden, der keineswegs die gleichen umfangreichen Vorarbeiten erfordert wie bei Dampfkraftanlagen, so daß die Unterlagen für die Baukosten solcher Werke oder Einzelmaschinen zumeist auf sicherer Grundlage ruhen.

Zahlentafel 44. Anlagekosten für 1 kW aufgestellte Kraftwerksleistung bei Diesel- und Gaswerken.

Dieselmaschinen		Sauggasanlagen	
25 kW	etwa 300 RM	25 kW	etwa 350 ÷ 500 RM
500 „	„ 250 „	500 „	„ 320 ÷ 550 „
5000 „	„ 230 „		
10000 „	„ 190 „		

ohne Kosten für Grund und Boden, ohne Umspanner, ohne Bauzinsen.

Für Wasserkraftwerke als Laufwerke ist die Unsicherheit einer Gesamtkostenangabe noch größer als bei Dampfkraftwerken, da die Bauverhältnisse, die Fallhöhe, die Wassermenge, die Wasserfassung (Fluß- oder Kanalwerk), Wasserabführung und vieles mehr durch die jeweiligen örtlichen Verhältnisse so außerordentlich stark beeinflußt werden, daß die in Zahlentafel 45 zusammengestellten Werte nur mit Vorsicht zu benutzen sind. Sie sind allerdings aus einer großen Zahl von ausgeführten Wasserkraftwerken ermittelt, für die aber keine ungewöhnlichen Bauverhältnisse vorlagen. Die Werte in Zahlentafel 45 setzen gute Bauverhältnisse, guten Baugrund, leichte Heranführung der Baustoffe und Maschinen, sowie glatten Bauverlauf ohne Hochwasserstörungen voraus. Bauzinsen, Bauleitungs- und Grunderwerbskosten sind nicht berücksichtigt.

Zahlentafel 45. Anlagekosten für 1 kW ausgebaute Kraftwerksleistung für Wasserkraftwerke als Laufwerke.

1000 kW	1200 ÷ 1500 RM
2000 „	1000 ÷ 1200 RM
5000 „	800 ÷ 1000 „
10000 „	700 ÷ 900 „
20000 „	500 ÷ 600 „

Für Spitzenkraftwerke als Wärme- oder Wasserkraftwerke lassen sich ähnliche Richtzahlen nicht aufstellen. Da es sich hier immer um Sonderfälle handelt, sind nur vollständige Entwurfsbearbeitungen mit Preisermittlungen heranzuziehen.

Zur Vervollständigung von Kostenanschlägen auf den maschinellen Anlageteil kann für die erforderlichen Hochbauten, deren Kosten bei erster Entwurfsbearbeitung zumeist noch nicht im einzelnen vorliegen, gerechnet werden für:

Kesselhaus	mit 20÷25 RM je Kubikmeter umbauten Raum
Maschinenhaus	„ 18÷22 „ „ „ „ „
Schaltanlagen u. Umspannwerk „	22÷28 „ „ „ „ „
Wohn- u. Verwaltungsgebäude . „	30÷35 „ „ „ „ „
Betriebswohnhäuser	„ 25÷28 „ „ „ „ „

e) Die Selbstkostenberechnung¹. Die Selbstkosten für 1 kW bereitgestellte Leistung an einer bestimmten Netzstelle und für die erzeugte bzw. nutzbar abgegebene kWh setzen sich aus festen und veränderlichen Ausgaben zusammen.

Es fallen unter die

festen Ausgaben	veränderliche Ausgaben
solche für: Verzinsung, Abschreibung (Tilgung, Erneuerungsrücklage),	(Betriebskosten)
besondere Rücklagen,	solche für: Betriebsstoffe,
Versicherungen,	Bedienung,
anteilige Betriebs- und Verwaltungskosten.	Instandsetzung,
	Ausbesserungen,
	Schmier- und Putzstoffe,
	anteilige Betriebs- und Verwaltungskosten.

Einen heute besonders zu berücksichtigenden Posten bilden die Steuern. Zu den Betriebskosten kommen ferner die Verluste der Übertragung in den Umspannern und Leitungen. Die Betriebs- und Verwaltungskosten werden nicht getrennt, sondern zusammen behandelt werden.

Für eingehende und sorgfältige wirtschaftliche Untersuchungen sind die erforderlichen Angaben und Unterlagen, soweit es sich um das Kraftwerk handelt und die Stromabsatzverhältnisse zu beurteilen sind, im Band III/1 zu finden. Für die Anschlußanlagen, Umspanner und Umformer ist dazu auf Band I und für die Leitungsanlagen auf Band II zu verweisen.

Daß die Stromlieferung für die Anlage wirtschaftlich sein muß, d. h. daß nicht nur die reinen Selbstkosten gedeckt werden, sondern daß auch ein angemessener Gewinn erzielt wird, ist selbstverständlich. Dazu gehören neben den Lieferpreisen aber auch die Lieferbedingungen oder die Abnahmevoraussetzungen, also die vertraglichen Festsetzungen der Lieferung und Abnahme und je nach den Aufwendungen oder vorliegenden Verhältnissen eine bestimmte Vertragsdauer.

Im folgenden werden die Kraftwerksselbstkosten behandelt werden. Eine entsprechende Übertragung dieser Wirtschaftsuntersuchungen auf andere bestimmte Anlagen wird dann nicht schwer sein.

¹ Tröger, R.: Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkes Klingenberg. Z. VDI 1927 Nr. 53 S. 1902.

Die Kraftwerksselbstkosten sind nach Gl. (31) und (32) Band III/1

$$K_g = K_1 \cdot p + K_2 + K_3 + K_{Bj} \cdot \text{RM/Jahr}, \quad (198)$$

oder für die erzeugte kWh an den Maschinensammelschienen

$$K'_g = \frac{K_1 \cdot p + K_2 + K_3 + K_{Bj}}{A_j} \text{ RM/kWh}, \quad (199)$$

worin in Reichsmark:

- K_1 die Anlagekosten,
- $K_1 \cdot p$ den jährlichen Kapitaldienst,
- K_2 die jährlichen Verwaltungs- und Geschäftskosten,
- K_3 die jährlichen Betriebsausgaben,
- K_{Bj} die jährlichen Betriebsstoffkosten,
- A_j die jährliche erzeugte Gesamtarbeitsmenge in kWh

bezeichnet.

Der jährliche Kapitaldienst K_1 ist ein fester Anteil der Selbstkosten und von der jährlichen Ausnutzung der Anlage praktisch unabhängig. Er umfaßt die Kosten für die Verzinsung des Anlagekapitals und die jährlich vorzunehmenden Abschreibungen auf die einzelnen Anlageteile. Es ist also:

$$K_1 \cdot p = K_1 \cdot p_z + K_1 \cdot p_a. \quad (200)$$

- p_z vH die jährliche Verzinsung,
- p_a vH die jährlichen Abschreibungen.

Das erforderliche Anlagekapital ist, wie immer wieder betont werden muß, auf das sorgfältigste festzustellen. Es muß dabei alles eingeschlossen werden, was für die betriebsfertige Gesamtanlage aufzuwenden ist.

Die Verzinsung. Der Zinsfuß, mit dem sich das gesamte Anlagekapital verzinsen soll, wird durch den Kapitalgeber vorgeschrieben oder je nach Wunsch angesetzt. Zumeist liegt er zwischen 4 bis 6 vH. Bei neu zu bauenden Kraftwerken für die öffentliche Stromabgabe oder bei umfangreichen Erweiterungen bestehender Anlagen und Netze wird sich namentlich in den ersten Betriebsjahren in der Mehrzahl der Fälle eine Verzinsung des Anlagekapitals nur gering ermöglichen lassen, weil der Stromabsatz noch ungenügend oder die volle Ausnutzung der Anlageteile noch nicht möglich ist. Es wäre nun aber falsch, damit die Unwirtschaftlichkeit der Anlage nachzuweisen, denn erfahrungsgemäß steigt die Zahl der Abnehmer außerordentlich schnell, wenn elektrischer Strom verfügbar ist, und die Anlage ihre Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit nachgewiesen hat.

Für solche Fälle wird eine mittlere Leistung der Anlage zugrunde gelegt, etwa die nach den vorhandenen Aushilfen als in jedem Fall gesichert anzusehende Leistung der Maschinen, Kessel oder Umspanner ohne Berücksichtigung ihrer vorübergehenden Überlastungsfähigkeit bzw. die mittlere Belastung einer Leitungsanlage unter geringen Übertragungsverlusten, sowie eine jährliche Betriebsstundenzahl

von etwa 2000 bis 2500, sofern es sich nicht um besondere industrielle Anlagen mit hoher und gleichbleibender Abnahme handelt.

Ist das Baukapital geliehen, so wird mit der Verzinsung auch eine jährliche Tilgung zu leisten sein. Die Leihbedingungen lauten dann gewöhnlich so, daß das Kapital bei einer bestimmten Verzinsung innerhalb einer festgesetzten Laufzeit zurückgezahlt sein muß. Da mit der fortlaufenden Tilgung ein immer kleiner werdendes Kapital zu verzinsen ist, wird stets gefordert, daß die ersparten Zinsen mit zur Tilgung zu verwenden sind. Das ergibt dann den jährlichen reinen Kapital- oder Zins- und Tilgungsdienst.

Aus Zahlentafel 46 sind die jährlichen Tilgungsraten in vH des Kapitals bei verschiedenen Zinsfüßen zu ersehen, zu denen noch die Zinsen selbst hinzuzurechnen sind.

Zahlentafel 46. Jährliche Kapital-Tilgungsraten einschließlich ersparter Zinsen in vH des Kapitals bei verschiedenem Zinsfuß.

Laufzeit	in vH des Kapitals bei einem Zinsfuß von				Laufzeit	in vH des Kapitals bei einem Zinsfuß von			
	3 ½ vH	4 vH	4 ½ vH	5 vH		3 ½ vH	4 vH	4 ½ vH	5 vH
60	0,508	0,420	0,345	0,283	30	1,937	1,783	1,639	1,505
59	0,529	0,439	0,362	0,298	29	2,045	1,888	1,741	1,605
58	0,551	0,458	0,380	0,314	28	2,160	2,001	1,852	1,712
57	0,573	0,479	0,399	0,330	27	2,285	2,124	1,972	1,829
56	0,597	0,500	0,418	0,348	26	2,421	2,257	2,102	1,956
55	0,621	0,523	0,439	0,367	25	2,567	2,401	2,244	2,095
54	0,647	0,547	0,461	0,386	24	2,727	2,559	2,399	2,247
53	0,674	0,572	0,483	0,407	23	2,902	2,731	2,568	2,414
52	0,702	0,598	0,508	0,429	22	3,093	2,920	2,755	2,597
51	0,732	0,626	0,533	0,453	21	3,304	3,128	2,960	2,800
50	0,763	0,655	0,560	0,478	20	3,536	3,358	3,188	3,024
49	0,796	0,686	0,589	0,504	19	3,794	3,614	3,441	3,275
48	0,831	0,718	0,619	0,532	18	4,082	3,899	3,724	3,555
47	0,867	0,752	0,651	0,561	17	4,404	4,220	4,042	3,870
46	0,905	0,788	0,684	0,593	16	4,768	4,582	4,402	4,227
45	0,945	0,826	0,720	0,626	15	5,183	4,994	4,811	4,634
44	0,988	0,866	0,758	0,662	14	5,657	5,467	5,282	5,102
43	1,033	0,909	0,798	0,699	13	6,206	6,014	5,828	5,646
42	1,080	0,954	0,841	0,739	12	6,848	6,655	6,467	6,283
41	1,130	1,002	0,886	0,782	11	7,609	7,415	7,225	7,039
40	1,183	1,052	0,934	0,828	10	8,524	8,329	8,138	7,950
39	1,239	1,106	0,986	0,876	9	9,645	9,449	9,257	9,069
38	1,298	1,163	1,040	0,928	8	11,048	10,853	10,661	10,472
37	1,361	1,224	1,098	0,984	7	12,854	12,661	12,470	12,282
36	1,428	1,289	1,161	1,043	6	15,267	15,076	14,888	14,702
35	1,500	1,358	1,227	1,107	5	18,648	18,463	18,279	18,097
34	1,576	1,431	1,298	1,176	4	23,725	23,549	23,374	23,201
33	1,657	1,510	1,374	1,249	3	32,193	32,035	31,877	31,721
32	1,744	1,595	1,456	1,328	2	49,140	49,020	48,900	48,780
31	1,837	1,686	1,544	1,413	1	100,000	100,000	100,000	100,000

$$\text{Tilgungsrate} = \text{Kapital} \cdot \frac{p_z}{100} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p_z}{100}\right)^n - 1} \text{ RM} \quad (201)$$

p_z = Zinsfuß, n = Anzahl der Jahre.

27. Beispiel: Ein Kapital von RM. 100000,— soll mit 5 vH verzinst und innerhalb 20 Jahren unter Einrechnung der ersparten Zinsen getilgt werden. Dann betragen die jährlichen Zins- und Tilgungsraten:

Zinsen 5 vH von RM 100000,—	= RM 5000,—
jährliche Tilgung nach Zahlentafel 46 bei $p_z = 5$ vH, $n = 20$ 3,024 vH	<u>= RM 3024,—</u>
Gesamter Kapitaldienst	RM 8024,—

Die Tilgung ist nicht zu verwechseln mit der jährlichen Abschreibung. Ist die Höhe der jährlichen Tilgung gleich der Höhe der jährlichen Abschreibung, dann ist für letztere in der Selbstkosten- oder Ertragsrechnung kein weiterer Zuschlag zu machen, es sei denn, daß das in Form eines Gewinnes geschieht. Allerdings verbleibt dann dem Anlagebesitzer kein Erneuerungskapital, wenn Lebensdauer der Anlageteile und Ende der Tilgung zusammenfallen. Wird schneller getilgt, wird der Restwert der Anlagen erwirtschaftetes Vermögen, wird langsam getilgt, muß durch die Höhe richtiger Abschreibungen die Anlage entsprechend erneuert werden können. Für die hier zu behandelnde Selbstkostenrechnung wird daher auch nicht die Tilgung, sondern die Abschreibung berücksichtigt.

Die Abschreibungen. Nachdem das Kapital für eine Anlage verbaut ist, tritt an dessen Stelle die Anlage selbst. Da die Anlage als Kapitalwert erhalten bleiben muß, andererseits aber eine fortgesetzte Abnutzung (Entwertung) eintritt, müssen jährlich Beträge zurückgestellt werden, die derart bemessen sein müssen, daß das Anlagekapital für die betreffenden Teile dann, wenn sie nicht mehr betriebsfähig sind, in voller Höhe angesammelt ist (mit oder ohne Berücksichtigung des verbleibenden Altwertes). Die Abschreibungssätze richten sich also nach der Lebensdauer der einzelnen Teile der Anlage. Ferner kann dabei auch die Verzinsung dieses zurückgelegten Kapitals mit in Rechnung gezogen werden; indessen geschieht das bei der Aufstellung der Wirtschaftlichkeitsberechnung zumeist nicht.

Es liegt hierin eine gewisse Ertragssicherheit für nicht erfaßbare Unkosten. Soll Zins- und Zinseszins dieser Abschreibungsrücklagen berücksichtigt werden, was dann berechtigt ist, wenn das Kraftwerk mit seinen Anlagen nach den Verhältnissen seines Absatzgebietes auf zukünftigen Ausbau rechnen kann, so ist an Stelle des tatsächlichen Abschreibungssatzes aus Zahlentafel 47 der verminderte Abschreibungssatz bei einer bestimmten Lebensdauer (Tilgungszeit) einzusetzen, der unter Umständen den Kapitaldienst nicht unwesentlich beeinflussen kann. Da die Abschreibungsrücklagen immer wieder für wirtschaftliche Erweiterungen im Betrieb arbeiten sollen, also dann wirtschaftliche Erträge bringen, in die auch die Verzinsung dieser Rücklagen eingeschlossen sein muß, ist also die Berücksichtigung von Zins- und Zinseszins durchaus gerechtfertigt.

Richtiger wäre es, die Abschreibungen in zwei Teile zu zerlegen und zwar einen festen Teil als Grundwert und einen solchen unter Berücksichtigung der jährlichen Benutzungsdauer d. h. also der Betriebsstunden. Die Schätzungen hierfür lassen sich aber nur sehr schwer durch-

führen, da dabei auch die Wartung, Instandsetzung usw. ausschlaggebend sind, so daß davon abgesehen werden kann, hierauf weiter einzugehen.

In der kaufmännischen Jahresertragsrechnung wird eine solche Unterteilung nicht vorgenommen. Auch die betriebswirtschaftliche Praxis sieht von dieser verfeinerten Form der Abschreibungsfestsetzungen ab, da sie bei plötzlichen Änderungen in der Betriebsführung unter Umständen zu ganz falschen Ergebnissen führen kann. Es wird daher, wie oben bereits gesagt, ganz allgemein die Lebensdauer der Einzelteile nach den zu erwartenden Beanspruchungen zugrunde gelegt.

Bei Kraftwerken und Übertragungsanlagen der öffentlichen Stromversorgung ist für die Bemessung der Abschreibungen neben der Lebensdauer auch die Dauer der Verträge für den gesicherten Stromabsatz bestimmend. Stimmen Vertragsdauer und Lebensdauer der Anlage oder der für einen Anschluß besonders getroffenen Einrichtungen nicht überein, so können Unsicherheiten entstehen, wenn die Verträge vorzeitig ablaufen und ihre Erneuerung durch den Wettbewerb anderer Unternehmungen in Frage gestellt sein kann. Es ist daher entweder von vornherein die Abschreibung auf die Vertragsdauer zu bemessen, was allerdings bei kurzzeitigen Verträgen zu starken Erhöhungen der Selbstkosten und damit des Strompreises führt, oder es ist im vorsichtigen kaufmännischen Gebahren bei der Jahresabrechnung je nach dem erzielten Gewinn mit zusätzlichen Abschreibungen zu rechnen, um die Unsicherheiten dadurch so weit wie möglich zu beseitigen bzw. allmählich auszugleichen. Weitere Richtlinien hierzu können im Rahmen dieses Buches nicht gegeben werden. Liegen ganz bestimmt befristete Verhältnisse vor, so wird entsprechend besonders zu rechnen sein.

Da sich das Anlagekapital für ein Kraftwerk, eine Fernleitung oder ein Umspannwerk bzw. eine Gesamtanlage aus Aufwendungen für Grund und Boden, Gebäude, Maschinen und Geräte, Hilfseinrichtungen, kurz aus einer Gruppe von Einzelheiten zusammensetzt, die mit ganz verschiedener Lebensdauer, Ausnutzung und Betriebszeit zu berücksichtigen sind, oder die nur Aufgaben allgemeinerer Art dienen, setzt sich die jährliche Gesamtabschreibung aus einer entsprechenden Zahl von Einzelwerten zusammen, die stets besonders festzustellen sind. Dabei ist noch die weitere Voraussetzung Bedingung, daß die jährliche Unterhaltung der einzelnen Anlageteile gewissenhaft und auf das sorgfältigste durchgeführt wird.

In Zahlentafel 47 sind die üblichen Werte für die Abschreibung auf die verschiedenen Teile einer Kraftübertragungsanlage zusammengestellt. Man darf in der Festsetzung der Abschreibungswerte nicht zu weit gehen, denn wenn vorzügliche Baustoffe verwendet und mit der bereits erwähnten unbedingt notwendigen sorgfältigen Wartung und Instandhaltung gerechnet wird, so würde durch zu hohe Abschreibungen die Wirtschaftlichkeit der Anlage ungünstig beeinflußt werden. Die in der Spalte 2 angegebenen Werte stellen daher Grenzwerte dar. Je nach den Bau- und Betriebsverhältnissen — gute Brennstoffe, beste oder einfachere Ausführung, sorgfältigste Unterhaltung und sofortige Schadensausbesserung, mittlerer oder angestrebter Betrieb, Gelände- und

Zahlentafel 47.
Wirtschaftszahlen für die hauptsächlichsten Anlageteile.

Anlageteil	Lebens- dauer Jahre	Ab- schreibungen je Jahr in vH ¹	Instandhalten und Aus- besserungen je Jahr in vH
	1	2	3
Akkumulatoren	10 ÷ 12	10,0 ÷ 8	5,0
Betonbauten aller Art	—	0,5 ÷ 1,0	0,5
Betonmaste	60 ÷ 80	1,5	1,0
Betriebsgebäude, Fundamente, Schornsteine massiv in Stein	50 ÷ 75	2,0 ÷ 1,5	0,5 ÷ 1,0
Betriebsgebäude in mittelmäßiger Ausführung	40 ÷ 50	2,5 ÷ 3,0	1,0 ÷ 1,5
Brücken aus Eisen	50 ÷ 75	2,0 ÷ 1,5	1,0
Büroeinrichtungen	5,0	20,0	—
Dampfkessel mit Zubehör	12 ÷ 16	8,0 ÷ 6,0	1,0 ÷ 2,0
Dampfmaschinen mit Zubehör	12 ÷ 16	8,0 ÷ 6,0	1,0 ÷ 2,0
Dampfturbinen mit Zubehör	12 ÷ 16	8,0 ÷ 6,0	1,0 ÷ 2,0
Dieselmotoren mit Zubehör	10 ÷ 15	10,0 ÷ 7,0	2,0 ÷ 4,0
Eisenmaste mit Fundierung	40 ÷ 50	2,5 ÷ 2,0	1,0 ÷ 2,0
Elektrizitätszähler	15 ÷ 20	6,0 ÷ 5,0	5,0
Freileitungsbaustoffe Kupfer, Bronze	—	1,0 ÷ 2,0	—
Aluminium	—	4,0 ÷ 5,0	—
Stahlaluminium	—	4,0 ÷ 5,0	—
Freileitungsisolatoren	20 ÷ 25	5,0 ÷ 4,0	1,0 ÷ 1,5
Gasmaschinen	10 ÷ 15	10,0 ÷ 7,0	2,0 ÷ 4,0
Gleichstrommaschinen	15 ÷ 20	6,0 ÷ 5,0	2,0 ÷ 3,0
Gleisanlagen	50	4,0	1,0
Grundstücke	—	—	—
Grundstücke bei Wasserkraftanlagen überbaut	—	entsprechend der Kon- zessionsdauer	—
Hebezeuge	25 ÷ 35	4,0 ÷ 3,0	1,5 ÷ 2,0
Holzmasse	12 ÷ 16	8,0 ÷ 6,0	1,0 ÷ 2,0
Kabelnetze	25 ÷ 30	4,0 ÷ 3,0	1,0 ÷ 2,0
Kohlenförderanlagen	25 ÷ 35	4,0 ÷ 3,0	1,0 ÷ 2,0
Kondensationsanlagen	25 ÷ 35	4,0 ÷ 3,0	1,0 ÷ 2,0
Krane	25 ÷ 35	4,0 ÷ 3,0	1,0 ÷ 2,0
Kraftwagen	5	20,0	10,0
Kühltürme aus Holz	12 ÷ 15	8,0 ÷ 7,0	10,0
Motoren	20 ÷ 25	5,0 ÷ 4,0	1,0 ÷ 2,0
Motorboote	20	5,0	2,0 ÷ 5,0
Pumpen	25 ÷ 35	4,0 ÷ 3,0	1,0 ÷ 2,0
Rohrleitungen	25 ÷ 35	4,0 ÷ 3,0	1,0 ÷ 2,0
Sauggasanlagen	10 ÷ 15	10,0 ÷ 7,0	3,0 ÷ 5,0
Schaltanlagen mit Zubehör	20 ÷ 25	6,0 ÷ 4,0	1,0
Schornsteine aus Blech	8 ÷ 10	12,0 ÷ 10,0	2,0 ÷ 3,0
Straßen, asphaltierte	—	1,0 ÷ 1,5	1,0 ÷ 2,0
Straßen, gepflasterte	—	0,5 ÷ 1,0	2,0 ÷ 3,0
Uferbauten, tiefbaulicher Teil von Wasser- kraftanlagen	—	0,5 ÷ 1,0	1,0 ÷ 2,0
Umspanner	20 ÷ 30	5,0 ÷ 3,0	0,5 ÷ 1,0
Verwaltungsgebäude	50	2,0	1,0
Wasserreiniger	25 ÷ 35	4,0 ÷ 3,0	1,0 ÷ 2,0
Wasserturbinen bei guter Wasserbeschaffenheit	20 ÷ 25	5,0 ÷ 4,0	1,0 ÷ 2,0
Wechselstrommaschinen	15 ÷ 20	6,0 ÷ 5,0	1,0 ÷ 2,0
Wehranlagen aus Eisen	20 ÷ 25	5,0 ÷ 4,0	0,5 ÷ 1,0
Werkstattseinrichtungen	10	10,0	5,0
Wohngebäude	50	2,0	1,0

¹ Ohne Berücksichtigung des End- oder Altwertes.

Witterungsverhältnisse — sind die höheren oder geringeren Werte für die Abschreibung zu wählen. Der Restwert (Altwert) der einzelnen Anlageteile ist in den Abschreibungssätzen nicht berücksichtigt. Er ist zumeist auch so gering, daß der Erlös aus dem Restwert kaum die Ausbaurkosten deckt.

Aus jahrelangen Erfahrungen kann die jährliche Abschreibung auf vollständige Anlagen zusammengefaßt also „über Alles“ d. h. auf das gesamte Anlagekapital bezogen angesetzt werden:

für Dampfturbinenkraftwerke	mit 6 ÷ 7 vH
„ Diesel- und Gasmaschinenwerke	„ 8 ÷ 10 „
„ Wasserkraftanlagen	„ 2 ÷ 3 „
„ Freileitungsnetze je nach den Baustoffen für	
Maste und Leiter	„ 2 ÷ 4 „
„ Schalt- und Umspannanlagen	„ 3 ÷ 4 „

Der jährliche Kapitaldienst $K_1 \cdot p = K_1 \cdot p_z + K_1 \cdot p_a$ wird im Rahmen der hier zu behandelnden Form der Strompreisbildung entweder vollständig oder zu einem gewissen Anteil auf die verfügbare oder gesicherte Leistung also nach Abzug der Aushilfe bezogen und ergibt dann den sogenannten Leistungspreis für die bereitgestellte kW- oder kVA-Leistung. Inwieweit hierzu noch die weiteren festen Jahresausgaben oder ein Teil der Betriebsausgaben hinzuzurechnen sind, bedarf besonderer Entscheidung. Auf das ausführliche 29. Beispiel wird verwiesen. Insoweit einzelne Anlageteile wie die Kessel-, die Maschinen- oder die Umspannanlagen in ihrer Gesamtleistung eine Aushilfe einschließen d. h. eine echte Aushilfe, die bei Ausfall eines Teiles auch tatsächlich als Ersatz zur Verfügung steht, muß dieses für die Selbstkostenrechnung insbesondere nach betriebstechnischen Gesichtspunkten festgelegt werden. Bestimmte Angaben hierzu lassen sich nicht machen. Zumeist wird eine solche echte Aushilfe je nach Zahl und Größe der Betriebsmittel mit 25 bis 33 vH der Gesamtleistung zugrunde gelegt. Wie sich der Verbundbetrieb wirtschaftlich hierauf auswirken kann, ist wiederholt hervorgehoben worden und springt nunmehr auch wirtschaftlich in die Augen.

Die Verwaltungs- und Geschäftskosten umfassen die Ausgaben für die technische und kaufmännische Verwaltung also die Leitung, die Betriebsingenieure, Techniker, Zeichner, Werbefachmänner, Stromabrechnung, dann die Buchhaltung mit allen ihren besonderen Einrichtungen. Ferner kommen hierzu die Aufwendungen für Schreibzeug, Porto, Fernsprecher, Büroreinigung, Beleuchtung, soziale Einrichtungen, Unterstützung und Hinterbliebenenfürsorge. Nicht zu vergessen sind auch die besonderen sozialen Leistungen, die insgesamt je nach Größe des Werkes nicht unerhebliche Lasten darstellen und zumeist ganz unabhängig davon sind, ob der Stromabsatz gut oder schlecht ist.

Es ist außerordentlich schwer, hierzu Angaben für die Selbstkostenrechnung zu machen. Indessen können aus den Geschäftsberichten der deutschen Elektrizitätswerke gewisse jährliche Unkostensätze auf das

Anlagekapital bezogen doch festgestellt werden, die für sparsame Geschäftsführung recht brauchbare Anhaltswerte ergeben.

Es können für erste Selbstkostenfeststellungen diese jährlichen Ausgaben mit etwa:

1,0 ÷ 1,5 vH für Dampfkraftwerke,
 0,5 ÷ 1,0 „ „ Diesel- und Gaskraftwerk,
 0,3 ÷ 0,5 „ „ Wasserkraftwerke je nach den Ausbauverhältnissen

angesetzt werden. Diese Sätze berücksichtigen nicht die zusätzlichen Kosten, die für die Kleinverteilung in ausgedehnten öffentlichen Netzen entstehen.

Zu den Geschäftskosten gehören weiter die Steuern und die Versicherungen.

Über **Steuern und öffentliche Abgaben** können hier Einzelheiten nicht angegeben werden. Jedenfalls dürfen sie nicht unberücksichtigt bleiben, selbst wenn es sich um vorbereitende Wirtschaftlichkeitsberechnungen handelt. Unter öffentlichen Abgaben sind Ausgaben zu verstehen, die an die öffentliche Hand (Staat, Gemeinde) als Konzessions- oder ähnliche Gebühren geleistet werden müssen. Besondere Abgaben sind gegebenenfalls auch für die Benutzung von Straßen und Wegen zur Leitungsführung zu zahlen.

Da namentlich die Steuerbelastung je nach der Art der Gesellschaft oder der Form der Kapitalbeschaffung unter Umständen die Selbstkosten sehr wesentlich beeinflussen kann, ist es heute unbedingt erforderlich, diese Kosten schon vorher auf das sorgfältigste festzustellen oder durch entsprechende Fachleute feststellen zu lassen. Die Steuern erstrecken sich zum Teil auf das Vermögen, also das Anlagekapital und auf den Gewinn, sind also zum Teil feste, zum Teil bewegliche Unkosten. Auch der technische Leiter eines Werkes sollte über die Steuern und ihre Feststellung genauestens unterrichtet sein, um ihre Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit seines Betriebes jederzeit zu kennen und zu übersehen.

Hinsichtlich der **Versicherungen** für Haftpflicht, Unfall, Feuer, Wassereinbruch, Maschinenschäden sind ebenfalls Unterlagen für die Selbstkostenermittlung zu beschaffen. Im allgemeinen kann man mit etwa 0,2 bis 0,5 vH je nach der Höhe des Anlagekapitals rechnen.

Besondere Rücklagen neben den Abschreibungen werden nur in besonderen Fällen vorgesehen, um unvorhergesehenen Vorkommnissen technischer Art Rechnung zu tragen. Bei neuen Unternehmungen werden solche Rücklagen für vorzeitige Abnutzung, Berücksichtigung technischer Neuerungen u. dgl. erst nach Ablauf der ersten Betriebsjahre erforderlich. Bei der hier zu behandelnden Wirtschaftlichkeitsberechnung wird auf diese besonderen Rücklagen keine Rücksicht genommen. Einem unerwartet eintretenden schweren Maschinenschaden kann ausgabenmäßig im gewissen Grade dadurch begegnet werden, daß von vornherein eine Maschinenschadenversicherung abgeschlossen wird.

28. Beispiel: Betragen die festen Kosten eines Dampfkraftwerkes bei 4 vH Verzinsung, 6 vH Abschreibung (ohne Zins- und Zinseszinsberücksichtigung) und

2 vH anteiliger Kostenübernahme aus den Verwaltungs-, Geschäfts- und allgemeinen Betriebsunkosten also zusammen 12 vH des Anlagekapitals von RM 10000000,— und die eingebaute Leistung insgesamt in 3 Maschinen 45000 kW bei $\cos \varphi = 0,8$ bzw. 56000 kVA, wird ferner mit der gesicherten Leistung von 30000 kW gerechnet, so daß eine Maschine = 33,3 vH als echte Aushilfe zunächst nicht wirtschaftlich ausgenutzt werden soll, so würde der Leistungspreis betragen:

$$\text{für 1 kW} = \frac{10000000 \cdot 0,12}{30000} = 40,00 \text{ RM/Jahr,}$$

$$\text{oder: für 1 kVA} = \frac{10000000 \cdot 0,12}{37500} = 32,00 \text{ RM/Jahr.}$$

Bei der Aufstellung des Leistungspreises für 1 kW ist, wie das 28. Beispiel zeigt, weiter eine bestimmte preisliche Berücksichtigung des Leistungsfaktors des Abnehmers erforderlich, damit die Maschinen nicht durch schlechte Leistungsfaktoren der Abnehmer, worauf ebenfalls wiederholt in Band I bis III/1 hingewiesen worden ist, in ihrer Belastungsfähigkeit zum Schaden der Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkes und der Übertragungsanlagen eingeschränkt werden. Eine solche preisliche Bewertung des Leistungsfaktors geschieht, wenn der Leistungspreis auf kW abgestellt wird, in der Regel durch gewisse Vergütungen bei besserem Leistungsfaktor als 0,8 und Preiszuschläge bei Leistungsfaktoren unter diesem Wert. Aus dem am Schluß dieses Abschnittes angefügten Vertragsentwurf für die Stromversorgung ist Näheres zu ersehen.

Die **Betriebskosten** als beweglicher Anteil der Selbstkosten umfassen in ihrem größten Teil die Ausgaben für die Betriebsstoffe (Kohle, Dieselöl, Gas, Wasser), dann für die Bedienung, die Instandhaltung und sonstige Nebenkosten für die Betriebsstoffmittel. Die Kenntnis alles hierzu im Band III/1 Gesagten muß vorausgesetzt werden. Es muß also bei Wärmekraftwerken bereits entschieden sein, welcher Brennstoff zu wählen ist, und was dieser frei Verwendungsstelle kostet. Aus diesen Vorausrechnungen ist auch festzustellen, wieviel Wärmeeinheiten in kcal je kWh aufzuwenden sind, wobei alle Verluste bei Dampfkraftanlagen durch An- und Abheizen, Kesselwirkungsgrad, Kesselspeisepumpenbetrieb, Maschinenanwärmen, Kondensation usw., bei Diesel- und Gasmaschinen durch Anlauf, Kühlwasserbeschaffung u. dgl. eingeschlossen sein müssen. Weiter muß der Brennstoffbedarf als Durchschnittsjahreswert je kWh errechnet sein, also den schwankenden Lastverlauf über das ganze Jahr, die Wirkungsgradänderungen der Maschinen, Kessel usw. berücksichtigen.

Aus den Dampfverbrauchskennlinien der Abb. 53 Band III/1 oder den Angaben über den theoretischen Dampfverbrauch der Dampfturbinen (Abb. 27 Band III/1), aus den entsprechenden Angaben für Diesel- und Gasmaschinen und einem entsprechenden Gesamt-Jahreswirkungsgrad, der in den meisten Fällen geschätzt werden muß, sind die jährlichen Brennstoffkosten $K_{B,j}$ nach dem Wärmepreis P_W und dem Kohlenpreis frei Verwendungsstelle $P_{B,g}$ in RM/t zu ermitteln.

Es ist der Wärmepreis [Gl. (26) Band III/1]:

$$P_W = \frac{P_{B,g} \cdot 100}{H_u} \text{ Rpf/1000 kcal,}$$

die jährliche Kohlenausgabe [Gl. (29) Band III/1]:

$$K_{B,j} = \frac{860 \cdot N_H \cdot h_j \cdot (i - t_{sp}) \cdot P_w}{H_0 \cdot \eta_{th, Tu} \cdot \eta_G \cdot \eta_K \cdot \eta_R \cdot 100000} \text{ RM},$$

und der Brennstoffpreis für 1 kWh, wenn an Wärmeverbrauch für ihre Erzeugung einschließlich aller Verluste bis an die Stromerzeugersammelschienen M_{mittl} kcal/kWh aufzuwenden sind:

$$K_B = \frac{P_{B,g} \cdot 100}{1000 \cdot H_u} \cdot M_{mittl} \text{ Rpf/kWh}.$$

Hierin bedeuten:

- N_H Höchstlast in kW bzw. kVA,
 h_j jährliche Benutzungsdauer in h,
 i Wärmeinhalt des erzeugten Dampfes in kcal/kg,
 t_{sp} Speisewassertemperatur vor Eintritt in den Kessel oder Rauchgasvorwärmer in °C,
 H_0 adiabatisches Wärmegefälle in kcal/kg,
 η_G Stromerzeugerwirkungsgrad in vH,
 η_K Kesselwirkungsgrad in vH,
 $\eta_{th, Tu}$ thermischer Turbinenwirkungsgrad in vH,
 η_R Rohrleitungswirkungsgrad in vH.

Die jährlichen Brennstoffkosten können nur als Durchschnittswerte festgestellt werden. Es sollen auch für diesen Posten einige Richtwerte angegeben werden, die beste Brennstoffausnutzung voraussetzen. Abhängig sind diese Kosten von dem Ausnutzungswert des Kraftwerkes und dem Jahresbetriebsverlauf im Einsatz der Maschinen und Kessel, somit also von den einzelnen Wirkungsgraden dieser Anlageteile.

Der Ausnutzungswert des Kraftwerkes ist nach Gl. (10) und (11) Band III/1:

$$\begin{aligned} Z_{Nj} &= \frac{A_j}{\sum N_n \cdot 8760} \\ &= \frac{N_H \cdot h_j}{N_H \cdot 8760} = \frac{h_j}{8760}. \end{aligned}$$

Für die verschiedenen Werte von Z_{Nj} sind in Zahlentafel 48 die Wärmeverbrauchszahlen im Mittel angegeben.

Zahlentafel 48.
Wärmeverbrauchszahlen für Dampfturbinenkraftwerke (Mittelwerte).

Ausnutzungswert Z_{Nj}	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Wärmeverbrauch M_{mittl} kcal/kWh.	6600	5800	4900	4000	3500	3100	2900
Steinkohle kg/kWh bei $H_u = 7500$ kcal/kg . .	0,88	0,77	0,66	0,53	0,47	0,42	0,39
Braunkohlenbriketts bei $H_u = 4800$ kcal/kg . .	1,38	1,21	1,02	0,84	0,73	0,65	0,60
Rohbraunkohle bei $H_u = 2200$ kcal/kg . .	3,00	2,65	2,25	1,82	1,60	1,41	1,32

Sie setzen der Größe und Betriebseigenart entsprechend einfachen, neuzeitlichen Ausbau voraus so insbesondere hinsichtlich der Dampfspannung, Dampftemperatur und der Kondensationsanlagen.

Bei besonders hoch durchgebildeter Wärmewirtschaft werden diese Werte um etwa 5 bis 10 vH unterschritten.

Als Zuschläge zu den Werten der Zahlentafel 48 sind zu machen:

für Ausgleich der Lastschwankungen und der Änderungen	
von Temperatur und Druck des Dampfes	2 ÷ 4 vH
für allgemeine Dampfverluste ¹	1 ÷ 2 „
für Anfahren und Abstellen.	2 ÷ 4 „
für Eigenbedarfsdeckung	3 ÷ 5 „
für Verschlechterung der Dampfanlagen und Dampf-	
turbinen im Laufe der Zeit	2 ÷ 4 „

Die kleineren Werte gelten für Großanlagen mit neuzeitigen Einrichtungen, die höheren für Anlagen mittlerer Größe.

29. Beispiel:

Kohlenpreis frei Kesselhaus $P_{B,g} = 25$ RM/t,

Wärmeinhalt der Kohle $H_u = 7500$ kcal/kg,

Wärmeverbrauch der Dampfturbinen als Durchschnittswert M_{mittl}

4000 kcal/kWh bei $Z_N = 0,5$;

somit Brennstoffkosten:

$$K_B = \frac{2500 \cdot 4000}{7500 \cdot 1000} = 1,34 \text{ Rpf/kWh.}$$

Gleiche Feststellungen lassen sich auch für vollständige Diesel- und Gaswerke zur Berechnung des Betriebsstoffverbrauches heranziehen.

In Zahlentafel 49 und 50 sind Angaben über den Betriebsstoffverbrauch von Diesel- und Sauggasmotoren zusammengestellt die üblichen Betriebsverhältnisse vorausgesetzt.

Zahlentafel 49. Betriebsstoffverbrauch je erzeugte kWh für Dieselmotorentreiböl (Gasöl) mit 10000 kcal/kg.

Motorleistung PS	Verbrauch in g/kWh bei Last			
	1/4	2/4	3/4	4/4
bis 20	580	450	375	350
20 ÷ 50	550	435	350	330
50 ÷ 100	530	420	330	310
100 ÷ 300	490	380	305	290
300 ÷ 500	460	330	280	270
Großmaschinen 10000 und mehr	310	240	235	235

Bei Wasserkraftwerken fällt dieser Posten naturgemäß fort, sofern nicht für die Wassernutzung eine Abgabe je m³ (Wasserzins) an einem Dritten zu zahlen ist.

Bei Wasserkraft-Pumpspeicherwerken ist der Preis für die Wassernutzung durch die Kosten für den Pumpstrom gegeben. Auch hierzu

¹ Burgdorff, W.: Der Einfluß der Stillstandsverluste auf den Kohlenverbrauch Elektr.-Wirtsch. 1928 Oktober.

Zahlentafel 50¹.
Betriebsstoffverbrauch je erzeugte kWh für Sauggasanlagen.

Motorleistung PS	Betriebsstoff	Betriebsstoffverbrauch in kg/kWh bei Last			
		1/4	2/4	3/4	4/4
25	Anthrazit	1,35	1,00	0,75	0,68
	Braunkohle	2,50	1,70	1,30	1,15
	Holz	4,50	2,80	2,25	1,90
100	Anthrazit	1,30	0,92	0,73	0,63
	Braunkohle	2,30	1,55	1,20	1,00
	Holz	3,60	2,40	1,80	1,60
300	Anthrazit	1,25	0,90	0,72	0,62
	Braunkohle	2,25	1,50	1,15	0,94
	Holz	3,40	2,30	1,80	1,50

Für Anheiz- und Abbrandverluste sind je nach der täglichen Betriebszeit 5÷15 vH Zuschlag zu machen.

sind im Band III/1 die für solche Berechnungen notwendigen Unterlagen bereits behandelt worden.

Die **Bedienungskosten**, sei es für ein Kraftwerk, eine neue Leitungstrecke, ein größeres Umspannwerk, werden zumeist nicht einfach geschätzt, sondern aus besonderen Kostenzusammenstellungen für die Zahl der Maschinen- und Kesselwärter, der Schaltwärter, des Bewachungsdienstes, der Ingenieure und Betriebskaufleute mit Schreibhilfe u. dgl. ermittelt. Dabei sind die Tariflöhne mit allen besonderen sozialen Leistungen in Ansatz zu bringen. Nur so kann ein einigermaßen zutreffendes Bild über diesen Ausgabeposten gewonnen werden. Bei der Bearbeitung dieser Zusammenstellung müssen ausreichende Betriebserfahrungen vorliegen, wobei auf 2- oder 3-Schichtenbetrieb, verschärften oder abgeschwächten Sonn- und Feiertagsbetrieb zu achten ist. Auch dürfen die Ersatzleute für Urlaub und Erkrankungen oder andere Behinderungen von längerer Dauer nicht vergessen werden. Dazu kommen dann unter Umständen noch die Ausgaben für Werkswohnungen, erschwerten Zu- und Abgang z. B. bei Umspannwerken. Es sind also hier ganz besonders sorgfältige Feststellungen zu treffen, um auch diesen Posten einigermaßen richtig zu erfassen. Im 30. Beispiel sind Einzelheiten behandelt, die erkennen lassen, in welcher Weise vorzugehen ist.

Bei Dampfkraftwerken sind diese Unkosten sehr viel höher als bei allen anderen Kraftwerksarten. Besondere Kohlenentlade- und Beschickungseinrichtungen, weitere Mechanisierung ähnlicher Betriebsanlagen können Ersparnisse bringen. Doch ist das sehr eingehend wiederum wirtschaftlich zu untersuchen. Unter den gleichen Voraussetzungen wie bei den Angaben über den Kohlenverbrauch kann man etwa mit:

¹ Feststellungen der Wirtschaftsgruppe Elektrizitätsversorgung; Taschenbuch 1938.

3 ÷ 4 vH des Anlagekapitals bei Dampfkraftwerken mittlerer Leistung,
2 ÷ 3 vH des Anlagekapitals bei Großkraftwerken

für diese Personalunkosten rechnen.

Bei Diesel- und Gaswerken liegen diese Zahlen sehr viel niedriger, fallen unter Umständen überhaupt nicht wesentlich ins Gewicht.

Bei Wasserkraftwerken sind ebenfalls zumeist nur sehr geringe Personalkosten zu veranschlagen. Da es sich hier um wesentlich höhere Anlagekosten je kW als bei Dampfkraftwerken handelt, rechnet man nicht gerne mit Prozentzahlen auf die Baukosten, sondern stellt die wesentlich einfachere besondere Kostenzusammenstellung auf.

Über **Instandhaltung und Ausbesserungen (Reparaturen)** ist bereits bei den Abschreibungen gesprochen worden. Unter der Voraussetzung guter Betriebsleitung kann man zumeist mit den in Zahlentafel 47 angegebenen Werten auskommen. Da die Instandsetzungen (Anstrich, Sonderüberholung) und die Ausbesserungen (mit Ausnahme derjenigen an den Leitungsanlagen) an den maschinellen Einrichtungen in den ersten Betriebsjahren sehr geringe Ausgaben verursachen, der hierfür in Ansatz gebrachte Betrag bei der Abschreibung also nicht aufgebracht wird, so steht die Summe in späteren Betriebsjahren zur Verfügung und kann der besonderen Rücklage zugeführt werden. Die Leitungsanlagen erfordern die größten Ausgaben für Ausbesserungen dagegen in den ersten Betriebsjahren durch Auswechslung beim Bau beschädigter Isolatoren, durch Ausüstungen der Strecken, Leiterbrüche usw., da trotz sorgfältigster Aufsicht der Bau nicht fehlerfrei ausgeführt werden kann.

Aus den Einzelwerten der Zahlentafel 47 ergeben sich im Durchschnitt die Unterhaltungskosten (Instandsetzung und Ausbesserung)

für vollständige Dampfkraftwerke zu	0,8 ÷ 1,5 vH
„ „ Diesel- und Gasmaschinenwerke zu	2,0 ÷ 3,0 „
„ „ Laufwasserkraftwerke zu	0,7 ÷ 1,0 „
„ „ Leitungsnetze bis 100 kV zu . . .	1,0 ÷ 1,5 „
„ „ Umspannwerke und Schaltanlagen	1,0 ÷ 1,5 „

des Anlagekapitals. Dabei sind die jährlich notwendigen vollständigen Kessel- und Maschinenüberholungen berücksichtigt. Die unteren Werte gelten für Großanlagen, die oberen für mittlere und kleinere Anlagen.

Kühl- und Speisewasser ist neben der Speisung von Dampfkesseln und Kondensationsanlagen auch zur Kühlung bei Gas- und Dieselmotoren erforderlich. Ist dasselbe ohne Herstellung großer Brunnen oder anderer Anlagen verfügbar, so können die Ausgaben für die Wasserbeschaffung zumeist unberücksichtigt bleiben. Müssen dagegen Pumpanlagen geschaffen werden, so ist in ähnlicher Form wie für die Betriebskostenberechnung des erzeugten elektrischen Stromes aus Verzinsung, Abschreibung, Instandhaltung, Bedienung, Betriebsstoff (auch dann, wenn als Antrieb der Pumpen Elektromotoren benutzt werden) der Selbstkostenpreis für den Kubikmeter Wasser festzustellen und entsprechend in der Hauptbetriebskostenberechnung zu berücksichtigen.

Schmier- und Putzstoffe. Der Verbrauch an Öl und Schmierstoffen muß vom Hersteller der Maschinen angegeben werden. Es sind hierfür ebenfalls in den entsprechenden Kapiteln des Band III/1 Werte genannt worden, worauf verwiesen werden muß.

Es genügt zumeist für die Selbstkostenrechnung dafür mit etwa 0,2 bis 0,5 vH der Maschinenbaukosten zu rechnen.

Zusammenfassung. Sind die Betriebskosten aus ihren einzelnen Posten, bei den Betriebsstoffkosten auf die etwa zu erwartende Jahresarbeitsmenge bezogen, festgestellt, so sind auch die übrigen Teile dieser Selbstkosten auf diese Arbeitsmenge zu beziehen. Daraus ergibt sich dann der Preis für die kWh an den Sammelschienen des Kraftwerkes, der mit **Arbeitspreis/kWh** bezeichnet wird.

Um einen Vergleich mit den im praktischen Betrieb erzielten Kosten, die aus den Geschäftsberichten der verschiedensten Werke überprüft wurden, zu ermöglichen, kann angenommen werden, daß von den Jahres-Gesamtbetriebskosten entfallen:

auf die Betriebsstoffe (Kohle)	50 ÷ 60 vH
„ Gehälter und Löhne	10 ÷ 15 „
davon Gehälter u. Löhne des Betriebes	5 ÷ 6 vH
„ des Betriebsdienstes	3 ÷ 5 „
„ der Verwaltung	1 ÷ 2 „
„ für Unterhaltung	1 ÷ 2,5 „
sonstiges Betriebszubehör	2 ÷ 4 „
Unterhaltung, Ausbesserungen, Versicherungen	8 ÷ 10 „
Sonstiges (Steuern sind hierbei nicht berücksichtigt)	10 ÷ 15 „

Zu dem auf diese Weise ermittelten Selbstkostenpreis der erzeugten kWh kommen nun, wie gesagt, weiter noch die Ausgaben für die Deckung der Verluste in den Leitungen und Umspannern bis zu den Stellen, an denen der Zähler der Abnehmer eingeschaltet ist. Die Verluste müssen rechnerisch festgestellt werden.

Bei der Ermittlung der Jahresverluste (des Jahreswirkungsgrades) ist zu beachten, daß sie wiederum in zwei Teile zu zerlegen sind und zwar in die vorübergehenden und in die ständig vorhandenen. Die ersten sind die Wirkverluste, die beim Stromdurchgang durch die Leitungen usw. entstehen und im Wirkungsgrad der einzelnen Teile zum Ausdruck kommen. Diese mit der Zahl der Benutzungsstunden multipliziert geben die von den Maschinen über die Nutzarbeitsmenge zu erzeugenden kWh.

Unter die ständigen Verluste fallen alle Leerlaufverluste, die in den Umspannern, in den Freileitungen durch Ableitung und Ausstrahlung und in den Kabeln vorhanden sind.

Wohl zu beachten ist, daß die Verluste sowohl in der Leistung, als auch in der Arbeit entstehen, daß sie also beim Leistungs- und beim Arbeitspreis berücksichtigt werden müssen.

Zu der **Verkaufspreisbildung** sollen schließlich noch einige Bemerkungen hinzugefügt werden. Vorausgesetzt wird nach der Un-

kostenermittlung, daß die dem Abnehmer zur Verfügung gestellte Leistung auch über einen bestimmten zu gewährleistenden Zeitraum des Jahres in Anspruch genommen wird, da ja der Betrieb des Kraftwerkes Tag und Nacht ununterbrochen durchlaufen muß, und somit selbst bei Schwachlast der Maschinen Betriebsstoffverbrauch, Personalkosten, Verluste usw. (Anteil für die festen Kosten) vorhanden sind. Dieser Unkostenanteil muß entsprechend berücksichtigt werden. Da weiter der Arbeitspreis auf einer bestimmten Jahresarbeitsmenge A_j aufgebaut ist und zwar bei der öffentlichen Stromversorgung in der Regel auf eine Jahresbenutzungstundenzahl von 2000 als Mindestabnahme der bereitzustellenden Leistung, so muß der Abnehmer eine entsprechende Jahresabnahme für Leistung und Arbeit gewährleisten. Die sich daraus ergebende Jahresarbeitsmenge ist dann mit dem vollen Arbeitspreis zu bezahlen. Die weitere Preisbildung hängt von den besonderen Abnahmeumständen ab und ist so vielseitig, daß hierauf nicht näher eingegangen werden kann. Nur eines ist dabei besonders zu erwähnen, daß zumeist Nachlässe gewährt werden, wenn eine bestimmte Jahresbenutzungszeit der bereitgestellten Leistung z. B. 5000 Stunden und mehr überschritten wird und weiter für den Strombezug in der Nacht, um den starken Lastabfall in der Nacht durch billige Stromversorgung zu heben. Hierfür kommen in der Hauptsache Industrieunternehmungen in Frage. Zur Vervollständigung dieser kurzen Stromverkaufsangaben ist am Schluß dieses Abschnittes ein Stromversorgungsvertrag angefügt, der weiteren Aufschluß gibt.

Auf die Preisbildung für den Kleinverbrauch kann hier nicht eingegangen werden, da das aus dem Rahmen dieser Erörterungen weit herausgehen würde.

Für den Verbundbetrieb zwischen Wärme- und Wasserkraftanlagen lassen sich nun Feststellungen treffen, welcher Betrieb nach Leistung und Arbeit günstiger d. h. betrieblich und wirtschaftlich vorteilhafter ist, und welche Gesamtkosten entstehen.

Bei der Beurteilung alter und neuer Dampfkraftwerke, ebenfalls im Verbundbetrieb, werden die Selbstkosten sehr bald die notwendigen Ergebnisse liefern, um auch hier die günstigste Betriebswirtschaft zu erreichen, wozu der Tag- und Nachtbetrieb, die Lastverteilung als Grund- und Spitzenlastwerk, die Aushilfen, die Betriebsstoffbeschaffung, Lagerung usw. gehören.

Das nun folgende Beispiel zur Ermittlung der Selbstkosten eines größeren Dampfturbinenkraftwerkes wird die Nutzenanwendung des bisher Gesagten unterstützen.

30. Beispiel: Die Gesamtbaukosten eines Dampfturbinenkraftwerkes mit Frischwasseranschluß für eine eingebaute Maschinenleistung von 60000 kW, $\cos \varphi = 0,8$, verteilt auf 3 gleiche Maschinensätze von je 20000 kW (Dampfspannung 35 atü, Überhitzung 480°, Drehzahl 3000 U/min), Braunkohlenbrikettfeuerung (4800 kcal/kg) und der Schaltanlage einschließlich der Doppelsammelschienen der Stromerzeuger (6 kV) betragen nach Einzelkostenanschlägen RM 14000000,— (RM 233,— je ausgebautes kW). Die Grundstückskosten sind mitenthalten, desgleichen die Bauzinsen über ein volles Jahr gerechnet mit 5 vH und die eigenen Bauleitungskosten. Von diesen Kosten entfallen:

auf Grundstücke	4 vH =	560 000,— RM
auf Gebäude einschl. Verwaltungsgebäude und einem Wohnhaus für 4 Betriebsangestellte, sowie Fundamente und Schornsteine	20 vH =	2 800 000,— „
auf Kesselanlagen einschl. Bekohlung, Entaschung und Wasseraufbereitung	32 vH =	4 480 000,— „
auf Dampfturbinen, Kondensationsanlagen	26 vH =	3 640 000,— „
auf Schaltanlagen, Kabel, Steuer-, Sicherheits- und Meßeinrichtungen.	12 vH =	1 680 000,— „
auf Nebenanlagen, Gleisanschluß und besondere Unkosten	6 vH =	480 000,— „
		<u>14 000 000,— RM</u>

Für die Ausnutzung der Anlage wird die gesicherte Leistung zugrunde gelegt, die sich bei den vorgesehenen 3 Maschinensätzen und einer entsprechenden Aufteilung der Kesselzahl aus der Leistung von 2 Maschinensätzen und der zulässigen Überlastung von 25 vH ergibt, das sind 50 000 kW. Für die jährliche Benutzungszeit werden 2500 Stunden der Höchstleistung von 50 000 kW angenommen, so daß für die folgende wirtschaftliche Untersuchung die Jahresarbeitsmenge $125 \cdot 10^6$ kWh beträgt.

Der Ausnutzungswert beträgt somit:

$$Z_{Nj} = \frac{2500}{8760} = 0,286.$$

Die Bauzinsen und die eigenen Bauleitungskosten sind anteilmäßig auf die einzelnen Hauptposten verteilt.

Kapitaldienst:		
Verzinsung 5 vH.		700 000,— RM
Abschreibungen:		
Grundstücke	—	—
Gebäude 2 vH.	56 000,— RM	
Kesselanlagen 8 vH	3 584 00,— „	
Maschinen 8 vH.	2 912 00,— „	
Schaltanlagen 10 vH.	1 680 00,— „	
Nebenanlagen 5 vH	420 00,— „	
		<u>9 156 00,— RM</u>
		<u>16 156 00,— RM</u>
Abschreibungen über alles gerechnet = 6,52 vH		gesamter Kapitaldienst.

Sollen die Werksanlagen ohne Gebäude in rd. 12 Jahren abgeschrieben sein und die angesammelten Abschreibungen mit 4 vH als festangelegtes Geld verzinst werden, so ergibt sich mit der Berücksichtigung von Zins und Zinseszins aus Zahlentafel 46 ein Abschreibungssatz von 6,655 vH also etwa in der gleichen Höhe.

Ist das Gesamtkapital von 14 000 000,— RM mittelfristig geliehen und in 12 Jahren bei 5 vH zu tilgen, so müßte der Kapitaldienst auf:

5 vH Zinsen.	700 000,— RM
und Tilgung 6,283 vH	880 000,— „
	<u>1 580 000,— RM</u>

festgelegt werden. Es verblieben dann zugunsten einer Vermögensansammlung jährlich etwa 35 600,— RM.

Betriebskosten:

Bedienung:

8 Heizer je 2400,— RM	19200,— RM
8 Maschinisten je 3000,— RM	24000,— „
6 Schaltwärter je 3000,— RM	18000,— „
3 Elektriker je 3000,— RM	9000,— „
16 Kohlenarbeiter je 1800 RM	28000,— „
6 Schlosser und Schmiede als Hilfsarbeiter je 2400,— RM.	14400,— „
3 Vorarbeiter und Meister je 4800,— RM.	14400,— „
1 Betriebsingenieur	6000,— „
2 Betriebstechniker je 3600,— RM	7200,— „
5 Kaufleute für Buchhaltung und Lager je 3000,— RM	15000,— „
3 Hofarbeiter je 1200,— RM.	3600,— „
	<u>159600,— RM</u>

Soziale Abgaben, Versicherungen, Urlaubslöhne usw. 10 vH	15960,— RM
Aushilfe und Unvorhergesehenes	<u>14440,— „</u>

190000,— RM

190000,— RM = 1,36 vH des Anlagekapitals.

Unterhaltung:

für Gebäude 1 vH.	28000,— RM
für Kesselanlagen 1,5 vH.	67000,— „
für Maschinen 1,5 vH	54000,— „
für Schaltanlagen 1 vH.	16800,— „
für Nebenanlagen 0,5 vH.	<u>4200,— „</u>

170000,— RM

170000,— RM = 1,21 vH des Anlagekapitals.

Schmier- und Putzstoffe 0,3 vH der Kessel- und Maschinenbaukosten rund.

42000,— RM

Brennstoffverbrauch bei einer durchschnittlichen Wärmemenge von 6000 kcal/kWh und einem Kohlenpreis frei Kesselhaus von 17,10 RM/to bei 4800 kcal/kg Heizwert je kWh 2,14 Rpf für $125 \cdot 10^6$ kWh im Jahr

2675500,— RM3077506,— RMBei $125 \cdot 10^6$ kWh je Jahr wären an Kohlen erforderlich:

$$\frac{125000000 \cdot 6000}{4800 \cdot 1000} \cong 158000 \text{ t,}$$

oder bei 300 Liefertagen im Jahr täglich 520 t, für die mit 20 t-Wagen jeden Tag ein Kohlenzug von 26 Wagen entleert werden müßte.

Verwaltungs- und sonstige Unkosten:

Personalkosten für Geschäftsleitung, Ingenieure, Kaufleute, Buchhaltung, Einkauf	100000,— RM
Versicherungen.	40000,— „
Steuern bei 5 vH Verzinsung des Anlagekapitals etwa	700000,— „
Besondere Rücklage	<u>60000,— „</u>

900000,— RM

Gesamtkosten:

Kapitaldienst	1615600,— RM = 11,50 vH
Betriebskosten	3077500,— „ = 22,0 vH
Verwaltungskosten	<u>900000,— „ = 6,45 vH</u>
	<u><u>5593100,— RM = 40,0 vH</u></u>

des Anlagekapitals von 14000000,— RM.

Werden diese jährlichen Ausgaben auf die erzeugten kWh bezogen, so ergibt sich ein reiner Arbeitspreis von $\frac{5593100 \cdot 100}{125000000} = 4,48$ Rpf/kWh bei $h_j = 2500$ der gesicherten Leistung. Werden die jährlichen Ausgaben aufgeteilt auf feste Ausgaben berücksichtigt durch einen Leistungspreis, und bewegliche Ausgaben bezogen auf die Arbeitsmenge, so wären für die Leistungspreisermittlung anzusetzen

Kapitaldienst	1615 600,—	RM
25 vH der Verwaltungskosten	225 000,—	„
10 vH der Bedienungskosten	19 000,—	„
	<hr/>	
	1 859 600,—	RM

oder auf die gesicherte Leistung von 50000 kW bezogen $1859000:50000 = 37,20$ RM

Für den Arbeitspreis ergibt sich dann $3734100:125000000 = 2,98$ Rpf/kWh an der 6 kV Sammelschiene.

Erfolgt die Stromlieferung mit hoher Spannung und muß noch ein Umspannwerk vorgesehen werden, so sind in gleicher Weise die festen und beweglichen Kosten, hier allerdings in der Hauptsache feste Kosten, zu ermitteln und den Strombildungskosten für Leistung und Arbeit zuzuschlagen, wobei die Verluste zu berücksichtigen sind. Für die Abnahme am Ende einer Leitung ist in gleicher Weise der zusätzliche Leistungs- und Arbeitspreis zu bilden.

20. Die Verrechnungs-Meßgeräte.

a) Den **Zählern** fällt die Aufgabe zu, an bestimmten Stellen die erzeugte bzw. verbrauchte elektrische Arbeit festzustellen und fortlaufend zu summieren. Auf die Bauweise und die Ausführung dieser Geräte soll wiederum nicht näher eingegangen werden.

Im allgemeinen bestehen die Zähler aus kleinen Motoren mit Trommel- oder Scheibenanker nach der Induktions- oder Kollektorbauart, die durch Zahnräder oder durch Schnecke und Schneckentrieb mit einem Zählwerk verbunden sind. Das Zählwerk arbeitet entweder mit Zeigern, oder mit Walzen bzw. Scheiben, auf denen fortlaufend Nummern aufgetragen sind. Mehrere dieser Zeiger bzw. Walzen nebeneinander geben die Anzeige in Abständen von 10, 100, 1000 usw. Watt- bzw. kW-Stunden an.

Die Zeigerzählwerke besitzen die geringste Reibung innerhalb ihrer einzelnen Triebteile, haben also den geringsten Eigenverbrauch. Das ist naturgemäß ein nicht zu unterschätzender Vorteil, der insbesondere dann zu beachten ist, wenn es sich um Zähler für Anschlußanlagen handelt, wenn also eine sehr große Anzahl von Zählern zu betreiben ist (Stadt- und Überlandkraftwerke). Einen Nachteil besitzt das Zählwerk darin, daß dasselbe unbequem abzulesen ist. Es können leicht Ablesefehler vorkommen. Daher findet man die Zeigerzählwerke neuerdings nur noch selten.

Die Walzen- oder Scheibenzählwerke ermöglichen eine leichtere und zuverlässigere Ablesung und werden daher heute fast ausschließlich verwendet.

Auch die Zähler und ihre Nebenwiderstände bzw. Wandler müssen einer Reihe von Bedingungen genügen, zumal sie Verrechnungsmeßgeräte sind und damit einem Eichzwang unterliegen, die für Deutschland von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) und dem

VDE festgesetzt sind. Jeder Zähler muß das Systemzeichen und die Systemnummer tragen; ohne diese dürfen Zähler nicht in den öffentlichen Verkehr gebracht werden. Ferner müssen sie in ihrem Aufbau und ihrer Arbeitsweise durch die PTR beglaubigt werden. Damit unterliegen sie auch hinsichtlich ihrer zulässigen Fehler bestimmten, mit der Beglaubigung festgelegten Grenzen, die von Zeit zu Zeit (etwa alle ein oder zwei Jahre) überprüft und gegebenenfalls richtiggestellt werden müssen.

Diese Beglaubigungsfehlergrenzen sind für Gleichstrom-, für Wechselstrom- und für Meßwandlerzähler gesetzlich bestimmt¹.

Die VDE-Regeln erstrecken sich in der Hauptsache auf die Normung der Nennströme, auf die zu fordernde Überlastbarkeit, die Isolierfestigkeit und grundsätzliche Baugestaltung².

Als Hauptbedingungen für die Güte eines Zählers sind zu nennen:

Geringster Eigenverbrauch,
großes Drehmoment (etwa 8,5 cmg),
sicherer Anlauf bei geringster Last (etwa bei 0,5 vH der Nennlast),
Überlastbarkeit (VDE-Regeln),
Temperaturunabhängigkeit bei $\cos \varphi = 1$ und 0,5 (VDE-Regeln
etwa $\pm 0,5$ vH je 10° C).

Auf den geringsten Eigenverbrauch als Verlust ist bereits hingewiesen worden. Sicherer Anlauf und entsprechendes Drehmoment sind Forderungen, die sich auf die Messung des Verbrauches beziehen und ebenfalls geldliche Verluste bringen, wenn sie nicht den höchsten heute erreichbaren Werten entsprechen. Schon eine Lampe in einer größeren Anlage muß in ihrem Stromverbrauch zuverlässig erfaßt werden.

Je nach den Stellen, an denen die Zähler liegen, ist darauf zu achten, daß Überlastungen, Kurzschlüsse, sowie Spannungs-, Frequenz- und Temperaturschwankungen die Genauigkeit der Zählerangaben nur in ganz geringen Grenzen beeinflussen. In Abb. 479 sind Kennlinien für die Abweichungen der Zählerangaben bei den verschiedenen Ursachen zusammengestellt. Solche Kennlinien werden für beglaubigungsfähige Zähler von den Herstellern nicht allgemein beigegeben, weil der Hinweis auf die Beglaubigungsfähigkeit dafür bürgt, daß die in den Preislisten angegebenen Werte zutreffend sind. Immerhin wird eine Einforderung solcher Kennlinien bei besonders wichtigen Zählern schon für die zeitweise Nachprüfung von Bedeutung sein.

Schließlich müssen alle Teile vorzüglich isoliert und in einer Form mechanisch geschützt sein, daß einmal keine Verschmutzung der feinen Lagerstellen eintreten und ferner ein Eingriff in das Zählwerk durch Unberufene nicht stattfinden kann.

Die Zähler werden sowohl für Gleichstrom als auch für Ein- und Mehrphasen-Wechselstrom gebaut und bei größeren Stromstärken bzw.

¹ Gesetz betr. die elektrischen Maßeinheiten, Prüfung und Beglaubigung von Elektrizitätszählern und Meßwandlern.

² VDE: Regeln für Elektrizitätszähler.

bei höheren Spannungen im ersteren Fall an besondere Nebenwiderstände, im zweiten Fall an Strom- und Spannungswandler angeschlossen

Bei Gleichstrom entspricht die entnommene Leistung dem Produkt aus Strom und Spannung ($= U \cdot I$); es kann also einwandfrei die verbrauchte Arbeit während einer bestimmten Zeit ($U \cdot I \cdot t$) summiert werden. Zumeist wird in kW-Stunden gemessen. Man unterscheidet zwischen Zählern für Zweileiter- und Dreileiteranlagen, in letzterem

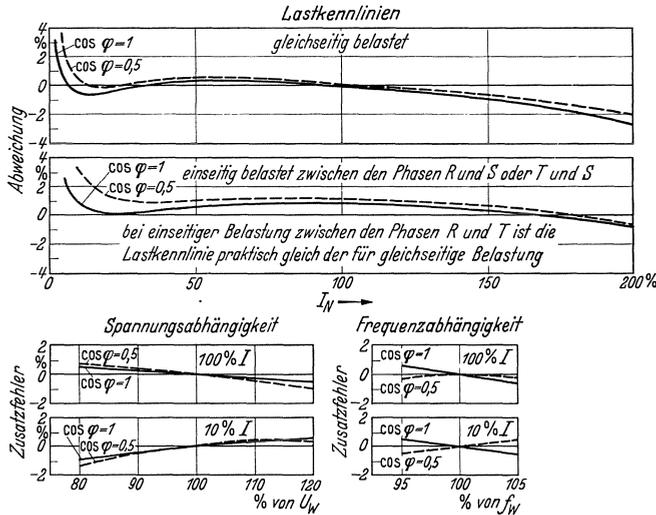


Abb. 479. Genauigkeits-Kennlinien für Last, Spannungs- und Frequenzabhängigkeit zu einem Wattstundenzähler für Belastungen mit Wirk- und Blindstrom, für gleich- und ungleichbelastete Phasen, 2 Triebssysteme.

- Anlauf unter 0,5 vH der Nennlast,
- Genauigkeit
 - bei Nennspannung und Nennfrequenz bei gleichseitiger Belastung
 - von 10 bis 100 vH des Nennstromes $\cos \varphi = 1$ bis 0,5 ± 2 vH,
 - über 100 bis 200 vH des Nennstromes $\cos \varphi = 1$ bis 0,5 ± 3 vH.
- Eigenverbrauch
 - im Spannungskreis etwa 2 · (0,85 bis 0,9) W
 - bzw. 2 · (3 bis 3,3) VA,
 - in den Hauptstromspulen
 - bei 5 A (Meßwandlerzähler) etwa 2 · 3,5 VA,
 - bzw. 2 · 0,53 VA.
- Mittleres Drehmoment. etwa 8,5 cmg.
- Temperaturabhängigkeit bei $\cos \varphi = 1$ und 0,5 innerhalb $\pm 0,4$ vH je 10° C.
- Überlastbarkeit gemäß RIEZ.

Fall mit oder ohne Benutzung des Mittelleiters. Für die Lade- und Entladeseite einer Batterie werden bei Einfach-Zellenschaltern zwei getrennte Zähler, die in Hintereinanderschaltung liegen, eingebaut. Beide müssen mit Rücklaufhemmung ausgerüstet sein, damit sie nur in der für sie bestimmten Stromrichtung arbeiten. Beim Doppelschalter wird je ein Zähler auf der Lade- und Entladeseite angeordnet. Auch hier ist die Rücklaufhemmung zu empfehlen, um gegebenenfalls von der Ladeseite aus die Stromlieferung vorzunehmen, ohne daß dabei der Zähler aus- oder umgeschaltet zu werden braucht.

Bei Wechselstrom richtet sich die Auswahl des Zählers nach der An-

zahl der Phasen. Dabei ist besonders darauf zu achten, daß bei Mehrphasenstrom die Zähler für gleich oder ungleich belastete Phasen, für Vierleiteranlagen, ferner allgemein für Wirk- und Blindstromlast hergestellt werden.

Zähler für gleichbelastete Phasen sind hinsichtlich Schaltung und Zahl der Meßwandler in Hochspannungsanlagen die billigsten, aber auch die unzuverlässigsten, denn sie setzen für richtiges Arbeiten voraus, daß auch tatsächlich die Belastung in allen drei Zweigen des Stromkreises stets gleich ist. Letzteres trifft nicht einmal bei Motoren zu, obgleich gerade für diese Stromverbraucher diese Zähler häufig angewendet werden. Besser sind auch hier Zähler für ungleich belastete Phasen. Letztere sind am vorteilhaftesten, wenn sie nach der Zweiwattmeterschaltung geschaltet sind, da sie dann auch bei einer Änderung der Phasenfolge noch richtig arbeiten. Sie erfordern allerdings bei Drehstrom zwei Strom- und zwei Einphasen-Spannungswandler, sind also in der Beschaffung teurer.

Die Zählergröße wird durch die Höhe der Belastung bestimmt. In reinen Lichtanlagen wird der Zähler etwa für $\frac{3}{4}$ des Höchststromes bemessen, da es kaum vorkommt, daß alle angeschlossenen Lampen gleichzeitig brennen, und außerdem die Zähler in der Regel um 30 bis 50 vH vorübergehend überlastbar sind. Bei Motorenbetrieben muß der Zähler nach dem Nennstrom des Motors bestimmt werden, wobei besonders zu beachten ist, ob die Motoren knapp oder reichlich groß gewählt sind, und ob häufig stoßweise oder allmählich verlaufende Überlastungen auftreten. Sollte ersteres der Fall sein, so sind die Zähler etwas reichlicher zu nehmen, damit ihre Angaben nicht ungenau werden.

Für gemischte Betriebe wählt man die Zähler am besten nach dem Dauerstrom, der in den Hauptbetriebszeiten auftritt, oder richtet sich danach, welche Last (Licht oder Kraft) überwiegt.

Liegen zwei Kraftwerke im gelegentlichen oder ständigen Stromaustausch, so begnügt man sich zumeist nicht mit je einem Zähler, sondern schaltet an den Austauschpunkten je zwei Zähler parallel, um beim Ausfall eines Zählers einen zweiten zur Stelle zu haben und die Angaben der beiden Zähler gegenseitig prüfmäßig jederzeit vergleichen zu können. Die Zähler müssen mit Rücklaufhemmung ausgerüstet werden.

Die gebräuchlichen Zähler in Einphasen- und Drehstromanlagen sind $\cos \varphi$ -Zähler, denn sie summieren die Arbeit in einer bestimmten Zeit $\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot t$. Die Blindarbeit wird also nicht berücksichtigt. Solange es sich um reine Lichtstromkreise oder solche anderen Anschlüsse handelt, die mit annähernd $\cos \varphi = 1$ arbeiten, spielt der Leistungsfaktor keine Rolle. Muß die Blindarbeit berücksichtigt werden, die in der Erzeugung und Fortleitung oft wesentliche Ausgaben in der Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Folge hat, so werden besondere Blindverbrauchsähler ($\sin \varphi$ -Zähler) eingebaut, die also $\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot t$ messen. Tariflich wird der Blindverbrauch einer Anlage oft im Arbeitspreis mit Zu- oder Abschlägen auf den Wirkverbrauch

erfaßt (S. 561), wenn nacheilender Strom abgenommen wird. Da die Stromerzeuger in Deutschland fast stets für einen Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,8$ nacheilend ausgelegt werden, wird von diesem Leistungsfaktor auch tariflich ausgegangen und bei schlechtem $\cos \varphi$ der erwähnte Aufschlag, bei besserem $\cos \varphi$ als 0,8 die Vergütung errechnet. Bei $\cos \varphi = 0,8$ nacheilend beträgt die Blindarbeitsmenge rund 75 vH der Wirkarbeitsmenge. In Zahlentafel 51 sind für andere Leistungsfaktoren hierfür Zahlenangaben zusammengestellt. Über den Zuschlag bzw. die Vergütung ist auf den Stromversorgungsvertrag zu verweisen.

Zahlentafel 51.

Blind-kWh in vH der Wirk-kWh bei verschiedenen Leistungsfaktoren.

Leistungsfaktor										
$\cos \varphi$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Winkel φ	—	25°50	36°50	45°34	53°10	60°00	66°25	72°30	78°25	84°15
Blind-kVA-Stdn. in vH der Wirk- kilowattstunde .	0	48	75	102	133	173	229	317	487	989

Aus den Angaben der Wirk- und Blindverbrauchszähler ist der mittlere Leistungsfaktor, mit dem die Abnahme innerhalb des Ablesezeitraumes erfolgte, in folgender Weise zu ermitteln:

$$\frac{\text{Angabe der Blindverbrauchszähler (kVAh)}}{\text{Angabe der Wirkverbrauchszähler (kWh)}} = \operatorname{tg} \varphi.$$

Daraus ist der Winkel φ und dann der entsprechende $\cos \varphi$ -Wert festzustellen (S. 76).

31. Beispiel: Das Kraftwerk schließt mit einem Stromabnehmer ein Abkommen, daß der festgesetzte Kilowattstundenpreis bei einem mittleren Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,8$ gelten soll. Wird die Leistung mit diesem Leistungsfaktor entnommen, so muß nach Zahlentafel 51 der Blindverbrauchszähler in einem Ablesezeitraum 75 vH der Angaben des Wirkverbrauchszählers anzeigen. Zeigt er weniger als 75 vH an, ist also eine Fehlmenge an Blind-kVA-Stunden vorhanden, so kann für jede dieser fehlenden Blind-kVA-Stunden dem Abnehmer eine Vergütung seitens des Kraftwerkes gewährt werden. In diesem Fall hätte er in seiner Anlage einen besseren Leistungsfaktor als 0,8 gehabt. Zeigt dagegen der Blindverbrauchszähler mehr als 75 vH des Wirkverbrauchszählers, so muß der Abnehmer für jede mehr angezeigte Blind-kVA-Stunde eine Vergütung an das Kraftwerk zahlen, denn er hat mit einem schlechten Leistungsfaktor abgenommen.

Besonders ist zu beachten, daß der Blindverbrauchszähler im richtigen Drehsinn angeschlossen wird, da er sonst vollständig verkehrte Angaben macht. Ferner ist darauf aufmerksam zu machen, daß im Gegensatz zum Wirkverbrauchszähler der Blindverbrauchszähler beim Übergang von induktiver zu kapazitiver Belastung seine Drehrichtung umkehrt. Für den Kraftwerks-Verbundbetrieb oder auch bei Leistungs-factorverbesserungen durch Synchronmotoren oder Kondensatoren sind wieder Rücklaufhemmungen auch gegen Drehrichtungswechsel bei kapazitiver Belastung (Nacht—Schwachlast) vorzusehen. Soll kapazitiver Strom berücksichtigt werden, dann ist ein besonderer Zähler dafür erforderlich. Abb. 480 zeigt das vollständige Schaltbild für eine Zählereinrichtung zum Messen aller Arbeitsmengen.

Wird der Arbeitspreis nach einem Doppeltarif z. B. für Tag- und Nachtanahme verrechnet, so erhalten die Wattstundenzähler zwei Meßwerke und eine Umschaltuhr mit Federantrieb für eine Gangdauer von etwa 35 Tagen oder mit elektrischem Antrieb durch Synchronmotor (Synchronuhr). Im letzteren Fall muß aber das Kraftwerk mit geregelter Frequenz fahren, da der Synchronmotorantrieb von der Frequenz abhängig ist. Die Synchronuhr gibt dann größere Zeitgenauig-

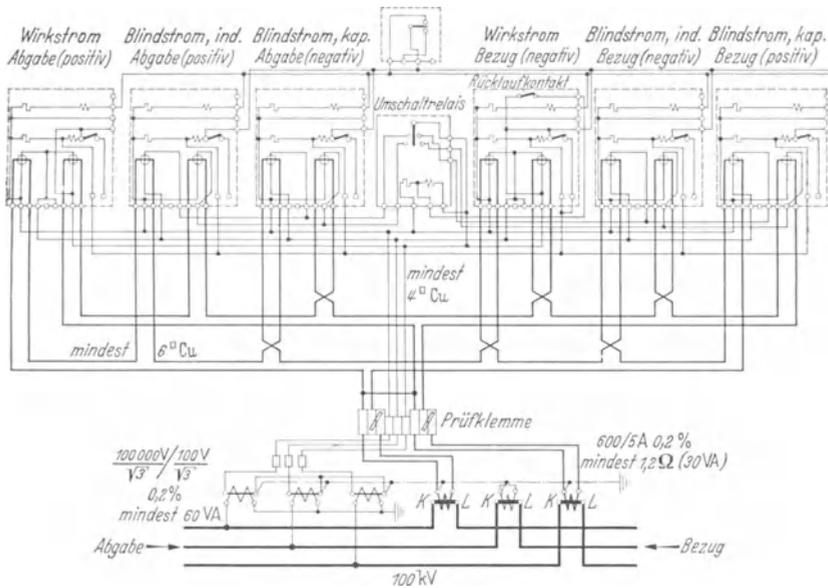


Abb. 480. Vollständiger Zählsatz (Wirk- und Blindstrom, Bezug und Abgabe) für 100 MVA, 100 kV.

Sämtliche Zähler: 100 V, 3×5 A, mit Rücklaufhemmung, mit Doppeltariftarifzählwerk, mit 30 min Schreibung.
 Wirkstrom-Zähler: Feinzähler. Der Bezugszähler mit Rücklaufschaltstück.
 Beiwerte: Arbeit: $C = \frac{100000}{100} \times \frac{600}{5} = 120000$.
 Leistung: $1^\circ = 1 \text{ mm} = 1200 \text{ kW}$.
 Meßbereich: 104 MVA (max. + 20% = 125 MVA).

Bei Messung in 3 Phasen treten an Stelle der Dreileiterzähler die entsprechenden Vierleiterzähler und Meßwerke.

keit. Die Uhr muß dabei aber auch noch eine Gangaushilfe von etwa 36 Stunden zumeist erhalten.

Bei Anschluß der Zähler an Meßwandler ist die Meßgenauigkeit der Wandler zu beachten¹.

b) Zähler mit Höchstlastzeiger. Sieht der Tarif die Bezahlung der abgenommenen Leistung nach einem Monats- oder Jahresleistungspreis vor, wie das im 28. Beispiel der Fall ist, so kann zur Feststellung der verbrauchten Leistung innerhalb eines bestimmten Abrechnungszeitraumes z. B. eines Monats nicht der schreibende Leistungszeiger

¹ Wellhöfer, F.: Vergleichende Betrachtung über die Meßgenauigkeit von Wandler-Meßsätzen. ETZ 1937 Heft 40 S. 1092.

für die Betriebsmessung verwendet werden. Er zeigt die Augenblicksleistungen an, die aber einer Stromabrechnung nicht zugrunde gelegt werden können, weil das wirtschaftlich nicht vertretbar wäre und preislich auch nicht erfaßt werden könnte.

Für diese Meßzwecke wird daher ein besonderer Höchstlastzeiger mit dem Zähler verbunden, der nicht den Augenblickswert, sondern den Durchschnittswert der aufgetretenen Leistung innerhalb eines bestimmten Meßzeitraumes etwa $\frac{1}{4}$ oder $\frac{1}{2}$ Stunde anzeigt. Dadurch werden alle kurzzeitigen besonders hohen Leistungen, wie sie bei Kurzschlüssen, Anlauf von Motoren, Zuschalten oder Umschalten von Stromkreisen u. dgl. auftreten, nur in geringem Maß berücksichtigt. Auch für

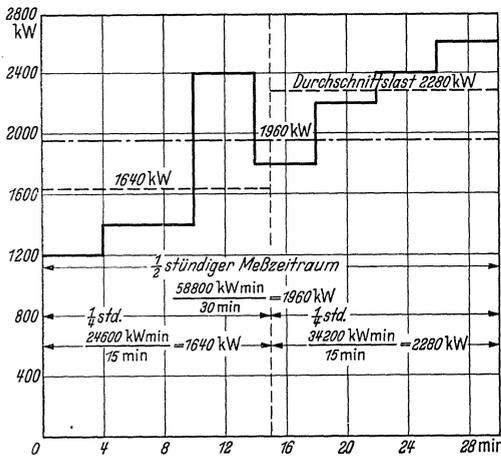


Abb. 481. Höchstlastmessung mit $\frac{1}{4}$ - und $\frac{1}{2}$ -stündigem Meßzeitraum, mit Durchschnittsanzeige des Höchstlastmessers.

die ansteigende Last z. B. zur Zeit der Spitze ist das von Bedeutung. Wesentlich ist dabei der Meßzeitraum. Die Durchschnittsleistung eines längeren Meßzeitraumes wird geringer also für den Abnehmer billiger, als bei einem kürzeren. Aus Abb. 481 ist dieses auch zahlenmäßig zu ersehen. Aus dem Leistungsverlauf der Abb. 481 ergibt sich innerhalb einer Verbrauchszeit von 30 min, in welcher die Höchstlast eines Tages liegen soll, eine Arbeitsmenge von 58800 kWmin. Bei einem Meßzeitraum von nur

$$0 \div 15 \text{ min: } \frac{24600 \text{ kWmin}}{15 \text{ min}} = 1640 \text{ kW}$$

und

$$15 \div 30 \text{ min: } \frac{34200 \text{ kWmin}}{15 \text{ min}} = 2280 \text{ kW,}$$

während bei 30 min Meßzeitraum die Höchstlast auf:

$$\frac{58800 \text{ kWmin}}{30 \text{ min}} = 1960 \text{ kW} = 14 \text{ vH}$$

weniger steht.

Die Arbeitsweise dieses Höchstlastzeigers ist derart, daß durch eine getrennte oder im Zähler eingebaute Uhr ein Meßwerk kurzzeitig ein- oder ausgeschaltet wird, das einen Zeiger mit einem Schleppeziger innerhalb des Meßzeitraumes auf den Wert einer Skala einstellt, der der Durchschnittsleistung entspricht. Für die Verrechnung der innerhalb eines Arbeitszeitraumes aufgetretenen durchschnittlichen Höchst-

last wird die Einstellung dieses Schleppzeigers benutzt, der nur dann erneut bewegt wird, wenn eine höhere Leistung als die bisher angezeigte aufgetreten ist. Am Ende des Ablesezeitraumes ist der Schleppzeiger wieder auf den Nullwert zurückzustellen.

Diese Zähler mit Höchstlastanzeiger sind nur für einzelne, besonders abzurechnende Meßstellen verwendbar. Sie geben keinen Überblick, wann die Höchstlast und wie oft sie innerhalb des Ablesezeitraumes aufgetreten ist. Soll der Lastverlauf im einzelnen überblickt werden können, dann ist der Zähler mit schreibendem Höchst-

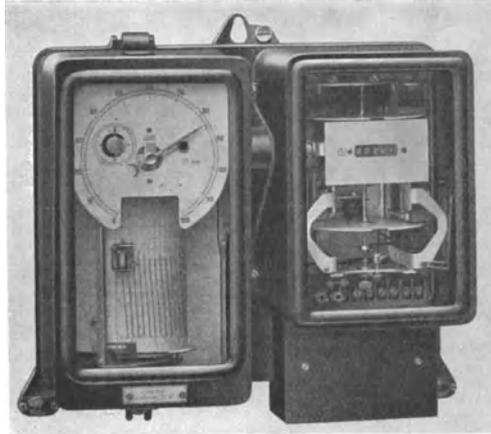


Abb. 482. kWh-Zähler und schreibender Höchstlastanzeiger.

lastanzeiger zu benutzen. Abb. 482 zeigt einen solchen Zähler und Abb. 483 den Ausschnitt aus einem Schreibstreifen. In Abb. 484 ist die Wirkungsweise dieser Höchstlastanzeiger dargestellt. Aus den Meßwerten N_1 bis N_6 wird nur N_5 vom Höchstlastanzeiger angezeigt, während auf dem Schreibstreifen des schreibenden Meßgerätes jeder Wert N_1 bis N_6 erscheint.

Der schreibende Höchstlastanzeiger ist auch dann erforderlich, wenn die an mehreren Meßstellen abgenommene Leistung, die zu gleicher Zeit aufgetreten ist, als Gesamtleistung abgerechnet werden soll. Eine solche gleichzeitige Leistungsmessung für einen Abnehmer mit mehreren Verbrauchsstellen hat den Vorteil, daß die tatsächlich beanspruchte Leistung festgestellt wird, die sich je nach den Lastverhältnissen der einzelnen Abnahmestellen innerhalb des Ablesezeitraumes ganz verschieden verteilen kann, ohne daß dem Abnehmer eine höhere Leistung verrechnet wird, als sie insgesamt zu gleicher Zeit vom Werk zu liefern war.

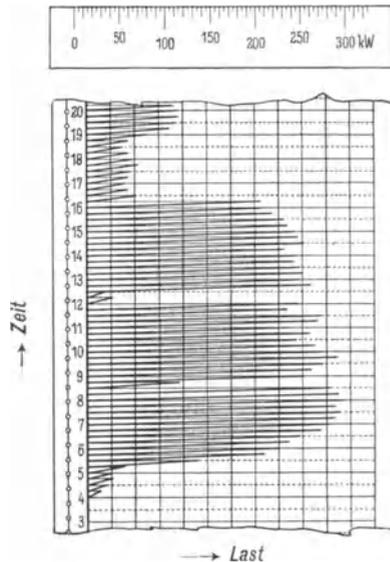


Abb. 483. Schreibstreifen eines Höchstlastanzeigers mit $\frac{1}{4}$ stündigem Meßzeitraum.

Da die Auswertung mehrerer Schreibstreifen für die Feststellung der gleichzeitigen Höchstleistung oft recht schwierig und zeitraubend ist, wird die Summenmessung angewendet, bei der nur ein Höchstlastanzeiger eingebaut wird. Abb. 485 zeigt hierfür ein einfaches Schaltbild. Diese Summenmessung ist aber nur anwendbar, wenn alle Meßstellen synchron arbeiten. Die Summenmessung wird gern auch beim Anschluß einer Abnahmestelle an eine Doppelsammelschiene benutzt.

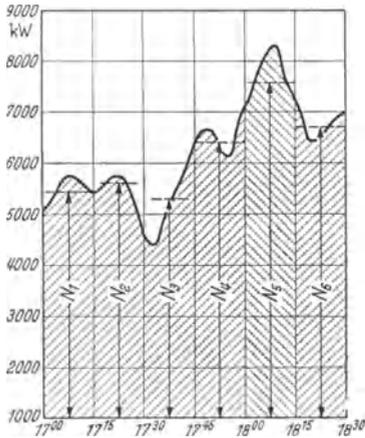


Abb. 484. Meßschaubild für die Wirkungsweise des Höchstlastanzeigers.

Sollen Meßstellen verschiedener Spannung und Betriebsverhältnisse summiert werden, so sind auch hierfür Zähler und Höchstlastanzeiger durchgebildet, die dann aus zwei getrennten Meßwerken bestehen und bei mehreren zusammenzuziehenden Meßstellen noch besondere Schaltwerke erhalten müssen. Es mag dieser kurze Hinweis genügen.

Auch besondere Spitzenlastzähler, Überverbrauchszähler (Abb.

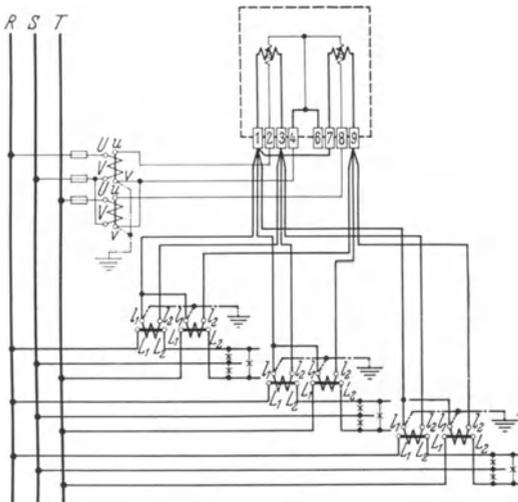


Abb. 485. Summenzählung für 3 Abgabestellen durch 1 Drehstromdreileiter-Zähler mit 2 Stromwandlern je Leitung und 2 gemeinsamen Spannungswandlern.

486)¹, sowie neuerdings an Stelle der schreibenden Höchstlastanzeiger solche Meßgeräte, die die anzuzeigenden Werte in Zahlen drucken, sind auf dem Markt. Ferner ist auf die Fernmessung hinzuweisen. Die Preislisten der Hersteller geben darüber erschöpfende Auskunft.

Für die Umschaltuhren, die entweder als Pendeluhren mit etwa 35-tägiger Laufzeit oder als Synchronuhren ausgeführt werden, sind ebenfalls eine Reihe von Ausführungen im Gebrauch, deren Auswahl nach den betreffenden Aufgabenge-

troffen werden muß, die sie erfüllen sollen. Zu letzteren gehört auch die Umschaltung bei einem Doppeltarif, für die Höchstbelastungs-

¹ Krüzner, H.: Fortschritte im Bau von Überverbrauchszählern. ETZ 1939 Heft 46 S. 1303.

anzeige am Tage oder in bestimmten Sperrzeiten, für die Zuschaltung von Spitzenzählern u. dgl.

Zum Schluß ist noch auf die Verlustfeststellung durch Zähler hinzuweisen, sofern bei Umspannern überspannungsseitig verrechnet, aber unterspannungsseitig gemessen werden soll. Hierzu dienen Strom- und Spannungszähler, die $I^2 \cdot h$ und $U^2 \cdot h$ feststellen. Zu ihrer Arbeitsweise ist nichts Besonderes zu sagen.

21. Betriebswirtschaftliche Angaben.

Nach dieser Einzelbehandlung der Selbstkosten sollen nun noch einige Muster für die monatliche Kosten- und Betriebsübersicht kurz besprochen werden. Das Muster I behandelt die Betriebskosten in einfacher Form, wie sie dem Betriebsführer und den verantwortlichen Verwaltungsstellen monatlich vorzulegen ist. Sie gibt nur summarische Zusammenstellungen aus dem laufenden Monat in Gegenüberstellung zum gleichen Monat des Vorjahres und die gleiche Gegenüberstellung für die bisher im Jahr angefallenen Gesamtkosten. Für die Grundüberwachung und die Prüfung besonders hoher Einzelkosten genügen solche Zahlenberichte, die im übrigen auch für statistische Erfassungen zumeist ausreichen. Kurze Erläuterungen der Betriebsleitung zu einzelnen starken Kostenänderungen runden solche Übersichten ab.

Das Muster II für die Verwaltungskosten vervollständigen den Überblick über den Geschäftsgang in gleicher Gegenüberstellung wie bei Muster I.

Über den Betriebsverlauf selbst erstattet Muster III den erforderlichen Monatsbericht. Hierzu ist Besonderes nicht mehr zu sagen.

Im Kraftwerksverbundbetrieb sind die täglichen und aus diesen die monatlichen Betriebsaufzeichnungen wesentlich umfangreicher, wenn der Einsatz der Betriebsmittel wirtschaftlich auf das Beste durchgeführt werden soll. Hier gibt wiederum die Richtlinien der Fahrplan, den der Lastverteiler nach dem Vortage aufstellt, wenn nicht einfacher und leichter durchführbar ein Wochenfahrplan festgesetzt wird. Bei letzterem behält der Lastverteiler stets eine gewisse Kessel- und Maschinenaushilfe an der Hand, um sie bei besonderen Vorkommnissen und plötzlichen Störungen einsetzen zu können, ohne sofort den ganzen Fahrplan umwerfen zu müssen.

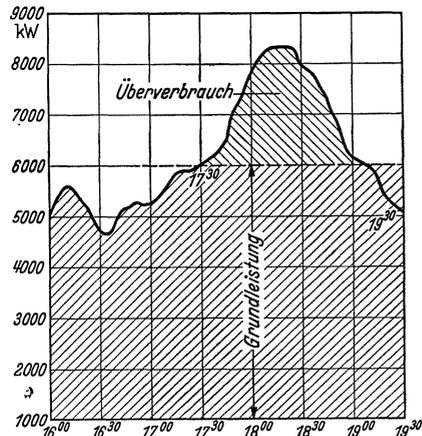


Abb. 486. Meßschaubild für den Überverbrauchs- (Spitzen-)Zähler.

Muster I.

Betriebsausgabennachweis für den Monat 19..

1	An den Sammelschienen abgegeben nach Betriebsübersicht . . kWh	Stand am Anfang des Monats		Monat		Stand am Ende des Monats		Vorjahr	
		RM	Rpf	RM	Rpf	RM	Rpf	RM	Rpf
2	I. Betrieb Betriebslöhne								
3	Urlaubslöhne								
4	Krankenzlöhne								
5	Betriebsgehälter								
6	Soziale Versicherungsbeiträge								
7	Berufsgenossenschaftsbeiträge								
8	Brennstoffe (Kohle, Öl)								
9	Betriebsstoffe (Putz-, Schmierstoffe)								
10	Wasserverbrauch								
11	Aschebeseitigung								
12	Schadensversicherungen								
13	Verschiedenes								
14									
15									
16	Summe der Betriebskosten								
17	je kWh								
	II. Instandsetzungen, Überholungen								
18	Gebäude								
19	Gleisanlage								
20	Dampfkessel mit Zubehör								
21	Bekohlung								
22	Entaschung								
23	Wasserreinigung								
24	Dampfturbinen, Kondensationsanlagen								
25	Schaltanlagen, Umspanner								
26	Batterien, Meldeanlagen								
27	Werkzeuge, Geräte, Meßeinrichtungen								
28									
29									
30	Summe der Instandsetzungen								
	je kWh								
	Gesamtsumme I und II								
	je kWh								

Aufgestellt Unterschrift

Besondere Bemerkungen und Betriebsbericht (Schreibstreifen der Meßgeräte und Kennlinien des Lastverlaufes beifügen).

Muster II.

Ertragsübersicht.

Geschäftsjahr

Monat

	Einzelposten	Berichtsmonat		Seit Beginn des Jahres	
		Laufendes Jahr	Vorjahr	Laufendes Jahr	Vorjahr
1	Verwaltung Gehälter und Löhne				
2	Soziale Leistungen, auch Fürsorgeleistungen				
3	Bürounkosten				
4	Versicherungen				
5	Steuern				
6	Reiseausgaben				
7	Kraftfahrzeuge				
8	Besondere über die Ertragrechnung laufende Kosten				
9	Benutzungsgebühren für Fremdanlagen				
10	Zinsen				
11					
12					
	Insgesamt				
13	Einnahmen aus Strom				
14	aus Mieten und Pachten				
15	aus Zinsen				
16					
	Insgesamt				
1-12	Ausgaben für Verwaltung				
17	für Betrieb nach Sonderaufstellung				
18	für Abschreibungen (¹ / ₁₂)				
19	für Kapitaldienst (¹ / ₁₂)				
	Insgesamt				
	Ergebnis Einnahmen				
	Ausgaben				
	Überschuß				

Muster III.
Tagesbetriebsbericht für den 19...
Werk A.

Betriebsstunden einschließlich Anheizen				Betriebsstunden			
Erzeugung	am Be- richts- tag	seit der letzten Reinigung	seit dem 1. Januar des Betriebsjahres	Maschinen	am Be- richts- tag	seit der letzten Reinigung	seit dem 1. Januar des Betriebsjahres
	Heutiger Stand	Gestriger Stand	Unterschied	Erzeugt			
Kessel							
Kessel 1				Turbine I			
Kessel 2				Turbine II			
Kessel 3							
				Kondensator I			
				Kondensator II			
Erzeugte Kilowattstunden an den Sammelschienen ¹							
	Zählerstand		Kilowattstunde		Bemerkungen		
	Heutiger Stand	Gestriger Stand	Unterschied	Erzeugt			
Turbine I							
Turbine II							
							Summe A
Abzüglich Eigenbedarf							
für Kondensation							
für Kesselbetrieb							
für Verschiedenes							
Zusammen							Summe B
Netzlieferung							Summe C

¹ Ist zur Feststellung des Leistungsfaktors gegebenenfalls auch auf den Blindverbrauchszähler induktiv und kapazitiv auszuweichen.

Abgegebene Kilowattstunden an den Sammelschienen¹

Abnahme I, Hauptzähler													Summe D	
Abnahme I, Kontrollzähler													Summe C	
Abnahme II, Hauptzähler														Unterschied
Abnahme II, Kontrollzähler													= vH	
Gesamtabgabe														Summe D
Höchstlast Turbine I	in der												Spitze um	Uhr
Höchstlast Turbine II	in der												Spitze um	Uhr
	in der												Spitze um	Uhr
Höchstlast Abnahme I	in der												Spitze um	Uhr
Höchstlast Abnahme II	in der												Spitze um	Uhr
Höchstlast Eigenbedarf	in der												Spitze um	Uhr
Gesamte gleichzeitig erzeugte Höchstlast	in der												Spitze um	Uhr
Gesamte abgegebene Netzhöchstlast	in der												Spitze um	Uhr
Bemerkungen:														
Witterungsverhältnisse:														
Niedrigste Außentemperatur °C														
Höchste Außentemperatur °C														

¹ Ist zur Feststellung des Leistungsfaktors gegebenenfalls auch auf den Blindverbrauchsähler induktiv und kapazitiv auszuweichen.

Brennstoffverbrauch.

Art und Verwendung	kg				1000 kcal				Bemerkungen
Braunkohlenbriketts für Betrieb									
Braunkohlenbriketts für Anheizen									
Steinkohle für Betrieb									
Steinkohle für Anheizen									
Grußkohle Zusatz									
Staubkohle für Betrieb									
Staubkohle für Anheizen									
Gesamter Verbrauch									
Gesamter Verbrauch für die erzeugte kWh									
Gesamter Verbrauch für die Netz-kWh									kg Aschenrückstände

Wasserverbrauch.

Pumpenförderung m ³				im Kesselhaus verdampft m ³			
Verteilung	m ³			Verteilung	m ³ /t		
Reinigung (Speisezusatzwasser)				Kondensatmenge.			
den Kühltürmen zugeführt				+ vH Verdampfungszuschlag			
Frischwasserdurchlauf							
Turbinen-Anlassen-Kühlen							
Allgemeine Zwecke							
Insgesamt				Insgesamt verdampft			

Wirtschaftliche Übersicht.

Turbine I, Luftleere	vH
Turbine II, Luftleere	vH
Dampfverbrauch für die Netz-kWh	kg
Wärmeverbrauch für die Netz-kWh	kcal
Durchschnitts-Verdampfungsziffer	fach
Brennstoffverbrauch für die Netz-kWh	kg
Durchschnitts-Verdampfung je m ² Heizfläche stündlich	kg
Durchschnitts-Kesselwirkungsgrad	vH
Durchschnitts-Turbinenwirkungsgrad	vH
Durchschnitts-Gesamtwirkungsgrad	vH
Durchschnitts-thermodynamischer Wirkungsgrad	vH

Aufgestellt

Unterschrift

Betriebsbericht:

Die Betriebswirtschaft erstreckt sich auf die Betriebsführung und den wirtschaftlichen Einsatz sämtlicher Betriebsmittel.

Die Betriebsführung hat einen außerordentlich großen Aufgabenkreis, der naturgemäß der Größe und dem Umfang des Kraftwerkes mit seinem Versorgungsgebiet entsprechend zu beurteilen ist.

Der wirtschaftliche Einsatz der Betriebsmittel umfaßt erstlich die tägliche und dann weiter die monatliche oder die Jahresbedarfsdeckung im Hinblick auf die jährliche Überholung der Anlageteile also mit Rücksicht auf den Ausfall von Maschinen und Kessel, Kohlenbewegungseinrichtungen u. dgl. Hierzu wird der Lastverlauf des verflossenen Jahres unter entsprechende Berücksichtigung geänderter wirtschaftlicher Verhältnisse des Versorgungsgebietes zugrunde gelegt und nun ein Zeitplan aufgestellt, nach welchem der Betriebsmitteleinsatz zu erfolgen hat. Eine Betriebsbuchführung über jeden wesentlichen Anlagenteil erleichtert die Betriebsmittelbeurteilung außerordentlich.

22. Der Stromversorgungsvertrag.

a) **Vertragsgrundlagen.** Sind die Verkaufspreise (S. 566) ermittelt, dann sind damit auch die Hauptgrundlagen für einen Stromversorgungsvertrag festgelegt. Die verschiedenen Möglichkeiten der Stromabnahme nach Grund- oder Spitzenlast, nach Sommer- und Winterleistung, nach Tages- und Nachtbezug, das Mitarbeiten einer eigenen Anlage des Abnehmers, die Steigerung der Leistung, die Jahresausnutzung einer bereitgestellten oder fest vereinbarten Leistung und vieles mehr sind die Richtlinien, nach denen die Verhandlungen mit dem Abnehmer zu führen sind. Die Regel für die Stromverrechnung ist ein Tarif nach Leistungs- und Arbeitspreis.

Der Leistungspreis ist für die entnommene Leistung zu entrichten. Es ist dabei sein Einfluß auf den kWh-Preis zu beurteilen.

Schon aus dem 30. Beispiel ist zu ersehen, wie sich die Jahresstromkosten je kWh ändern, wenn die Jahresbenutzungszeit steigt oder fällt. Der Quotient aus:

$$\frac{\text{Leistungspreis je kW und Jahr}}{\text{Jahresbenutzungsstunden der Verrechnungsleistung}}$$

bestimmt den Leistungspreisanteil an den Jahresstromkosten auf die kWh umgerechnet.

32. Beispiel: Der Leistungspreis beträgt RM 60,00/kW und Jahr, der Arbeitspreis beträgt 3,5 Rpf/kWh.

		Dann ergibt sich aus dem Leistungspreisanteil und den						
		1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000
Jahresbenutzungsstunden		1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000
der Leistungspreisanteil zu		6,00	4,00	3,00	2,00	1,50	1,20	1,00 Rpf/kWh
dazu der Arbeitspreis mit		3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50 Rpf/kWh
so daß der Jahrespreis beträgt je kWh		9,50	7,50	6,50	5,50	5,00	4,70	4,50 Rpf

Zu berücksichtigen wäre ferner noch der Zu- und Abschlag gegenüber einem vertraglich festgelegten Durchschnitts-Leistungsfaktor und gegebenenfalls eine Preiserminderung durch den Nachlaß auf die Nachtstromabnahme.

Es ist für den Abnehmer und auch für das liefernde Werk immer vorteilhaft, die bestellte oder bezogene Höchstleistung eines Rechnungsjahres mithöchstmöglicher Benutzungszeit zu verwenden. Das hat häufig zur Folge, daß der Abnehmer eine besondere eigene Spitzenlastmaschine aufstellt, um dadurch die bezogene Leistung als Grundleistung mehr in vergleichsmäßiger Höhe und dadurch mit höherer Benutzungszeit über das Jahr abnehmen zu können. Das über die Spitzenlastdeckung besonders im Band III/1 Gesagte findet hier seine wirtschaftliche Begründung.

Umgekehrt wird das Verhältnis, wenn eine stark schwankende Laufwasserkraftanlage einen Teil der Leistung zu decken hat. Dann kann zur Zeit der Verrechnungshöchstlast des Jahres die Leistung des Wasserkraftwerkes gerade besonders gering sein und dadurch die Jahresbenutzungszeit der Höchstlast des zu liefernden Werkes wesentlich geringer, der Jahresdurchschnittspreis der kWh also wesentlich höher ausfallen.

Das gleiche gilt auch für den Einsatz eigener Maschinen des Abnehmers, wenn bei diesem nicht vollständige Aushilfe jederzeit einsatzbereit zur Verfügung steht.

Da die notwendige Leistung beim Abnehmer in den meisten Fällen über Tage und Monate fortgesetzt schwankt, wird für die Jahresberechnung der gelieferten Leistung zumeist nicht die nur einmal während kurzer Zeit aufgetretene Höchstleistung, sondern ein Mittelwert aus den zwei bzw. drei höchsten Leistungen des Jahres oder von zwei bzw. drei Wintermonaten zugrunde gelegt. An sich ist dieses aber vom Lieferwerk bei der Feststellung des Jahres-Leistungspreises für das bereitgestellte oder gelieferte kW zu berücksichtigen, weil die Maschinenanlagen des Lieferers mit allen ihren Einrichtungen für die verlangten Höchstleistungen unter entsprechender Bewertung der Überlastbarkeit bemessen sein müssen. Für die Preisbildung ist dabei aber auch auf die zeitliche Abweichung der Höchstlasten aller Abnehmer eines größeren Versorgungsgebietes Rücksicht zu nehmen, da die Summe aller Höchstlasten nicht zu gleichen Zeiten auftreten wird (Überlappen der Leistungswerte).

Im folgenden Muster eines Stromversorgungsvertrages sind verschiedene Leistungs-Abrechnungsformen gekennzeichnet. Aus den Angaben über die Messung der Verrechnungsleistung im 20. Kap. geht hervor, daß auch die tägliche Dauer der Höchstleistungsabnahme für die Abrechnung herangezogen wird. Diese Dauer wird entweder zu einer Viertel- oder einer halben Stunde festgesetzt.

Zum Arbeitspreis ist Wesentliches nicht zu sagen. Man macht bei Feststellung der innerhalb eines 24stündigen Tages abgenommenen Arbeitsmenge den bereits gekennzeichneten Unterschied des Tages- und des Nachtbezuges, wobei für letzteren ein gewisser Nachlaß eingeräumt wird, um einen Anreiz für verstärkten Nachtstrombezug zu bieten.

Besonders zu beachten ist ferner bei Wärmekraftwerken der Energieträger und der für diesen zu zahlende Preis, der Schwankungen unterworfen sein kann, die berücksichtigt werden müssen. Auch die Änderung der Lohnverhältnisse ist nicht zu vergessen, da sie den Arbeitspreis nicht unerheblich beeinflussen können. Solche Preisänderungen werden

in vertraglichen Bestimmungen für die entsprechende Änderung des Arbeitspreises festgelegt, wobei mit ähnlicher Aufgabe auch gewisse Wirtschaftsklauseln allgemeinerer Art vereinbart werden müssen, die dem Lieferer und auch dem Abnehmer Rechte einräumen.

Aus dem Mustervertrag und den zugehörigen Bedingungen sind weitere Einzelheiten zu ersehen, die von beiden Seiten zu berücksichtigen sind. Zu den einfachen Aufgaben der Wirtschaftsführung eines Elektrizitätsunternehmens gehört der Abschluß eines Stromversorgungsvertrages nicht. Nur reiche Erfahrungen geben die Möglichkeit, ein Vertragswerk zustande zu bringen, das auf viele Jahre hinaus ein gutes Verhältnis zwischen Lieferer und Abnehmer gewährleistet. Der Mustervertrag schafft Klarheit in vielfacher Hinsicht und sollte daher die Grundlage bilden, von der wesentlich abzuweichen nicht ratsam ist. Auf Sonderverhältnisse allerdings nimmt der Mustervertrag nicht Rücksicht, da sie in allen Fällen ganz verschieden gelagert zu sein pflegen.

Zu vermeiden ist, was alte Erfahrung bestätigt, eine irgendwie geartete Meistbegünstigungsklausel, die vom Abnehmer verlangt wird, zuzugestehen. Sie bildet stets schon nach kurzer Vertragszeit Grund zu Meinungsverschiedenheiten und kann das Lieferwerk in seiner unbedingt uneingeschränkt zu haltenden Bewegungsfreiheit bei allen anderen Stromversorgungsverhandlungen u. U. außerordentlich stark beeinträchtigen.

Zu den rein kaufmännischen Bestimmungen über Zahlungsleistungen usw., sowie zu den rechtlichen Bestimmungen ist Besonderes nicht zu sagen.

Wesentlich anders geartet sind Betriebsverträge zwischen mehreren im Verbundbetrieb zusammenschließenden Werken gleicher oder verschiedener Energieträger. Diese haben sich in der Hauptsache auf die Betriebsführung der einzelnen Werke, den Maschineneinsatz, die Fahrplanregelung und die Messungen, sowie den Anteil an der Stromabgabe zu erstrecken. Sie hier ebenfalls zu behandeln ist nicht mehr der Raum verfügbar, zumal sie auch stets auf Sonderfälle beschränkt sein werden.

Muster für einen Großabnehmervertrag¹.

Zwischen dem Elektrizitätswerk
(in der Folge „EW“ genannt)

und

..... in
(in der Folge „der Abnehmer“ genannt)

ist folgender

Vertrag

abgeschlossen worden.

Punkt 1.

1. Das EW stellt für den Abnehmer eine Leistung bis zu kW² bereit. Die Stromart ist strom mit einer Nennspannung von Volt

¹ Mustervertrag, aufgestellt von der Wirtschaftsgruppe Elektrizitätsversorgung (WEV).

² Wird die Leistung statt in kW in kVA berechnet, so ist überall statt kW dann kVA zu setzen und die cos-φ-Klausel in Punkt 4 Abs. 3 zu streichen.

und einer Frequenz von etwa Hertz. Die mittlere Spannung, die sich als Monatsmittelwert der vorkommenden Spannungsschwankungen ergibt, darf um \pm vH von der Nennspannung abweichen. Dabei dürfen die einzelnen Spannungsschwankungen nicht mehr als \pm vH über oder unter dem Wert der mittleren Spannung liegen.

2. Die Versorgung mit elektrischer Arbeit erfolgt für die Anlage des Abnehmers in (Angabe des Ortes).

Punkt 2.

Der Abnehmer hat das Recht, eine Erhöhung der nach Punkt 1 bereitzustellenden Leistung bis zu kW zu verlangen, die innerhalb von ... frostfreien Monaten nach der Anforderung durchgeführt sein muß. In diesem Fall erhöht sich die nach Punkt 4 Abs. 7 mindestens zu bezahlende kW-Zahl im gleichen Verhältnis. In den letzten Vertragsjahren kann das Recht auf Erhöhung nicht mehr ausgeübt werden.

Punkt 3.

1. Die Anschlußanlage des EW endigt z. B. hinter den Abspannketten (bei Freileitungen) dem Kabelendverschluß (bei Kabelzuführung) auf dem Grundstück des Abnehmers (möglichst genaue Bezeichnung etwa nach Kataster oder Grundbuch).

2. Die Meßeinrichtungen werden auf der V-Seite (z. B. in der Anlage des Abnehmers zwischen Leistungsschalter und Umspanner) eingebaut.

3. Der vom Abnehmer zu zahlende Baukostenbeitrag beträgt RM. Wird die bereitzustellende Leistung nach Punkt 2 erhöht und werden hierfür Änderungen der Anschlußanlage vorgenommen, so ist ein entsprechender weiterer Baukostenbeitrag zu zahlen, dessen Höhe bei Nichteinigung das Schiedsgericht festsetzt.

Punkt 4.

1. Die Vergütung setzt sich zusammen:

- I. aus einem Leistungspreis für die Bereitstellung der Leistung,
- II. aus einem Arbeitspreis für die gebrauchte elektrische Arbeit.

2.

Form 1.

Der Leistungspreis beträgt jährlich RM für jedes kW der innerhalb des Verrechnungsjahres aufgetretenen Höchstleistung. Als solche gilt die für die Dauer einer Viertelstunde gemessene höchste Leistung. Hierauf sind monatliche Vorauszahlungen zu leisten, so daß am Ende jedes Monats für das laufende Verrechnungsjahr ein Gesamtbetrag fällig ist, der sich wie folgt berechnet: RM (Jahrespreis für ein kW) dividiert durch 12, multipliziert mit der Zahl der im Verrechnungsjahr verstrichenen Monate und ferner multipliziert mit der größeren der beiden folgenden Zahlen:

a) der im laufenden Verrechnungsjahr bis einschließlich des abzurechnenden Monats aufgetretenen Höchstleistung;

Form 2.

Der Leistungspreis beträgt RM für jedes kW der Jahreshöchstleistung. Als Jahreshöchstleistung gilt das Mittel aus den drei größten Monatshöchstleistungen des Abrechnungsjahres. Als Monatshöchstleistung gilt die höchste Viertelstundenleistung des Kalendermonats.

Bei der Monatsabrechnung ist vorläufig ein Zwölftel des jährlichen Leistungspreises für die Monatshöchstleistung zu bezahlen. Der Unterschiedsbetrag zwischen der Summe der Monatszahlungen und dem endgültigen Jahresleistungspreis ist am Jahreschluß nachzuberechnen. Das EW kann den Unterschiedsbetrag auch schon im Laufe des Abrechnungsjahres berechnen.

b) der nach Abs. 7 mindestens zu bezahlenden kW-Zahl.

$$\frac{\text{Jahrespreis für 1 kW} \times \text{Zahl der verstrichenen Monate} \times \text{Höchstleistung oder} \dots \text{ kW (Abs. 7)}}{12}$$

12

Auf den so errechneten Gesamtbetrag werden die im laufenden Verrechnungsjahr bereits geleisteten Vorauszahlungen angerechnet. Der Rest ist nach VII, 5 der Bedingungen zu zahlen.

Form 3.

Der Leistungspreis beträgt monatlich RM für jedes kW der innerhalb des abzurechnenden Monats für die Dauer einer Viertelstunde gemessenen Höchstleistung und ist am Ende jedes Monats zu zahlen. Erreicht die Monatshöchstleistung nicht die in Abs. 7 festgesetzte kW-Zahl, so ist die Monatszahlung nach dieser zu berechnen.

3. Der Arbeitspreis beträgt R/Pf für jede Kilowattstunde (kWh). Für die Abnahme in den Nachtstunden von bis Uhr wird ein Nachlaß von ... vH auf den Arbeitspreis eingeräumt.

4.

Form 1.

Der Leistungsfaktor der Anlage des Abnehmers soll den Wert von $\cos \varphi = 0,8$ nacheilend nicht unterschreiten. Andernfalls wird der über 75 vH des Wirkverbrauches hinausgehende Blindverbrauch, der durch einen besonderen Zähler gemessen wird, mit R/Pf für jede Blindkilowattstunde in Ansatz gebracht.

Form 3.

Vorausgesetzt ist ein Leistungsfaktor von 0,8. Der Leistungspreis erniedrigt sich für je 1/100, um das der mittlere Leistungsfaktor höher ist als 0,8, um 1 vH. Er erhöht sich für je 1/100, um das der Leistungsfaktor niedriger ist als 0,8, um 2 vH und für je 1/100 unter 0,7, um 4 vH.

5.

Form 1.

Kohlen- und Lohnklausel.

Der in Abs. 4 genannte Arbeitspreis gilt nur so lange, wie der Preis für 1 t (genaue Bezeichnung der Kohlensorte) RM und der Stundenlohn (genaue Bezeichnung des maßgebenden Lohnes) RM/Stunde betragen. Ändern sich beide oder einer der vorgenannten Sätze, so ändert sich der Arbeitspreis zu $\frac{1}{2}$ im Verhältnis der Kohlenpreise und zu $\frac{1}{2}$ im Verhältnis der Stundenlöhne, während das dritte Drittel fest bleibt.

Form 2.

Dem Abnehmer werden für jede Blindkilowattstunde 10 vH des aus dem Leistungspreis und dem Arbeitspreis sich ergebenden durchschnittlichen kWh-Preises berechnet.

Form 4.

Übersteigt die Anzahl der verbrauchten Blind-kWh 75 vH der Anzahl der Wirk-kWh, so wird ein Zuschlag erhoben gleich dem Produkt aus der Anzahl der überschüssigen Blind-kWh und 12 vH des aus dem Leistungspreis und dem Arbeitspreis sich ergebenden durchschnittlichen kWh-Preises. Bleibt der Blindstromverbrauch unter 60 vH des Wirk-kWh-Verbrauches, so wird ein Abschlag gewährt gleich dem Produkt aus der an 60 vH fehlenden Anzahl von Blind-kWh und 6 vH des obigen durchschnittlichen kWh-Preises.

Form 2.

Kohlenklausel.

Der in Abs. 4 genannte Arbeitspreis versteht sich bei einem Preis von RM für 1 t (genaue Bezeichnung der Kohlensorte). Für jeden vollen Betrag von 50 Pf., um den sich dieser Kohlenpreis nach oben oder unten ändert, erhöht oder verringert sich der Arbeitspreis je kWh um 0, ... Pf. Als Kohlenpreis gilt der amtlich veröffentlichte Richtpreis des-Syndikats¹. Tritt eine solche Änderung der Berechnungsgrundlagen

¹ s. Fußnote 1 S. 590.

Als Kohlenpreis gilt der amtlich veröffentlichte Richtpreis des Syndikats¹. Tritt eine solche Änderung der Berechnungsgrundlagen ein, daß die Ausführung der Klausel unmöglich wird (z. B. infolge Fortfalls der Kohlensorte) oder zu einem unbilligen Ergebnis führt, so ist die Klausel entsprechend zu ändern, notfalls durch Spruch des Schiedsgerichts (siehe Sondervereinbarung).

ein, daß die Ausführung der Klausel unmöglich wird (z. B. infolge Fortfalls der Kohlensorte), oder zu einem unbilligen Ergebnis führt, so ist die Klausel entsprechend zu ändern, notfalls durch Spruch des Schiedsgerichts (siehe Sondervereinbarung).

Form 3.

Kohlenklausel.

Der in Abs. 3 genannte Arbeitspreis gilt so lange, wie der maßgebende Kohlenpreis für 1 t zwischen RM und RM liegt. Maßgebend ist der Kohlenpreis, den das Syndikat für Kohle des Kohlenreviers veröffentlicht. Für jede volle 10 R Pf, um die der maßgebende Kohlenpreis über RM liegt oder unter RM sinkt, erhöht oder ermäßigt sich der Arbeitspreis um 0, . . . R Pf/kWh. Tritt eine solche Änderung der Berechnungsgrundlagen ein, daß die Ausführung der Klausel unmöglich wird (z. B. infolge Fortfalls der Kohlensorte) oder zu einem unbilligen Ergebnis führt, so ist die Klausel entsprechend zu ändern, notfalls durch Spruch des Schiedsgerichts (siehe Sondervereinbarung).

6. Eine nach Abs. 5 eintretende Preisänderung wird erst für den folgenden Monat berücksichtigt.

7. Der Leistungspreis ist mindestens für kW zu bezahlen, auch wenn nur eine geringere Höchstleistung in Anspruch genommen worden ist².

Punkt 5.

Das Verrechnungsjahr läuft vom bis zum

Punkt 6.

Dieser Vertrag kann mit einer Frist von Monaten für das Ende jedes Verrechnungsjahres gekündigt werden, erstmalig zum 19 . . .

Punkt 7.

Im übrigen gelten die beigefügten „Bedingungen für die Versorgung von Großabnehmern“, die einen wesentlichen Bestandteil des Vertrages bilden.

Bedingungen für die Versorgung von Großabnehmern.

I.

Bereitstellungs- und Versorgungspflicht des EW.

Das EW stellt dem Abnehmer elektrische Leistung im vereinbarten Umfang an der Übergabestelle für die Dauer dieses Vertrages bereit und gewährt ihm dauernd die Möglichkeit, elektrische Arbeit im Rahmen dieser Leistung zu gebrauchen.

II.

Verpflichtungen des Abnehmers.

1. Der Abnehmer verpflichtet sich, für die Dauer des Vertrages im Rahmen der nach Punkt 1 bereitzustellenden Leistung elektrische Arbeit des EW zu gebrauchen.

¹ Wenn gewünscht, sind hier noch Zuschläge für Fracht, Entladekosten usw. zu erwähnen.

² Wenn eine Mindestgewährleistung auch hinsichtlich des Arbeitspreises gewünscht wird, empfiehlt es sich, die für die Leistung und den Arbeitspreis zu zahlenden Mindestbeträge zusammenzuzählen und dem Abs. 7 folgenden Satz zuzufügen: „Insgesamt hat der Abnehmer in jedem Rechnungsjahr mindestens RM zu zahlen.“

2. Der Abnehmer wird für seinen Betrieb erforderliche elektrische und mechanische Arbeit während der Dauer des Vertrages weder selbst erzeugen noch von dritter Seite beziehen, soweit die nach Punkt 1 bereitzustellende Leistung ausreicht oder das EW zu einer Erhöhung bereit ist. Andernfalls steht dem EW ein Anspruch mindestens in Höhe desjenigen Betrages zu, der für die anderweitig bezogene oder erzeugte elektrische oder mechanische Arbeit nach dem Vertrag an das EW zu zahlen gewesen wäre.

3. Der Abnehmer gestattet, falls er zugleich Grundstückseigentümer ist, die Zu- und Fortleitung elektrischer Kraft über seine Grundstücke, sowie die Anbringung von Leitungen, Leitungsträgern und Zubehör für die Zwecke örtlicher Versorgung, räumt dem EW auf Wunsch die zur Sicherung dieser Anlagen erforderlichen Dienstbarkeiten ein, und sagt zu, an den vom EW erstellten Einrichtungen kein Eigentumsrecht geltend zu machen, sie nach Wahl des EW nach Aufhören des Strombezuges noch . . . Jahre zu belassen oder ihre Entfernung zu gestatten, und diese sämtlichen Verpflichtungen auf seinen Rechtsnachfolger zu übertragen. Dies gilt auch für Einrichtungen des EW, die in der Anlage des Abnehmers untergebracht werden, soweit der Betrieb und die Anlage des Abnehmers es gestatten. Ist der Antragsteller nicht zugleich Grundstückseigentümer, so ist dessen schriftliche Zustimmung zur Herstellung der Anschlußanlage und schriftliche Anerkennung der in diesem Absatz enthaltenen Bedingungen bei Antragstellung erforderlich.

III.

Anschlußanlage des EW und Übergabestelle.

1. Das EW errichtet und unterhält auf seine Kosten die Anschlußanlage (Leitung mit Zubehör, mit Ausnahme der Meßeinrichtungen, für die besondere Bestimmungen gelten) von seinem Netz bis zu dem im Vertrag festgelegten Endpunkt. Der Abnehmer zahlt, bevor das EW die Errichtung der Anschlußanlage in Angriff nimmt, einen verlorenen Baukostenbeitrag, dessen Höhe im Vertrag festgesetzt ist.

2. Als Übergabestelle gilt der Endpunkt der Anschlußanlage des EW.

3. Die vom EW für den Anschluß des Abnehmers benutzten Gegenstände werden nur für die Dauer des Vertrages eingebaut und bleiben im Eigentum des EW.

IV.

Anlage des Abnehmers.

1. Die ordnungsmäßige Beschaffung und Unterhaltung der elektrischen Einrichtungen vom Ende der Anschlußanlage (III, 1) ab mit Ausnahme der dem EW gehörenden Meßeinrichtungen liegt dem Abnehmer ob.

2. Für Ausführung und Unterhaltung der Anlage sind die Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE) und die besonderen Vorschriften des EW maßgebend. Es dürfen nur Baustoffe und Geräte Verwendung finden, die den Sicherheitsvorschriften des VDE entsprechen. Das VDE-Zeichen auf einem Gegenstand bekundet, daß diese Gerätebauform auf ihre Vorschriftsmäßigkeit und Ungefährlichkeit von der Prüfstelle des VDE geprüft ist.

3. Die Verbindung der Anlage des Abnehmers mit dem Leitungsnetz und ihre Inbetriebsetzung erfolgt ausschließlich durch Beauftragte des EW. Das EW kann die Anlage vor Inbetriebsetzung prüfen.

4. Die Anlage des Abnehmers ist mit Rücksicht auf die öffentliche Elektrizitätsversorgung so zu betreiben, daß Störungen in der Versorgung anderer Abnehmer oder des EW ausgeschlossen sind. Allen Anforderungen des EW, die sich hierauf beziehen, ist unverzüglich zu entsprechen; insbesondere kann das EW Schutzvorkehrungen gegen störende Beeinflussung seines Netzes (z. B. durch unzulässig hohe Stromstöße) und gegen Kurzschlußströme verlangen.

5. Das EW muß sich aus Betriebsgründen vorbehalten, die Anlage des Abnehmers jederzeit nachzuprüfen und die Abstellung etwaiger Mängel zu verlangen. Der Abnehmer gestattet deshalb dem mit einem Ausweis versehenen Beauftragten des EW den Zutritt zu den betreffenden Räumlichkeiten. Für Grundstücke, Gebäude und Räume, die Anschluß- oder Meßeinrichtungen enthalten, steht dem EW

je ein Schlüssel und seinen Beauftragten die uneingeschränkte Befugnis des Zutritts zu jeder Zeit zu.

6. Werden bei einer Prüfung wesentliche Mängel festgestellt, so kann das EW bis zu deren Beseitigung den Anschluß oder die Versorgung der Anlage mit elektrischer Arbeit verweigern.

7. Durch Vornahme oder Unterlassung der Prüfung der Anlage und ihrer Planung, sowie durch ihren Anschluß an das Leitungsnetz und die Versorgung mit elektrischer Arbeit übernimmt das EW keinerlei Haftung.

8. Ist der Abnehmer an das Niederspannungsnetz des EW angeschlossen, so gilt ferner folgendes:

a) Der Abnehmer ist berechtigt, Ausführung und Unterhaltung seiner Anlage außer durch das EW durch jeden hierfür vom EW zugelassenen Unternehmer vornehmen zu lassen oder sie selbst zu übernehmen, falls er das Vorhandensein eines geeigneten Fachmannes als verantwortlichen Leiters der Arbeiten dartut; hierfür genügt es, wenn der Fachmann den „Grundsätzen für die Zulassung von Elektro-Installateuren zur Ausführung von Anschlußanlagen an Elektrizitätswerken“ entspricht. Die Planung der Anlage ist vor Vergebung des Auftrages oder bei Selbstaussführung vor Inangriffnahme vom EW zu genehmigen.

b) Das EW kann die Ausführung der Anlagen überwachen.

c) Für Erweiterungen und Abänderungen bestehender Anlagen ist Einvernehmen mit dem EW erforderlich.

V.

Messung.

1. Die beanspruchte Leistung und die gebrauchte elektrische Arbeit werden mit den durch die vereinbarte Berechnungsweise bedingten Meßeinrichtungen festgestellt. Das EW ist berechtigt, jederzeit Ablesungen vorzunehmen. Der Abnehmer ist vor jeder Ablesung zu benachrichtigen; er hat das Recht, einen Vertreter daran teilnehmen zu lassen.

2. Die erforderlichen Meßeinrichtungen, die dem EW gehören, werden von ihm unterhalten und sind Zubehör der Anlage des EW. Der Einbau der Meßeinrichtungen erfolgt auf Kosten des Abnehmers. Der Abnehmer ist berechtigt, auf seine Kosten einen Satz eigener Meßeinrichtungen einzubauen.

3. Jeder Vertragsteil kann jederzeit eine amtliche Nachprüfung der Meßeinrichtungen fordern. Ergibt die Prüfung keine über die gesetzlichen Fehlergrenzen hinausgehende Abweichung, so hat der Antragsteller, im anderen Falle der Eigentümer der Meßeinrichtung die Kosten der Prüfung zu tragen.

4. Sind zwei Meßeinrichtungen vorhanden, so sollen die entsprechenden Angaben um nicht mehr als 5 vH — bezogen auf den kleineren Wert — voneinander abweichen. Bei größeren Abweichungen sind die Einrichtungen nachzuprüfen und instandzusetzen, und zwar zuerst die Einrichtung mit dem mutmaßlich größeren Fehler.

VI.

Beschränkung in der Verwendung elektrischer Arbeit.

1. Die elektrische Arbeit wird nur für die eigenen Zwecke des Abnehmers zur Verfügung gestellt; Weiterlieferung an Dritte bedarf vorheriger schriftlicher Zustimmung des EW.

2. Die elektrische Arbeit darf im Umfang der nach I bereitzustellenden Leistung für alle Zwecke entnommen werden, soweit nicht besondere Beschränkungen vereinbart sind.

3. Wird elektrische Arbeit im Gegensatz zu bestehenden Abmachungen oder besonderen Bestimmungen oder unter Umgehung, Beeinflussung oder vor Anbringung der Meßeinrichtungen entnommen, so steht dem EW ein Anspruch in Höhe des Betrages zu, der sich unter Zugrundelegung einer täglich stündigen Benutzung der nach I bereitzustellenden Leistung während der Dauer der unberechtigten Stromentnahme ergibt. Ist die Dauer der Stromentnahme nicht festzustellen,

so wird der Betrag nach vorstehenden Grundsätzen für $\frac{\text{Monate}}{\text{ein Jahr}}$ erhoben.

VII.

Verrechnung und Bezahlung.

1. Die Verrechnung wird auf Grund der Angaben der Meßeinrichtungen nach dem Vertrag vorgenommen. Im allgemeinen erfolgt sie monatlich, doch bleibt es vorbehalten, auch in kürzeren oder längeren Zeiträumen abzurechnen. Sind zwei gleichwertige Meßeinrichtungen vorhanden, so wird der Abrechnung das arithmetische Mittel der Ablesungen zugrunde gelegt.

2. Treten bei zwei gleichwertigen Meßeinrichtungen größere Abweichungen auf, als sie nach V Abs. 4 zulässig sind, so sind für den noch nicht abgerechneten Zeitraum die Angaben der Einrichtung mit dem kleineren Fehler zu verwenden, solange dieser noch innerhalb der gesetzlichen Fehlergrenze liegt. Wird für eine Meßeinrichtung nachgewiesen, daß ihre Fehler nicht mehr innerhalb der gesetzlichen Fehlergrenzen liegen, so sind die Angaben der anderen entsprechenden Einrichtung für die Verrechnung des noch nicht abgerechneten Zeitraumes zu benutzen. Zeigen beide Meßeinrichtungen Fehler außerhalb der gesetzlichen Fehlergrenzen, oder sind beide Meßeinrichtungen außer Betrieb, oder ist nur eine Meßeinrichtung vorhanden, deren Fehler außerhalb der gesetzlichen Fehlergrenze liegt, so wird der Verbrauch des letzten, noch nicht abgerechneten Zeitraumes von EW nach billigem Ermessen geschätzt.

3. Ansprüche wegen unrichtiger Rechnungen können von beiden Seiten nur für das laufende und das vorangegangene Verrechnungsjahr gestellt werden.

4. Das EW ist verpflichtet, dem Abnehmer in den Stromrechnungen die zugrunde gelegten Angaben der Meßeinrichtungen und die Preisgrundlagen mitzuteilen.

5. Die Stromrechnungen sind innerhalb sieben Tagen nach Eingang ohne Abzug bar zu bezahlen. Fehler in den Stromrechnungen werden gemäß VII, 3 nach ihrer Klarstellung mit der nächstfolgenden Rechnung ausgeglichen.

6. Einwände gegen die Richtigkeit der Rechnungen sind nur innerhalb von 14 Tagen nach Zustellung der Rechnung zulässig; sie berechtigen nicht zu Zahlungsaufschub oder -verweigerung; Aufrechnung ist ausgeschlossen.

7. Der Abnehmer wird auf Verlangen jederzeit eine Vorauszahlung in Höhe des höchsten monatlichen Rechnungsbetrages oder eine Sicherheit, die aber nur in angemessener Höhe gefordert werden kann, nach seiner Wahl in bar, in mündelsicheren Wertpapieren oder durch Akzept einer sicheren Bank leisten. Nach einmaliger Mahnung kann sich das EW aus der Sicherheit bezahlt machen. Kursverluste beim Verkauf von Wertpapieren gehen zu Lasten des Abnehmers; Barsicherheiten werden zum Reichsbankdiskontsatz verzinst. Die Sicherheit ist stets auf der ursprünglichen Höhe zu halten. Nach Ablauf des Vertrages erhält der Abnehmer die Sicherheit oder die Vorauszahlung zurück, wenn er sämtliche Verpflichtungen erfüllt hat.

VIII.

Änderung der Wirtschaftsverhältnisse.

1. Sollten nach Vertragsabschluß erlassene Gesetze oder sonstige Regierungs- und Verwaltungsmaßnahmen die Wirkung haben, daß die Erzeugung, der Bezug, die Fortleitung oder die Verteilung von Elektrizität unmittelbar oder mittelbar versteuert wird, so erhöhen sich die Strompreise entsprechend und von dem Zeitpunkt ab, an dem die Verteuerung in Kraft tritt.

2. Ändern sich die allgemeinen wirtschaftlichen Verhältnisse gegenüber dem Zeitpunkt des Vertragsabschlusses so erheblich, daß die vereinbarten Preise oder Bedingungen für das EW oder den Abnehmer nicht mehr zumutbar sind, so bleiben Vereinbarungen über eine Änderung der vereinbarten Preise oder Bedingungen vorbehalten; gelingt eine Einigung nicht, so entscheidet das Schiedsgericht (siehe Sondervereinbarung).

IX.

Unterbrechung der Versorgung.

1. Sollte das EW durch Fälle höherer Gewalt oder durch sonstige Umstände, die es mit zumutbaren Mitteln nicht abwenden kann, an der Erzeugung, dem Be-

zug oder der Fortleitung elektrischer Arbeit ganz oder teilweise verhindert sein, so ruht die Verpflichtung des EW, bis die Hindernisse oder Störungen und deren Folgen beseitigt sind. Das EW darf die Versorgung mit elektrischer Arbeit ferner zur Vornahme betriebsnotwendiger Arbeiten vorübergehend unterbrechen; es hat sich jedoch mit dem Abnehmer vorher über den Zeitpunkt zu verständigen, es sei denn, daß Gefahr in Verzug ist.

2. Das EW wird bemüht sein, jede Unterbrechung und Unregelmäßigkeit möglichst bald zu beheben; Nachlässe und Schadenersatz können in keinem Fall (auch nicht bei Abweichung von der festgelegten Spannung) beansprucht werden.

3. Das EW kann die Stromlieferung fristlos einstellen und die Zuführung zur Anlage des Abnehmers auf dessen Kosten und Gefahr ganz oder teilweise unterbrechen, wenn der Abnehmer den Vortragsbestimmungen zuwiderhandelt. Als Zuwiderhandlung gelten insbesondere:

- a) Zutrittsverweigerung gegenüber den mit Ausweis versehenen Angestellten des EW;
- b) Eigenmächtige Änderung an den bestehenden Einrichtungen entgegen dem Vertrag;
- c) Beschädigung der dem EW gehörenden Einrichtungen, z. B. Verletzung der Plomben;
- d) Nichtausführung einer vom EW geforderten Installationsänderung;
- e) Unbefugte Stromentnahme oder -verwendung;
- f) Nichtzahlung fälliger Rechnungen trotz Mahnung;
- g) Verweigerung geforderter Sicherheitsleistungen;
- h) Störende Einwirkung der Anlage des Abnehmers auf die Anlagen anderer Abnehmer oder des EW.

4. Bei wiederholter Vertragsverletzung und ferner bei jeder unbefugten Stromentnahme oder -verwendung ist das EW zur fristlosen Kündigung des Vertrages berechtigt, die schriftlich ausgesprochen werden muß.

5. Die Wiederaufnahme der vom EW gemäß Abs. 3 unterbrochenen Stromlieferung erfolgt nur nach völliger Beseitigung der Hindernisse und nach Erstattung der Unkosten des EW. In jedem Fall einer vom EW veranlaßten Unterbrechung der Zuführung ist allein das EW berechtigt, die Verbindung mit dem Netz wiederherzustellen und damit die Anlage wieder zur ordnungsmäßigen Entnahme elektrischer Arbeit aus dem Netz in stand zu setzen.

X.

Übertragung des Vertrages.

Falls das EW seine Erzeugungs- oder Übertragungsanlagen, oder der Abnehmer den Betrieb, auf den sich dieser Vertrag bezieht, ganz oder teilweise veräußert, oder Dritten überläßt, oder falls einer der Vertragsteile mit einer anderen Rechtsperson vereinigt wird oder ihr Vermögen auf einen anderen überträgt, ist der betreffende Vertragsteil verpflichtet, den Nachfolger in die Rechte und Pflichten dieses Vertrages eintreten zu lassen; er selbst wird von seinen Verpflichtungen aus diesem Vertrag nur befreit, wenn der Nachfolger den Eintritt in diesen Vertrag schriftlich erklärt und der andere Vertragsteil dies annimmt. Die Genehmigung darf nicht versagt werden, wenn gegen die technische und finanzielle Leistungsfähigkeit des Nachfolgers keine begründeten Bedenken bestehen.

XI.

Gerichtsstand.

Gegenstand für Streitigkeiten im Zusammenhang mit diesem Vertrag ist
..... (Ort).

XII.

Kosten.

Die Kosten des Vertrages, insbesondere etwaige Stempelkosten, tragen die Parteien je zur Hälfte.

Schiedsvertrag.

Zwischen dem (Elektrizitätswerk) (in der Folge „EW“ genannt) und in
in der Folge „der Abnehmer“ genannt)

ist folgender Schiedsvertrag abgeschlossen worden.

Über alle Streitigkeiten zwischen den Vertragsteilen im Zusammenhang mit dem Elektrizitätsversorgungsvertrag vom, insbesondere über Änderungen von Klauseln gemäß Punkt 4 Abs. 5 des Vertrages und von Preisen oder Bedingungen nach Ziff. VIII der „Bedingungen für die Versorgung von Großabnehmern“ soll ein Schiedsgericht unter Ausschließung des Rechtsweges entscheiden, das nach den Vorschriften der Zivilprozeßordnung zu berufen ist und zu verfahren hat.

Jede Partei ernennt einen Schiedsrichter. Wird der zweite Schiedsrichter der betreibenden Partei nicht innerhalb 14 Tagen nach Aufforderung benannt, so kann diese seine Ernennung bei dem zuständigen Landgerichtspräsidenten beantragen.

Die Schiedsrichter (oder die Parteien) wählen einen Obmann. Wird er nicht binnen 14 Tagen, nachdem die Benennung des zweiten Schiedsrichters der betreibenden Partei zugegangen ist, den Parteien benannt, so kann die betreibende Partei seine Ernennung bei dem zuständigen Landgerichtspräsidenten beantragen.

(Gegen die Entscheidung des Schiedsgerichts ist, wenn der Streitwert mehr als 5000,— Mk. beträgt, die Berufung an ein Oberschiedsgericht zulässig, für das die Bestimmungen über das Schiedsgericht mit der Maßgabe gelten, daß jede Partei zwei Schiedsrichter zu benennen hat¹.)

¹ Anm.: Im allgemeinen ist in der Schiedsgerichtsbarkeit eine zweite Instanz nicht üblich und empfehlenswert. Falls sie ausnahmsweise gewünscht wird, kann die obige Fassung gewählt werden.

VDE-Bestimmungen (Vorschriften, Regeln und Leitsätze), die für den Band III/2 besonders beachtlich sind.

Gruppe 1.

VDE	Starkstromanlagen.
0100/X. 38.	Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V.
0101/XII. 37.	Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber.
0105/1936	Vorschriften nebst Ausführungsregeln für den Betrieb von Starkstromanlagen.
0111/1932	Leitsätze für den elektrischen Sicherheitsgrad von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber.
0140/1932	Leitsätze für Schutzmaßnahmen in Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V.
0141/1924	Leitsätze für Schutzerdungen in Hochspannungsanlagen.
0145/1933	Leitsätze für den Schutz elektrischer Anlagen gegen Überspannungen.

596 VDE-Bestimmungen (Vorschriften, Regeln und Leitsätze).

- 0151/1923 Leitsätze betr. Anfreßungsgefährdung des blanken Nulleiters von Gleichstrom-Dreileiteranlagen.
0175/1933 Spannungsnormen für elektrische Anlagen von 1 bis 100 V.
0176/1932 Spannungsnormen für Starkstromanlagen über 100 V.

Gruppe 4.

Messung und Prüfung.

- 0410/X. 38. Regeln für Meßgeräte.
0414/1932 Regeln für Wandler.
0418/1932 Regeln für Elektrizitätszähler.
0442/1933 Leitsätze für die Ausführung von Hochspannungsprüfungen mit Wechselspannungen.
0450/1933 Leitsätze für die Prüfung mit Spannungsstößen.

Gruppe 5.

Maschinen, Transformatoren, Umformer.

- 0522/1914 Vorschriften für die Prüfung von Eisenblech.
0530/XII. 37. Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen.
0532/XII. 37. Regeln für die Bewertung und Prüfung von Transformatoren.
0560/1932 Leitsätze für ruhende elektrische Kondensatoren in Starkstromanlagen.
0570/X. 38. Regeln für Klemmenbezeichnungen.

Gruppe 6.

Installationsmaterial, Schalt- und Hochspannungsgeräte.

- 0601/1912 Normen für die Abstufung von Stromstärken bei Apparaten.
0650/1933 Regeln für die Bewertung und Prüfung von Anlassern und Steuergeräten.
0660/1933 Regeln für die Konstruktion, Prüfung und Verwendung von Schaltgeräten bis 500 V Wechselspannung und 3000 V Gleichspannung.
0670/1937 Regeln für Wechselstrom-Hochspannungsgeräte.
0675/I. 38. Leitsätze für Überspannungsschutzgeräte in Starkstromanlagen.

Gruppe 8.

Fernmelde- und Rundfunkanlagen.

- 0800/XII. 37. Vorschriften und Regeln für die Errichtung elektrischer Fernmeldeanlagen.
0850/1922 Sicherheitsvorschriften für Hochfrequenztelephonie in Verbindung mit Hochspannungsanlagen.
0874/1938 Leitsätze für Maßnahmen an Maschinen und Geräten zur Verminderung von Rundfunkstörungen.

e		Seite
e	Erregerspannung in V	96
e_{Dr}	Blindspannungsabfall der Drosselspule in vH der Nennspannung	257
e_K	Kurzschlußspannung von Umspannern in vH der Nennspannung	206
$e_{k, sp}$	Kurzschlußspannung von Umspannern in Sparschaltung in vH der Nennspannung	261
e_s	Streuspannung (Blindspannungsabfall) von Umspannern in vH der Nennspannung	259
e_r	Wirksamspannungsabfall von Umspannern in vH der Nennspannung	259
f		
f	Frequenz in Per/s	75
f_{R_2}	Frequenz bei Resonanz in Per/s	430
f_e	Formfaktor	90
f_p	Pendelfrequenz in Per/s	198
f_I, f_{II}	Frequenzen der Kraftwerke I bzw. II in Per/s	198
Δf	Frequenzschwankung	223
G		
G	Gesamtgewicht von Maschinen in kg	119
G	Leitergewicht in g	298
$G \cdot D^2$	Schwungmoment in tm^2	193
G_i	Einheitsgewicht von Maschinen in kg/MVA	119
g		
g	Erdbeschleunigung in m/s^2	139
g	Leistungsgewicht für die Kurzschlußberechnung	272
$g = 9,81$	Umrechnungszahl	193
H		
H	Gesamtspannung der Luft in m LS bzw. mm WS	124/140
H_A	Luftspannung im Abluftkanal in mm WS	139
H_F	Luftspannung im Frischluftkanal in mm WS.	139
H_{F1}	Luftspannung im Filter bzw. mittlerer Gesamtfilterwiderstand in mm WS	139
H_K	zulässige Luftspannung in Frisch- und Abluftkanälen in mm WS	138
H_M	Luftspannung in Maschinen in mm WS	138
H_u	unterer Heizwert in kcal/kg	551
H_0	adiabatisches Wärmegefälle in kcal/kg	562
h		
h_E	Batterie-Entladezeit in h	37
h_L	Batterie-Ladezeit in h.	37
h_j	jährliche Benutzungszahl in h.	562
I		
I	äquatoriales Trägheitsmoment in cm^4	529
I	Belastungsstrom in A bzw. kA	9/65
I_A	Nennstrom von Auslösern in A	306
I_{AM}	Nennstrom von Überspannungsableitern in kA	403
I_B	gesamter Blindstrom (nacheilend + voreilend) in kA	76
I_C	Ladestrom in kA	74
I_{C_1}, I_{C_2}	Ladestrom auf der Ober- bzw. Unterspannungsseite in kA	75
I_{Dr}	Nennstrom von Drosselspulen in kA	257
I_E	Batterie-Entladestrom in A	37
$I_{E,C}$	Erdschlußstrom in kA	419
I_{Er}	Strom bezogen auf eine Ersatzspannung in kA	294
$I_{K, GI}$	Kurzschlußstrom auf der Gleichstromseite in A	250
$I_{K, St}$	Stoßkurzschlußstrom in kA	258
$I_{K, St1}, I_{K, St2}$	Stoßkurzschlußstrom im Leiter 1 bzw. 2 in kA	525

e		Seite
e	Erregerspannung in V.	96
e_{Dr}	Blindspannungsabfall der Drosselspule in vH der Nennspannung	257
e_k	Kurzschlußspannung von Umspannern in vH der Nennspannung	206
$e_{k, sp}$	Kurzschlußspannung von Umspannern in Sparschaltung in vH der Nennspannung	261
e_s	Streuspannung (Blindspannungsabfall) von Umspannern in vH der Nennspannung	259
e_r	Wirksamspannungsabfall von Umspannern in vH der Nennspannung	259
f		
f	Frequenz in Per/s	75
f_{R_2}	Frequenz bei Resonanz in Per/s	430
f_o	Formfaktor	90
f_p	Pendelfrequenz in Per/s	198
f_I, f_{II}	Frequenzen der Kraftwerke I bzw. II in Per/s	198
Δf	Frequenzschwankung	223
G		
G	Gesamtgewicht von Maschinen in kg	119
G	Leitergewicht in g	298
$G \cdot D^2$	Schwungmoment in tm^2	193
G_i	Einheitsgewicht von Maschinen in kg/MVA	119
g		
g	Erdbeschleunigung in m/s^2	139
g	Leistungsgewicht für die Kurzschlußberechnung	272
$g = 9,81$	Umrechnungszahl	193
H		
H	Gesamtpressung der Luft in m LS bzw. mm WS	124/140
H_A	Luftpressung im Abluftkanal in mm WS	139
H_F	Luftpressung im Frischluftkanal in mm WS.	139
H_{Fi}	Luftpressung im Filter bzw. mittlerer Gesamtfilterwiderstand in mm WS	139
H_K	zulässige Luftpressung in Frisch- und Abluftkanälen in mm WS	138
H_M	Luftpressung in Maschinen in mm WS	138
H_u	unterer Heizwert in kcal/kg	551
H_0	adiabatisches Wärmegefälle in kcal/kg	562
h		
h_E	Batterie-Entladezeit in h	37
h_L	Batterie-Ladezeit in h.	37
h_j	jährliche Benutzungszahl in h.	562
I		
I	äquatoriales Trägheitsmoment in cm^4	529
I	Belastungsstrom in A bzw. kA.	9/65
I_A	Nennstrom von Auslösern in A	306
I_{Ab}	Nennstrom von Überspannungsableitern in kA	403
I_B	gesamter Blindstrom (nacheilend + voreilend) in kA	76
I_C	Ladestrom in kA.	74
I_{C_1}, I_{C_2}	Ladestrom auf der Ober- bzw. Unterspannungsseite in kA	75
I_{Dr}	Nennstrom von Drosselspulen in kA	257
I_E	Batterie-Entladestrom in A	37
$I_{E,C}$	Erdschlußstrom in kA.	419
I_{Er}	Strom bezogen auf eine Ersatzspannung in kA	294
$I_{K,Gl}$	Kurzschlußstrom auf der Gleichstromseite in A	250
$I_{K,St}$	Stoßkurzschlußstrom in kA	258
$I_{K,St1}, I_{K,St2}$	Stoßkurzschlußstrom im Leiter 1 bzw. 2 in kA.	525

		Seite
$I_{K, stW}$	Stoßkurzschlußwechselstrom in kA	257
$I_{K, a}$	Kurzschlußabschaltstrom in kA	257
$I_{K, d}$	Dauerkurzschlußstrom in kA	73
I_{K, d_0}	Dauerkurzschlußstrom bei Leerlauferregung in kA	182
$I_{K, d_0, E}$	Dauerkurzschlußstrom des Ersatzstromerzeugers bei Leerlauferregung in kA	272
$I_{K, d_{02}}$	zweipoliger Dauerkurzschlußstrom bei Leerlauferregung in kA	271
$I_{K, d_{03}}$	dreipoliger Dauerkurzschlußstrom bei Leerlauferregung in kA	271
I_{K, d_2}	zweipoliger Dauerkurzschlußstrom bei Nennbetrieb in kA	270
I_{K, d_3}	dreipoliger Dauerkurzschlußstrom bei Nennbetrieb in kA	270
I_{K_2}	zweipoliger Kurzschlußstrom allgemein in kA	256
I_{K_3}	dreipoliger Kurzschlußstrom allgemein in kA	256
I_L	Batterie-Ladestrom in A	37
I_{Re}	Strom bei Resonanz in kA	86
I_W	Wirkstrom in kA	76
$I_{W\alpha_1}$	Nennstrom von Stromwandlern auf der Oberspannungsseite in A	307
I_Z	höchstzulässiger Sekundenstrom in $\frac{A \cdot \sqrt{s}}{mm^2}$	305
I_a	Ankerstrom in A	9
I_{av}	Ausgleichstrom in kA	198
I_b	induktiver Blindstrom in kA	76
I_m	arithmetischer Gleichstrom-Mittelwert in A	250
I_n	Nennstrom in kA	65
$I_{n, E}$	Nennstrom von Ersatz-Stromerzeugern in kA	272
I_{n1}, I_{n2}	Nennströme auf der Ober- bzw. Unterspannungsseite in kA	257
I_{therm}	thermischer Grenzstrom in A-Sekundenstrom	304/447
I_x	Strom-Scheitelwert der X-Oberwelle in kA	87

i

i	Augenblickswert des Stromes	87
i	Wärmeinhalt in kcal/kg	562
i_e	effektiver Mittelwert des Anodenstromes in A	250
i_e	Erregerstrom bei Nennbetrieb in A	68
$i_{e, 0}$	Leerlauferregerstrom in A	271
i_n	Strom in der Nebenschlußwicklung in A	9
$i_{n, 0}$	Strom in der Nebenschlußwicklung bei Leerlauf in A	13
i_r	Strom bei rückwärtslaufender Wanderwelle in kA	399
i_v	Strom bei vorwärtslaufender Wanderwelle in kA	399

j

j	Stromdichte in A/mm ²	298
j_a	Stromdichte bei Dauerkurzschluß in A/mm ²	279

K

K_B	Brennstoffkosten in RM/kWh	562
K_B	Batterie-Kapazität in Ah	37
$K_{B, j}$	jährliche Betriebsstoffkosten in RM	554
K_K	mechanische Kraft bei zweipoligem Kurzschluß in kg/cm	525
$K_{K_1}, K_{K_2}, K_{K_3}$	Höchstwerte der auf die Leiter 1, 2 oder 3 wirksamen Kurzschlußkraft in kg/cm	527
K_g	Kraftwerks-Selbstkosten im RM/Jahr	554
K'_g	Kraftwerks-Selbstkosten in RM/kWh	554
K_1	Anlagekosten in RM	554
K_2	jährliche Verwaltungs- und Geschäftskosten in RM	554
K_3	jährliche Betriebsausgaben in RM	554

k

k	Beiwert für synchrone Leistung	183
k_b	Beiwert zur Bestimmung der Kurzschlußkraft	525

		Seite
k_a	Beiwert für Schenkelpolmaschinen	182
k_s, k'_s	Synchronisierbeiwerte	190/191
k_2, k_3	Sättigungsbeiwerte für zwei- oder dreipoligen Kurzschluß	270
L		
L	Induktivität eines Stromkreises in H.	430
L	Leistungszahl.	223
L_{Dr}	Induktivität einer Drosselspule in H.	263
L_G	Induktivität von Maschinen bzw. Selbstinduktionswert der Ständerwicklung in H.	85
L_i	Leiterinduktivität in H bzw. mH/Phase	188
l		
l	Leiterlänge in m oder cm	298/526
l_F	Länge des Freileitungsnetzes in km	74
l_{Kab}	Länge des Kabelnetzes in km	74
l_i	Eisenlänge des Ständers in m	119
M		
M_B	Biegemoment in cm·kg.	531
M_{mittel}	mittlerer Wärmeverbrauch in kcal/kWh	562
m		
m_{E_0}	Leerlauf-Kurzschlußverhältnis für Ersatzstromerzeuger	272
m_0	Leerlauf-Kurzschlußverhältnis	182
N		
N	abgegebene Stromerzeugerleistung bzw. Netzleistung in kW oder MW	10/65
N_A	Antriebsleistung an der Stromerzeugerwelle in PS, kW bzw. MW	10/66
N_A	Scheinleistung des Asynchronwerkes in kVA	229
N_A, W	Wirkleistung des Asynchronwerkes in kW	230
N_A, b	Blindleistung des Asynchronwerkes in kVA	230
N_A, ω_0	Leistung der Antriebsmaschine bezogen auf den ursprünglichen Zustand in MW.	193
N_G	Ladeleistung in MVA/km	75
$N_{D\dot{a}}$	Dämpfungsleistung in MW.	192
$N_{D\dot{a}}$	augenblickliche Dämpfungsleistung in MW	199
$N_{Di, sp}$	Durchgangsleistung von Sparumspannern in MVA	261
N_{Dr}	Nennleistung von Drosselspulen in MVA	263
N_E	Nennleistung von Ersatzstromerzeugern in MVA.	282
N_E, sp	Eigenleistung von Sparumspannern in MVA.	261
N_H	Höchstlast in kW bzw. kVA.	562
N_L, N'_L	Maschinenleistung für Ladung in kW.	47
$N_{M, A}$	Scheinleistung des Mutterwerkes bei Mitarbeiten eines Asynchronwerkes in kVA	229
$N_{M, S}$	Scheinleistung des Mutterwerkes bei Mitarbeiten eines Synchronwerkes in kVA	229
$N_{M, W}$	Wirkleistung des Mutterwerkes in kW	230
N_N	Scheinleistung des Netzes in kVA	229
N_N, W	Netzwerkleistung in kW	230
$N_{N, b}$	Netzblindleistung in kVA	230
N_S	Scheinleistung des Synchronwerkes in kVA	229
N_{Tr}	Umspanner-Nennleistung in MVA	260
N_V	Antriebsleistung für Lüfter in kW	140
N_W	Wirkleistung bzw. synchrone Leistung in MW.	65/182
N'_W	augenblickliche Wirkleistung in MW	199
N_Z, L	Maschinenleistung für Ladung durch Zusatzmaschine in kW	50
N_a	Kurzschlußabschaltleistung in MVA	269

Verzeichnis der Formelzeichen.

601

Seite

N_n	Nennleistung in MVA	65
N_s	synchronisierende Leistung in MW	190
N_s'	augenblickliche synchronisierende Leistung in MW	199
N_W, ϑ_0	Belastung entsprechend dem Polradwinkel ϑ_0 in MVA	193
ΔN	Lastschwankungen	223

n

n	Drehzahl in U/min	9
n'	von n abweichende Drehzahl in U/min	10

P

$P_{B, g}$	Kohlenpreis frei Verwendungsstelle in RM/t	561
P_W	Wärmepreis Rpf/1000 kcal	561

p

p	Polpaarzahl	112
$2p$	Anzahl der Pole	9
p_a	jährliche Abschreibungen in vH	554
p_z	jährliche Verzinsung in vH	554

Q

Q	Luftmenge in m^3/s	138
Q_L	umlaufende Luftmenge bezogen auf $30^0 C$ und 760 mm QS in m^3/h	141
Q_W	Kühlwassermenge in m^3/h	141
Q_n	abzuführende Wärmemenge bei Nennleistung in kcal/h	141

q

q	Leiterquerschnitt in mm^2 bzw. cm^2	258/529
q_A	Querschnitt für Abluftkanal in m^2	139
q_F	Querschnitt für Frischluftkanal in m^2	139

R

R	Wirkwiderstand in Ohm/Phase	430
R_{Al}	Reibungswiderstand im Abluftkanal in m LS	139
R_{Abl}	Widerstand von Überspannungsableitern in Ohm/Phase	404
R_F	Reibungswiderstand im Frischluftkanal in m LS	139
R_{Rg}	Wirkwiderstand des Nebenschlußreglers in Ohm	13
R_a	Wirkwiderstand des Ankers in Ohm	9
R_g	gesamter Wirkwiderstand des Stromkreises in Ohm/Phase	187
R_{g1}, R_{g2}	Wirkwiderstände auf der Ober- bzw. Unterspannungsseite in Ohm/Phase	266
R_l	gesamter Wirkwiderstand der Leitung in Ohm/Phase ¹	187
R_n	Wirkwiderstand der Nebenschlußwicklung in Ohm	13
R_s	Wirkwiderstand der Ständerwicklung in Ohm/Phase	67
R_u	Widerstand bei Umgebungstemperatur in Ohm/Phase	279
R_w	Widerstand im Dauerbetrieb in Ohm/Phase	279

r

r	Leiterhalbmesser in cm	264
r_{Dr}	Wirkwiderstand von Drosselspulen in Ohm/Phase	257
r_G	Wirkwiderstand des Stromerzeugers in Ohm/Phase	257
$r_{G, E}$	Wirkwiderstand von Ersatz-Stromerzeugern in Ohm/Phase	282
r_{Kab}	Wirkwiderstand von Kabeln in Ohm/Phase	266
r_{Tr}	Wirkwiderstand eines Umspanners in Ohm/Phase	187

¹ $R_l = r_l \cdot$

		Seite
$r_{T/r, E}$	Wirkwiderstand von Ersatzumspannern in Ohm/Phase	286
r_l	Wirkwiderstand von Leitern in Ohm/Phase	257
r_x	Wirkwiderstand der x -ten Oberwelle in Ohm/Phase	86
S		
S_1	Rohstaubmenge in mg/m^3	130
S_2	Reststaubmenge in mg/m^3	130
s		
s_g, s'_g	Schlüpfung in vH	192/199
T		
T	Periodendauer in s	90
T_{Rv}	Verzögerungszeit durch den Antriebsmaschinenregler in s	207
T_h	Halbwertdauer in μs	386
T_p	Pendeldauer in s	198
T_s	Stirndauer in μs	386
T_{vz}	Dauer der erzwungenen Schwingungen in s	201
T_{v_0}	Dauer der Eigenschwingungen in s	193
t		
t	Kurzschlußdauer in s	279
t_A	Temperatur im Abluftkanal in $^{\circ}\text{C}$	139
t_F	Temperatur im Frischluftkanal in $^{\circ}\text{C}$	139
$t_{Kü_1}$	Eintrittstemperatur des Kühlwassers in $^{\circ}\text{C}$	142
$t_{Kü_2}$	Austrittstemperatur des Kühlwassers in $^{\circ}\text{C}$	142
t_{L_1}	Eintrittstemperatur der Warmluft in $^{\circ}\text{C}$	142
t_{L_2}	Austrittstemperatur der Warmluft in $^{\circ}\text{C}$	142
t_{sp}	Speisewassertemperatur vor Eintritt in den Kessel bzw. Rauchgasvorwärmer in $^{\circ}\text{C}$	562
t_u	Umgebungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$	279
Δt	Zuschlagszeit in s	298
Δt_2	Zuschlagszeit bei zweipoligem Kurzschluß in s	299
Δt_3	Zuschlagszeit bei dreipoligem Kurzschluß in s	299
U		
U	Klemmenspannung bzw. Netzspannung in V bzw. kV	9/66
U'	Klemmenspannung bei veränderter Drehzahl in V	10
U_B	Batteriespannung in V	35
U_{Er}	Ersatzspannung in kV	293
U_L	höchste Batterie-Ladespannung in V	47
U_{Re}	Resonanzspannung in kV	86
U_m	arithmetischer Mittelwert der Spannung auf der Gleichstromseite in V	250
U_n	Nennspannung in V bzw. kV	8/74
U_{n_1}, U_{n_2}	Spannung auf der Ober- bzw. Unterspannungsseite in kV	75
U_p	Phasenspannung in kV	75
$U_{\bar{u}}$	Überspannung je Phase in kV	395
$U_{\bar{u}, J}$	Höhe der Überspannung zur Bemessung der Isolation in kV/Phase	399
$U_{\bar{u}, R}$	Restspannung je Phase in kV	403
$U_{\bar{u}, r}$	Spannung der rückwärtslaufenden Wanderwelle je Phase in kV	399
$U_{\bar{u}, v}$	Spannung der vorwärtslaufenden Wanderwelle je Phase in kV	399
U_x	Spannung der x -ten Oberwelle in kV	86
U_0	Spannung bei Leerlauf in V	8
ΔU_n	Spannungsänderung in vH der Nennspannung	8
ΔU	Längsspannungsabfall in kV	216
δU	Querspannungsabfall in kV	216
u		
u	Augenblickswert der Spannung	87
u	Umfangsgeschwindigkeit in m/s	124

u_L, u'_L	Unterschied zwischen höchster Ladespannung und fester Sammelschienenspannung in V	48/50
u_e	Effektivwert der Phasenspannung auf der Wechselstromseite in V	250
V		
V_{Cu}	Wicklungsverluste in kW	260
$V_{H, I, Tr}$	Hysteresisverlust in \sqrt{H}	90
v		
v	Kurzschluß-Erregungsverhältnis	271
v_A	Luftgeschwindigkeit im Abluftkanal in m/s	139
v_{F_2}	Luftgeschwindigkeit im Frischluftkanal in m/s.	139
v_{w1}	Geschwindigkeit von Wanderwellen in km/s	390
W		
W	Widerstandsmoment in cm^3	531
W_a	Ständerwindungszahl	68
W_e	Windungszahl der Erregerwicklung	68
w		
w	Wärmeentwicklung in $\text{Ws/cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$	298
w_n	Windungszahl der Nebenschlußwicklung.	10
X		
X_G	kapazitiver Blindwiderstand des Netzes in Ohm/Phase	75
X_g	Summe der Blindwiderstände in einem Stromkreis in Ohm/Phase	187
X_{g1}	Summe der Blindwiderstände in einem Stromkreis bezogen auf die höhere Spannung in Ohm/Phase	266
X_{g2}	Summe der Blindwiderstände in einem Stromkreis bezogen auf die niedrigere Spannung in Ohm/Phase.	266
$X_{l, c}$	gesamter Blindwiderstand (induktiv + kapazitiv) der Leitung in Ohm/Phase	188
X_n	Summe der Blindwiderstände im Kurzschlußstromkreis ausschließlich der Maschinenblindwiderstände in Ohm/Phase	270
X_s, X'_s	synchroner Blindwiderstand in Ohm/Phase	68/112
X_{sn}	synchroner Blindwiderstand bei Nennbetrieb in Ohm/Phase	183
x		
x_{Dr}	Blindwiderstand von Drosselspulen in Ohm/Phase	257
x_G	Stromerzeugerblindwiderstand allgemein in Ohm/Phase	257
x_{Kab}	Blindwiderstand eines Kabels in Ohm/Phase	264
x_{Tjr}	Blindwiderstand von Umspannern in Ohm/Phase	187
$x_{Tjr, E}$	Blindwiderstand von Ersatzumspannern in Ohm/Phase.	286
$x_{Tjr, Sp}$	Blindwiderstand von Sparumspannern in Ohm/Phase.	261
x_a	Ständer-Rückwirkungsblindwiderstand in Ohm/Phase	68
x_l	Blindwiderstand von Leitern in Ohm/Phase	187
x_s	Ständer-Streublindwiderstand bei eingefahrenem Läufer in Ohm/Phase	68
$x_{s-\delta}$	Ständer-Streublindwiderstand (Stoßstreublindwiderstand) in Ohm/Phase	259
$x_{s-\delta, E}$	Ständer-Streublindwiderstand (Stoßstreublindwiderstand) für Ersatzstromerzeuger in Ohm/Phase	282
x_{1, x_2}	Blindwiderstände bezogen auf höhere bzw. niedrigere Spannung in Ohm/Phase	260
Z		
Z	Wellenwiderstand in Ohm/Phase	399
Z	gesamte Zellenzahl von Akkumulatoren	35
$Z_{N, j}$	Jahresausnutzungswert	562

		Seite
Z_s	Scheinwiderstand der Ständerwicklung in Ohm/Phase	68
$Z_{Sch, E}$	Zahl der Schaltzellen bei Einfachzellenschaltern	36
$Z_{Sch, D}$	Zahl der Schaltzellen bei Doppelzellenschaltern	36
$Z_{St, E}$	Zahl der Schaltzellen für die Stambatterie bei Einfachzellenschaltern	36
$Z_{St, D}$	Zahl der Schaltzellen für die Stambatterie bei Doppelzellenschaltern	36
Z_g	gesamter Scheinwiderstand des Stromkreises in Ohm/Phase . . .	187
Z_x	Scheinwiderstand der x -ten Oberwelle in Ohm/Phase	88
α		
α	Winkel zwischen Klemmenspannung und Erregerstrom bei Gleichstromerzeugern mit Nebenschlußwicklung	13
α	Erfahrungswert für Ventilatoren	124
α	Ausdehnungswert der Luft	139
α_P	Pendelwinkel	193
α_r	Pendelwinkel bei erzwungenen Schwingungen	201
α_{rZ}	Winkelabweichung bei Pendelungen durch erzwungene Schwingungen in elektrischen Graden	202
β		
β	Ausgleichwinkel der Klemmenspannung	199
γ		
γ	Einheits-Raumgewicht in g/cm ³ bzw. kg/m ³	142/298
γ_L	Einheitsraumgewicht der Luft in kg/m ³	142
γ_w	Einheitsraumgewicht des Wassers kg/m ³	142
Δ		
$\Delta\theta$	Erwärmung in °C	298
δ		
δ	Ungleichförmigkeitsgrad	202
ζ		
ζ	Resonanzmodul für ungedämpfte Schwingungen	203
ζ_d	Resonanzmodul für gedämpfte Schwingungen	204
η		
η_B	Batterie-Wirkungsgrad in vH	41
η_{Fi}	Filter-Wirkungsgrad in vH	130
η_G	Gesamtwirkungsgrad des Stromerzeugers in vH	10
η_K	Kesselwirkungsgrad in vH	562
η_R	Rohrleitungs-Wirkungsgrad in vH	562
η_V	Lüfter-Wirkungsgrad in vH	140
$\eta_{th, Tu}$	thermischer Turbinenwirkungsgrad in vH	562
Θ		
Θ	Trägheitsmoment in tm/s ²	193
ϑ		
ϑ	Polradwinkel	68
ϑ'	Winkel zwischen zwei Kraftwerksspannungen	216
ϑ_D	Erwärmung im Dauerbetrieb in °C	279
ϑ_G	Grenzerwärmung in °C	279
ϑ_m	mittleres Temperaturgefälle in °C	142
ϑ_u	Anfangstemperatur in °C	142
ϑ_e	Endtemperatur in °C	142
\varkappa		
\varkappa	Stoßbeiwert	268
\varkappa	elektrische Leitfähigkeit in m/Ohm · mm ²	298

	μ	Seite
μ	Abklingbeiwert	269
	ν	
ν_E	sekundliche Eigenschwingungszahl der Leiter in Per/s	529
ν_Z	Grundschiebungszahl der erzwungenen Schwingungen in Per/s	201
ν_0	Pendelfrequenz (Eigenschwingungszahl) des Polrades in Per/s	193
	ξ	
$\Sigma \xi_A$	Widerstandssumme bei Luftbewegung im Abluftkanal in m LS	139
$\Sigma \xi_F$	Widerstandssumme bei Luftbewegung im Frischluftkanal in m LS	139
	ρ	
ρ	spezifische Masse in $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$	529
	σ	
σ_B	Biegebungsbeanspruchung kg/cm^2	531
	Φ	
Φ	wirksamer Kraftfluß eines Poles in Maxwell	9
Φ_a	Kraftfluß der Ständerwicklung in Maxwell	68
Φ_e	Kraftfluß der Gleichstrom-Erregerwicklung in Maxwell	68
Φ_1	resultierender Kraftfluß	68
	φ	
φ_k	Kurzschlußphasenwinkel	266
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor	66
$\cos \varphi_{M, A}$	Leistungsfaktor des Mutterwerkes bei Milarbeiten eines Asynchronwerkes	230
$\cos \varphi_{M, S}$	Leistungsfaktor des Mutterwerkes bei Milarbeiten eines Synchronwerkes	230
	ω	
ω	Kreisfrequenz in Per/s	85
ω_m	unveränderte Winkelgeschwindigkeit des Polrades in Per/s	201
ω_0	Winkelgeschwindigkeit der Antriebsmaschine in Per/s	193

Sachverzeichnis.

Das Sachverzeichnis ist eine Ergänzung des ausführlichen Inhaltsverzeichnisses und auf den Hauptstichworten aufgebaut.

- Abbremsung, Läufer- 174.
- Abklingziffer 269.
- Ableitungsstrom 419.
- Ableitungsverlust 566.
- Abluftkanal, gemeinsamer 135.
- Abnahmeprüfung 3.
- Abnehmerschutz 344, 347, 351.
- Abschaltleistung bei Hochspannungsschaltern 318.
 - bei Selbstschalter 238.
 - bei Sicherungen 238.
- Abschreibungen 548, 559, 568.
- Achterschutz 367.
- Äquipotentialfläche 387.
- Akkumulatorenbatterie 2, 5, 22.
 - Dauerladeeinrichtung 54.
 - Entladung 32, 43.
 - Fernzeiger 42.
 - Größe der — 54.
 - Gruppenaufteilung 46.
 - Kapazität 36.
 - Ladung 10, 17, 22, 24, 32, 35, 37, 103.
 - selbsttätige 42.
 - Lebensdauer 35, 54.
 - Leistungsfähigkeit 40.
 - Maschinenleistung 47.
 - Mikaschaltung 48.
 - Parallelarbeit 21, 28.
 - Raumbeanspruchung 63.
 - Schaltzellen 36.
 - Schnellaufladung 55.
 - Selbstentladung 41, 55.
 - Strombatterie 36.
 - Spannungsteilung 28, 31.
 - Überladung 35, 47, 48.
 - Verwendung 34.
 - Wirkungsgrad 41.
 - Zellenzahl 35.
- Akkumulatorenraum 63.
- Altwert 556.
- Aluminium, Farbanstrich 539.
 - Kupferverbindung mit 539.
 - als Leiterbaustoff 418.
 - Mindestquerschnitt für Schaltanlagen 302, 529.
 - für Schaltanlagen 537.
- Aluminium, Schraubenverbindung 466, 538.
 - Schmelzzeit 538.
 - Schweißung 538.
 - Skineffekt 544.
 - für Wicklungen 80, 158, 164.
- Anfuhr 4.
- Ankerrückwirkung bei Gleichstrommaschinen 9, 13, 25.
- Anlagekosten 551.
- Anlauffarbe 539.
- Antriebsmaschinen 57 (siehe auch Dampf- und Wasserturbinenantrieb, Dieselmotorantrieb, Gasmotorantrieb).
 - Drehzahl 3, 9, 10.
 - Drehzahlerhöhung 346.
 - Entlastung 346.
 - Leistung 3, 10, 15, 65.
 - Regler 4.
 - Schwingungen 202.
 - Überlastbarkeit 2.
 - Zusammenbau mit der — 118.
- Arbeitspreis 566, 570, 585.
- Asynchronmaschine, Kurzschluß der — 270.
- Aufschaukeln (siehe Schwingungen) 207.
- Aufstellungsort 4.
- Ausgleichmaschinen 28.
 - Anlassen der — 31.
- Ausgleichleitung bei Gleichstrommaschinen 26.
- Ausgleichschwingung 190.
- Ausgleichstrom 8, 15, 20, 149, 197.
- Aushilfsmaschinen 2, 550.
- Auslenkung 196.
- Auslöser 339.
 - Arbeitsstrom 340.
 - primär 339.
 - Ruhestrom 340.
 - sekundär 340.
 - Wärme- 342, 368.
- Auslösung, Schnell- 343, 346, 350.
 - spannungsabhängige — 344.
 - stromabhängige — 346.
 - Zeit 343.

- Ausnutzungswert, Kraftwerks- 562, 568.
 Ausnutzungsziffer 118.
 Ausschaltkennlinien, Sicherungen 240, 310.
 — Meßwerke 346.
 Außenleiterspannung 29.
 Außenpolmaschine 160.
 Außertrittfallen 71, 184, 197.
 Ausstrahlung 566.
 Auswuchtung 163.
- Bahnanlage** 34, 336, 461, 468.
Bahnkraftwerk 56, 177.
Bakelit 537.
Banderder 547.
Batterieraum 63.
Bauzeitplan 115.
Bauzinsen 550, 568.
Bedienung 4.
Bedienungskosten 39, 550, 564, 569.
Befehlsanlage 34.
Belüftung, Maschinen- 120.
 — Maschinenraum- 132.
 — Batterieraum- 63.
 — Drosselspulen- 280.
Benutzungszeit (Benutzungsstunden) 221, 585.
Berührungsschutz 477, 520.
Betätigungsbatterie 53.
Betriebsfahrplan 221, 579.
Betriebskennlinien, Gleichstrommaschi-
ne 21, 22.
 — Gleichstrom-Doppelschlußmaschine 26.
 — Gleichstrom-Hauptschlußmaschine 25.
 — Gleichstrom-Nebenschlußmaschine 11.
 — Synchronmaschine 111.
Betriebskosten 3, 40, 130, 548, 561, 569.
 — für Luftkühler 147.
 — für Luftreinigung 130.
Betriebsstoffe, Lagerung der — 550.
Betriebsstoffverbrauch 562.
Betriebsstundenzahl 554.
Betriebswirtschaft 215.
Bezugsspannung, Umrechnung auf — 266.
Blindlastregelung 217.
Blindschaltbild 332, 494, 516.
Blindverbrauchszähler 573.
Blitzschutzseil (siehe Erdseil).
Blitzstrom 389.
Blocktrennung 503.
Brand-Kabel — 493.
 — Maschinen- 99, 128, 138, 140, 148, 369, 378.
Brandlöschung 372, 374.
Bremsung-Läufer — 174.
Brennstoffkosten 561.
Buchholzschutz 382, 504.
- Bürde** 366.
Bürstenstellung 6, 7, 11.
Büschellicht 385.
- Dampfkraftwerk (siehe auch Dampf-**
turbinenantrieb) 487, 506, 550.
 — Kohlenverbrauch 231.
Dampflöschung 382.
Dampfturbinenantrieb 112, 114, 200, 208.
 — Maschinenkühlung 143.
Dampfverbrauch 561.
Dämpferwicklung 91, 161, 192, 205, 258, 269.
 — bei Gleichstrommaschinen 6.
 — bei Synchronmaschinen 91.
Dämpfungseistung 192, 200, 201.
Dauerkurzschlußstrom (s. Kurzschluß)
Dauerleistung 1.
Dieselmotorantrieb 34, 66, 112, 149, 150, 176, 204, 486.
Dissonanzspule 425.
Doppelleitung 352.
Drehschwingungen 150.
Drehzahl, genormte — 112.
 — bei Gleichstrommaschinen 2.
 — Schleuder- 113.
 — bei Wechselstrommaschinen 2.
 — -erhöhung 112, 370.
 — -verstellung 211, 484.
Dreileiteranlage 37.
Dreileiterspannung 29.
Drosselspule, Belastungsdauer 279.
 — Belüftung 280.
 — Erwärmung 279.
 — gesättigte — 72, 105.
 — Kurzschluß- 76, 81, 83, 361.
 — Luftspalt- 72, 105.
 — Spannungsabfall 278.
 — als Spannungsteiler 29.
 — Strombegrenzungs- (auch Kurzschlußdrosselspule) 191.
Dunkelschaltung 213.
Durchführung 395, 409, 533.
 — Kondensator- 536.
 — thermischer Grenzstrom 304, 306.
 — Umbruchskraft 529.
Durchgangsanlage 400.
Durchgangsdrehzahl 158.
Durchschlagsspannung 536.
Dynamische Kennlinie bei Gleichstrom
11.
 — — bei Synchronmaschine 191.
- Edisonakkumulator** 53.
Eigenbedarf 278, 470, 488, 521, 550.
Eigenfrequenz 199.
Eigenkraftwerk 19, 38.
Eigenschwingung 188.
 — der Sammelschienen 529.

- Eigenschwingung der Wicklung 371.
 Eigenschwingungsdauer 193.
 Eigenschwingungszahl 193, 195, 199, 205.
 — Leiter- 259.
 Eilregler 17.
 Einfachsammelschiene (siehe Sammelschiene).
 Eingangswindung (siehe Spannungswandler, Stromwandler, Wicklung).
 Einheitsgewicht 119.
 Einheitspreis 120.
 Eisenbrand 371.
 Elektrochemischer Betrieb 2, 17.
 Elektrooefen 177, 468.
 Entregung 275, 346.
 — durch Felsschwächung 369.
 — Schnell- 369.
 Entstaubungsgrad 130.
 Erdkurzschluß 268, 418.
 Erdschluß 180, 236, 247, 334, 339, 346, 356, 363, 373, 393, 416.
 — Aufzeichnung 435.
 — Doppel- 268, 363, 373, 374, 418, 427.
 — Überspannung 422.
 — vorgetäuschter — 421.
 Erdschlußanzeiger 397.
 Erdschlußlöschung 85, 178, 336, 397, 421, 422.
 — Abgleichung 422.
 — Einschaltdauer 429.
 — Oberwellen 422.
 — Reststrom 422.
 — Spulenleistung 425.
 Erdschlußschutz 221.
 Erdschlußspule 376.
 Erdschlußstrom 419, 422, 423.
 Erdschlußstrompegel 429.
 Erdschlußüberwachung 420, 426, 429.
 Erdseil 391, 411, 414.
 Erdung 410, 477, 533, 546.
 — Nullpunkts- 165.
 Erdungsdrosselspule 387, 396, 429.
 Erdungsschalter 315.
 Erdungswiderstand 387, 396, 429.
 Erneuerungsrücklage 563.
 Erregermaschine 74.
 — Antrieb- 145.
 — Doppelschluß- 95, 101.
 — durch Entregung 275, 346.
 — durch Feldschwächung 369.
 — Hilfs- 98.
 — Kommutator- 233.
 — Leistung der — 80.
 — mit Fremderregung 370.
 — Schnellentregung 369.
 — stabile — 95, 184.
 — Umformer- 101.
 — Umpolen der — 97.
 Erregerspannung 104.
 Erregerspannung bei Gleichstrom 7.
 Erregung 69, 345.
 — Eigen- 91.
 — Fremd- 91.
 — Gegen- 73, 95, 98.
 — Gemeinschafts- 103.
 — Schnell- 275.
 — Schwächung der — 275.
 — Stoß- 100, 275.
 — Unter- 70, 200.
 — Über- 70, 104, 200.
 Erregungsverhältnis 271.
 Erwärmung, Maschinen- 1, 2, 7, 77, 79, 85, 138.
 — Schutzmeßwerk gegen — 349.
 — Wicklungs- 65, 77, 84, 115, 164, 369.
 Erwärmungszeitfestwert 80.
 Erwärmungszeitwert für Anlageteile 349.
 Fabrikanlage (siehe auch Industriekraftwerk) 37, 55.
 Fahrplan 579.
 Fahrplanmaschine 220.
 Fehlauflösung (siehe Fehlschaltung).
 Fehlereingrenzung (siehe Hochspannungssicherung, Meßwerke, Schalter, Selbstschalter, Sicherungen, Staffellung).
 Fehlerschutz, Beurteilung 341.
 Fehlschaltungen, Ursachen von 343, 355, 363, 364, 372, 374, 375, 378, 421, 494.
 Feldschwächung (siehe Erregermaschine) 369.
 Fernmeldeanlage, Störung der — 398.
 Fernmeldung 496.
 Fernmessung 495.
 Fernsprechanlage 178, 458, 491, 523.
 — Störung der — 85, 91, 398.
 Fernsteuerung (siehe Regler).
 Fernzeiger für Batterie 42.
 Feuerlöscheinrichtungen (siehe Brandlöschung).
 Filterwiderstand 139.
 Formfaktor 89.
 Fourierreihe 86.
 Francisturbine 136.
 Freileitung 361, 395.
 — Blindwiderstand 264.
 — Rauhreif 336.
 — Windgefährdung 336.
 Freiluftanlage 416, 443, 466, 533, 534.
 Freiluftausführung, Maschinen- 172.
 Fremdstrombezug 221.
 Frequenzband 223.
 Frequenzfehler 210.
 Frequenzmaschine 220.
 Frequenzmesser 211.
 Frequenzsteuerung 223.

- Fünfschenkelwandler 445.
 Fundamentisolierung 118.
 Fundament, Kurzschlußbeanspruchung 164, 167.
 — Maschinen- 5, 114, 164, 297.
 Funkenlöschung bei Schaltern 244.
 — bei Sicherungen 240.
Garantie siehe Gewährleistungen.
 Gasmotorenantrieb 66, 102, 112, 149, 150, 176, 204, 486.
 Geax 537.
 Gebäudekosten 553.
 Gegenerrregung siehe Erregung.
 Geräuschbildung 94, 115, 120, 151, 162, 487.
 Gewährleistungen 3, 7, 178.
 Gewitterformen 388.
 Gleichrichter 34, 53, 87, 249.
 — Glimm- 55.
 — Ladedrossel- 53.
 — Trocken- 55.
 — Überspannungserregung 413.
 Gleichstromerzeuger mit Doppelschlußwicklung 21, 22, 25, 56.
 — mit Fremdschlußwicklung 8, 61, 249.
 — mit Hauptschlußwicklung 23, 25.
 — Klemmenspannung 12.
 — Kurzschluß 13.
 — mit Nebenschlußwicklung 249.
 — Regler 19.
 — Spannungsänderung 3, 7, 8.
 Glimmlicht 385.
 Grenzerwärmung 79.
 Grenzleistung 149, 183, 191.
 Grenzstrom für Auslöser 304.
 — für Durchführung 304.
 — dynamischer 342, 531.
 — Stromwandler 304.
 — thermischer 342.
 Grobsynchronisieren 201, 211.
 Grundlast 219, 567, 586.
 Grundlastmaschine 220, 225.
 Grundwelle 84.
 Gruppenantrieb, Regler — 15.
Handantrieb für Schalter 324
 — Parallelschalten mit — 324
 — Schaltgeschwindigkeit 324.
 Harmonische 84.
 Hauptbefehlsstelle (siehe auch Schaltwarte) 225.
 Hauptstromregler 95, 106.
 Heizung der Maschinenräume 133.
 — der Schalträume 133.
 Hellschaltung 212.
 Heulen bei Maschinen 151.
 Hochfrequenz 225, 366.
 Hochspannungssicherung 344.
 — Auslösezeit 311.
 — Beschaffenheit 311.
 Hochspannungssicherung, Kurzschlußabschaltung 309, 338.
 — Schaltvermögen 308.
 — Schmelzzeit 309.
 — Staffelfung 311.
 Höchstlastanzeiger 576.
 — Meßzeitraum 576.
 — schreibender — 575.
 Holmgreenschaltung 375.
 Holzmastleitung 387, 390, 411.
 Hörnerfunkenstrecke 405.
 Hüttenwerksbetrieb 27, 55.
Industriekraftwerk (Industrieanlagen) 2, 6, 16, 21, 22, 27, 83, 101, 177, 188, 335, 466, 506, 521, 549.
 Innenpolmaschine 160.
 Innenraumanlagen 409, 416, 466, 522, 533, 540.
 Instandsetzungsarbeiten 4.
 Instandsetzungskosten 558.
 Isolationsanzeiger 420, 447.
 Isolatoren 533.
 — Feuchtigkeit 466.
 — Hörnerfunkenstrecke 415.
 — Kurzschlußbeanspruchung 253.
 — Stoßüberschlagsspannung 389, 409.
 — Stütz- 529.
 Isolation, verstärkte — (siehe Synchronstromerzeuger, Meßwandler).
 Isolierumspanner 225, 272, 276, 420.
 Isthmus 98.
Jahresbenutzungsstunden 567, 585.
Jahresverbrauch, zu gewährleistender 567.
Jahresverlust 566.
Jahreswirkungsgrad 22, 468, 561, 566.
Kabel 361, 362, 395, 529.
 — Aluminium für — 248.
 — Blindwiderstand 264.
 — Blitzschäden bei — 393.
 — Bodenbeschaffenheit 393.
 — Drosselpulenschutz 285.
 — Endverschluß 529.
 — Erdschluß 416, 429.
 — Kurzschlußbeanspruchung 252.
 — Mindestquerschnitt 304.
 — Schalterantrieb bei Kabelleitungen 328.
 — Trennschalter bei Kabelanschluß 314.
 — als Überspannungsschutz 411.
 Kabelbrand 493, 546.
 Kabelfehler 248.
 Kabelkeller 493.
 Kabelnetz 17.
 Kanalpressung 139.

- Kanalquerschnitt 139.
 Kanalreibung 139.
 Kapazität, Betriebs- 75.
 — Einfluß der — 85, 88.
 — Freileitungs- 74, 78, 188.
 — Kabel- 74, 78, 188.
 — Ladeleistung 75.
 — Ladestrom 91, 417.
 — Leitungs- 385.
 — Wicklungsschutz durch — 394.
 Kapitaldienst 114, 468, 550, 554, 568.
 Kaplanturbine 136, 170.
 Kaskadenumformer 270.
 Kaskadenwandler 455.
 Kathodenfallableiter 405.
 Kegelartrieb 94.
 Kippgrenze 191.
 Kippleistung 184.
 Klima 537.
 Körperschluß 373.
 — schleichender — 374.
 Kohlensäurelöschung 380.
 Kohlenförderanlagen 564.
 Kolbenpumpe 201.
 Kommutator (siehe Stromwandler).
 Kondensator 71, 78, 85, 105, 226, 233, 419.
 Kopfanlage 400.
 Korona 446.
 Kosten, Kraftwerks- 5.
 — Stromselbsterzeugungs- — 5.
 Kraftwerk, Baukosten 114, 554.
 — Wertigkeit 219.
 Kran, Maschinenhaus- 114.
 Kranbelastung 4.
 Kranbetrieb 22, 27, 56.
 Kreislaufkühlung 140.
 — Leistungsfähigkeit 141.
 Kriechstrom 338.
 Kühlung, Maschinen- 115.
 — Selbst- 120.
 — Stufen- 145.
 — Umlauf- 125, 126.
 — Wasser- 120.
 Kühlmittel 79.
 — Temperatur 141.
 Kühlwassermenge 142.
 Kupfer, Mindestquerschnitt für Schaltanlagen 301, 529, 537.
 Kuppelleitung 176, 218.
 Kuppelschalter 276, 316, 384, 466, 470, 504.
 Kupplungsanlage 188.
 Kurzkupplung 81, 108, 200, 218, 275, 371, 372, 376, 464, 469, 501.
 Kurzschluß 180, 247, 334, 338, 339, 346, 356, 378.
 — bei Asynchronmaschine 232, 254.
 — Aufzeichnung 435.
 — Ausschaltstrom 269.
 Kurzschluß, Ausbrennen in Kabelnetzen (siehe Kabel).
 — Beanspruchung (siehe Meßwandler, Schaltanlagen, Schalter, Selbstschalter, Sicherungen, Synchronstromerzeuger).
 — -dauer 236.
 — Dreipoliger — 256, 270, 299.
 — -Drosselspule 225, 263, 272, 470, 513.
 — -entfernung, numerische — 270, 299.
 — Erd- 254.
 — -erwärmung 298.
 — -fortschaltung 100, 282, 336.
 — Fundamentbeanspruchung (siehe Fundament) 83.
 — -gleichstromglied 252, 254, 268.
 — bei Gleichstrommaschinen 13, 23.
 — -lichtbogen 253.
 — -kraftwirkung (siehe auch Schaltanlagen) 525.
 — -Phasenwinkel 266, 354, 526.
 — Sammelschienen- (siehe Schaltanlage).
 — -Sättigungsziffer 270.
 — -Schnellauslösung 342.
 — -verhältnis 182, 259.
 — -Wicklungsbeanspruchung 83.
 — -Wicklungsversteifung (siehe Wicklung).
 Kurzschlußstrom, allgemein 178.
 — Dauer- 3, 252.
 — von Maschinen 256.
 — Stoß- 3, 252, 254.
 — -Stoßziffer 268.
 — bei Stromwandler (siehe Stromwandler).
 — zweipoliger — 256, 270, 299.
 Kurzschlußwindungen 394.
 Ladesammelschiene 45.
 Ladestrom.
 — Kabel- 70, 74.
 — Freileitungs- 70, 74.
 Ladung, statische — 396.
 Lagerbelastung 5.
 Lagerkühlung 5, 112, 165.
 Lager, Maschinen- 112.
 Lagerreibung 11.
 Lagerströme 165.
 Lastverteiler 225, 495, 579.
 Lastverteilung 176, 178.
 Laufwasserkraftwerk 176.
 Läuferchutz 378.
 Lebensdauer, Maschinen- 7, 111, 126, 151.
 — Anlageteile 556, 558.
 Leistungsabgabe 2, 4, 5, 10.
 Leistungsaufnahme 2.
 Leistungsfahrplan (siehe auch Fahrplan, Fahrplanmaschine) 225.

- Leistungsfaktor 1, 3, 53, 66, 68, 71, 76, 78, 81, 278, 561.
 — -verbesserung 574.
 — Kurzschluß 319.
 Leistungsgewicht 272.
 Leistung, Maschineneinzel- 5.
 — kapazitive — 184.
 — synchrone — 180.
 — synchronisierende — 99, 190, 275.
 Leistungsnormung 66.
 Leistungspreis 5, 561, 570, 575, 585.
 Leistungsregelung.
 — bei Gleichstrommaschinen 8.
 — bei Wechselstrommaschinen 66.
 Leistungstarif 221.
 Leistungstrennschalter-Kurzschlußabschaltung 338, 531.
 — Kurzschlußbeanspruchung 531.
 — Schaltgeschwindigkeit 338.
 — Schaltvermögen 338.
 Leistungszahl 223.
 Leitung, Hochspannungs- 388.
 — Holzmast- 387, 390, 411.
 — Verdrillung 425.
 Leuchtschaltbild 493, 496.
 Lichtbogenleistung 317.
 Lichtbogenofen 87.
 Lichtzuckungen 14.
 Ljungströmmaschine 378.
 Löschrohrableiter 413.
 Löschumspanner 427.
 Luftbeschaffenheit 4, 115, 126, 390, 466, 535.
 — für Schaltanlagen 312, 416, 466.
 Luftfeuchtigkeit siehe Luftbeschaffenheit.
 Luftfilter, Grundbedingungen 130.
 — Wirkungsgrad 130.
 Luftgeschwindigkeit in Kanälen 139.
 Luftkammer 143.
 Lüfterflügel 121, 124.
 Lüftung, Eigen- 120.
 — Fremd- 120.
 — Maschinen- 115.
 Luftreibung (siehe auch Kanalpresung) 11.
 Luftschutz 433, 525, 550.
 Luftvorwärmung 128.

Magnesium 300, 529, 540.
 — Mindestquerschnitt 540.
 — Verwendung 540.
 — Schutzanstrich 540.
Magnetischer Zug 164.
Marmor 481.
Maschinenraum, Belüftung 133.
 — Heizung 132.
 — Temperatur 135.
 — Überdruck 123.
Massewandler 442.
Masterdung 336, 389, 391, 414, 534.
Meistbegünstigungsklausel 587.
Meldeanlage 488, 491.
Meßgeräte, Anordnung 477.
 — Auswahl der — 432, 481.
 — für Batterie 433.
 — Bauformen 431.
 — Beleuchtete Skala 433.
 — für Drehstrom 433.
 — Eigenverbrauch 431.
 — für Gleichstrom 433.
 — schreibende — 434.
Meßleitung 452, 478, 507, 545.
Meßskala 434.
Meßwandler (siehe Spannungswandler, Stromwandler, Wandler).
Meßwerk (Relais) 339.
 — -Ansprechempfindlichkeit 372.
 — -Ansprechgenauigkeit 354.
 — Energierichtungs- 351, 353, 362.
 — Fehlerschutz- 341.
 — Impedanz- 356.
 — Kurzschlußphasenwinkel 268.
 — Lichtbogeneinfluß 356, 360, 364.
 — Nullspannungs- 344.
 — Pendelfestes — 355, 364.
 — Pendelsperre 363, 367.
 — Phasenwinkel 358, 362.
 — Primär- 340, 342.
 — Reaktanz- 361.
 — Rückstrom- 231.
 — -Schnellauslösung 252.
 — Sekundär- 342.
 — Spannungsabfall- 364.
 — Spannungserhöhungs- 345.
 — Spannungsrückgangs- 344.
 — Stabilisiertes — 356, 363.
 — Verzögerte Auslösung 252.
 — Widerstandsabhängiges — 357, 452.
 — Zeitgenauigkeit 342.
Mittelleiterstrom 29.
Motoranlaufstrom 245.
Motorschutz 344, 348.

Naßluftfilter 131.
Nebenbetriebe 103.
Nebenkosten 550.
Nebenschlußregler 10, 13.
Nennbetrieb 2, 7.
Nenn Drehzahl 2, 7, 84.
Nennfrequenz für Schaltgeräte 313.
Nennleistung 1, 7, 77, 84, 185.
Nennleistungsfaktor 84.
Nennspannung 2, 7.
Nennstrom 2, 236.
Netz, vermaschtes 296.
Netzmodell 296.
Netzschutz (siehe auch Meßwecke, Schalter, Selbstschalter, Sicherungen) 344, 351.

- Niveaufläche 387.
 Notbeleuchtung 53, 433, 506, 525.
 Notstromanlage 34, 102.
 Nullpunkt, Maschinen- 395, 424.
 Nullpunktserdung 91, 424
 Nullspannungsauslösung 60, 246, 335.
 Nullung 477.
 Nutendämpfer 6.
 Nutenform 90, 153, 162.
 Nutenglimmen 156.
 Nutenkeil 91, 163.
 Nutenüberschwingung 91.
Oberschwingungen 161, 204.
Oberwellen 85, 86.
 — Feld 90.
 — Spannung 86, 371, 420.
 — Strom 89, 354, 377, 420.
Ölbrand 320.
Öldämpfe siehe Schaltanlage.
Ölschalter 339, 458.
Ölsicherung 239.
Ölwandler 437, 442.
Ossanamaschine 98.
Papiermaschinenfabrik 14.
Parallelbetrieb (siehe auch Parallel-
 schaltung).
 — Drehstrom 6, 177.
 — Gleichstrommaschinen-Nebenschluß
 4, 8, 14, 19.
Parallelfunkstrecke 391.
Parallelschaltung 346, 481.
 — fehlerhafte — 211.
 — Meßstellen für — 465.
 — von Netzen 179.
 — selbsttätige — 214.
Pendelfrequenz 193, 198, 205.
Pendeln 190.
 — der Antriebsmaschine 27.
 — der Belastung bei Gleichstrom 26.
 — Dauer des — 198.
 — des Netzes 197.
 — des Reglers 17.
Pendelwinkel 193.
Petersenspule 425.
Phasenfehler 211.
Phasenschieber 78.
Piranimaschine 60.
Polbefestigung 159.
Polradwinkel 179, 216.
Polschuhform 90, 160.
Polygonschutz 367.
Potierdreieck 72.
Pressung, Kanal — 139.
 — Maschinen- 123.
Prüfgrad 533.
Pufferbatterie 22, 34, 56.
Pufferung 28, 37, 41, 55.
Pumpspeicherkraftwerk 176, 563.
 — Steuerung 489.
Querumspanner 222.
Raumbeanspruchung (siehe auch Ak-
 kumulatorenbatterie, Schaltanlagen,
 Synchronstromerzeuger) 120.
 — Reaktanz, synchrone — 182.
Regelumspanner 225.
Regler, Arbeitsweise 222.
 — astatischer — 16, 106, 223.
 — -Bedingungen 109.
 — -Dynamik 224.
 — Eil- 17.
 — -Empfindlichkeit 17, 223.
 — -Fernsteuerung 16.
 — -Fernübertragung 225.
 — -Geschwindigkeit 17.
 — Güte des — 18.
 — Lastbegrenzung 225.
 — Pendeln des — 17.
 — Selbsttätiger — 224.
 — Schnell- 17.
 — statischer — 16, 20, 106, 223.
 — Thoma- 18, 109.
 — Tirill- 18, 108.
 — Träg- 17, 224.
 — Verbund- 106.
 — -Verzögerungszeit 207.
Regulierpol 98.
Reibkupplung 94.
Reihenspannung 533.
Relais (siehe Meßwerk).
Repelit 536.
Reservemaschine siehe Aushilfsmaschi-
 nen.
Reststrom (siehe Erdschlußlöschung).
Resonanz 525, 528.
 — Spannungs- 85, 395, 430.
 — Strom — 88.
Resonanzgefahr 196, 203, 297.
Resonanzmodul 203.
Richtungsbetrieb 177.
Richtungsmeißwerk (siehe Meßwerk,
 Energierichtungs-).
Riemenantrieb 94, 150.
Ringleitung 352.
Röbelstab 154.
Rohrerder 547.
Rücklagen 549, 560, 568.
Rücklaufhemmung bei Zählern (siehe
 Zähler).
Rückstromschalter (siehe Selbstschal-
 ter).
 — für Batterie 50, 51.
Ruhestromschaltung 316.
Rundfeuer 6, 13, 249.
 — an Spulenköpfen 378.
Saaletalsperre 113.
Sammelschiene, Anordnung 507.
 — Blocktrennung 384.

- Sammelschiene, Doppel- 316, 468.
 — Dreifach- 468.
 — Einfach- 466.
 — Kuppelschalter 316.
 — Kurzschluß in — 384.
 — Kurzschlußbeanspruchung 253.
 — Längskuppelschalter 276.
 — Leiterquerschnitt 529.
 — Überspannungsschutz 409.
 Saugdrossel 251.
 Schablonenwicklung 155.
 Schaltanlage 390.
 — Aufbau 280, 321, 324.
 — Beanspruchung durch Überspannung 390, 398, 400, 415.
 — Beleuchtung 517.
 — Beschriftung 478.
 — Brandlöschung 381.
 — Einstock- 500.
 — Freiluft- 312.
 — Gekapselte — 476.
 — Gangbreiten 514.
 — Hallenbau 517.
 — Innenraum- 312.
 — Kurzschlußbeanspruchung 84, 253, 256.
 — Leiterabstände 535.
 — Leiteranstrich 539.
 — Leiterbelastung 298.
 — Leitererwärmung 298.
 — Lichtbogenschutz 511.
 — Lichtverhältnisse 477, 490.
 — Magnesium 300, 302.
 — Mehrstock- 501.
 — Meßwerke für — 343.
 — Metalldämpfe 512, 517.
 — Ölbrand 321.
 — Raumbeanspruchung 280, 321, 468, 507.
 — Raumbeschaffenheit 537.
 — Raumbelichtung 517.
 — Schalteranschluß 545.
 — Schalteraufstellung 508, 517.
 — Schalterstellung 332.
 — Schutzgitter 280.
 — Schutzwand 510.
 — Sicherheitsgrad 533.
 — Streufelder 545.
 — Stromweichen 544.
 — Stützerbefestigung 280.
 — Trennschalter 337.
 — Überspannungsschutz für — 415, 534.
 Schaltbild 460, 506.
 — Beleuchtung 491.
 Schaltbühne 486.
 Schalter (siehe auch Kabel, Leistungs-
 trennschalter, Selbstschalter, Trenn-
 schalter).
 — Abschaltleistung 178, 256, 285, 318,
 531.
 Schalter, Ansprechzeit 254.
 — Antrieb (siehe Schalterantrieb).
 — Ausschaltlichtbogen 318.
 — Ausschaltstrom 286, 290.
 — Ausschaltvermögen 318.
 — Auswahl 319.
 — für Batterie 368.
 — Beurteilung 322.
 — Eigenschaltzeit 197, 210, 214, 252, 254.
 — Einschaltstrom 286.
 — Grenzausschaltstrom 319.
 — Kurzschlußbeanspruchung 531.
 — Lichtbogendauer 318.
 — Öl- 320.
 — Ölarmer — 320, 496.
 — Ölloser — 320, 496.
 — Rückstrom- 368.
 — Schaltarbeit 317.
 — Stellungsanzeiger für — 332.
 — Zerknall 321.
 Schalterantrieb, Druckluft 244, 330.
 — Einschaltzeit 328, 329.
 — Kraftspeicher — 329.
 — magnetischer — 244, 328.
 — motorischer — 244, 327.
 Schaltfehlerschutz 315, 332.
 Schaltfeuer 237.
 Schaltgeschwindigkeit bei Gleichstrom
 237.
 — bei Wechselstrom 237.
 Schaltleistung 236.
 Schaltlichtbogen 237.
 Schaltpult 482.
 Schaltraum, Heizung 133.
 Schalttafelanstrich 481.
 Schaltwarte 456, 477.
 Schaltzeit bei Gleichstrom 239.
 — bei Wechselstrom 239.
 Schenkelpolmaschinen 73, 91, 150.
 — Streuspannung der — 181.
 Schleuderprobe 113.
 Schlupf, übersynchroner — 227.
 Schlupfleistung 190.
 Schmelzsicherung (siehe auch Hoch-
 spannungssicherung, Sicherung) 103.
 Schnellauslösung 384.
 Schnellregler 57, 59, 99, 200, 446.
 Schnellschalter 246, 249.
 Schnellschlußventil 112.
 Schrittspannung 416.
 Schutz (siehe Meßwerke).
 Schutzfunkenstrecke, selbstlöschende —
 413.
 Schutzkondensator 394, 411.
 Schutzschalter 227.
 Schwabungen 205.
 — Belastung bei Gleichstrom 27.
 Schwingungen, Anfachung der — 97.
 — Eigen- 97.
 — Erzwungene — 196, 201.

- Schwingungen, Frequenz der — 203.
 — Selbsterregte — 206.
 Schwingungsweite 202.
 Schwitzwasser 144, 172.
 Schwungmasse 205.
 Schwungrad 56.
 Schwungmoment 149, 160, 201.
 Selbstausbrennen, Fehler bei Kabeln 248.
 Selbsterzeugungskosten 548, 550, 560.
 Selbstkompensierung 76.
 Selbstschalter (siehe auch Abschaltleistung) 344, 395.
 — bei Asynchronmaschinen 227.
 — Bedingungen für — 242.
 — Einbau der — 243.
 — Ferneinschaltung der — 244.
 — bei Gleichstrommaschinen 13, 103.
 — in Kabelnetzen 247.
 — Nullspannungsauslösung 246.
 — Nullstromauslösung 246.
 — Rückstrom- 462.
 — Schnellauslösung 245.
 — Spannungsrückgangs- 462.
 — Zeitauslösung 245, 464.
 Selektivschutz 357, 421.
 Sicherheitsgrad 398, 535.
 Sicherheitsfunkenstrecke 536.
 Sicherungen (siehe auch Abschaltleistung) 246, 344, 368, 395.
 — für Batterie 51.
 — Fehlereingrenzung 240.
 — Güte der — 239.
 — Hochspannungs- 282.
 — in Kabelnetzen 248.
 — Kurzschlußleistung 239.
 — Maschennetz- 241, 248.
 — Motor- 60.
 — Staffelung 239.
 — Stromerzeuger- 51.
 — Überstrom- 240.
 Skineffekt 543.
 Spaltpol 98.
 Spannung, Maschinen-, genormte 2, 84.
 — Drehstrom- 6.
 — Einschwingen der — 318.
 — Gleichstrom- 6, 7.
 — Umkippen der — 425
 — Wiederkehrende — 318.
 Spannungsabfall-Netz (siehe auch Meßwerke) 6.
 — Längs- 216.
 — Quer- 216.
 Spannungsfahrplan (siehe auch Fahrplan) 105, 226, 357.
 Spannungskennlinie 84, 371, 420.
 Spannungsregelung 2, 274, 420.
 — Dreileiteranlage 30.
 — Maschinengröße 15.
 — selbsttätige — 93.
 — — bei Gleichstrom 14, 16.
 Spannungsregelung bei Wechselstrom 66, 78, 178.
 Spannungsresonanz (siehe Resonanz).
 Spannungsteiler 28, 29, 51, 463.
 Spannungswandler 519.
 — für Auslöser 341.
 — Eingangswindungen 443.
 — Größenbestimmung 440.
 — Sicherung für — 445.
 Speicherpumpe, Antrieb für — 114.
 Speicherwerk 220.
 Spinnereimaschinenantrieb 14.
 Spitzendeckung 39.
 Spitzenkraftwerk 176.
 Spitzenmaschinen 2, 220, 567, 586.
 Sprungwelle 385, 398.
 Spulenwicklung 155.
 Spurlager 166.
 Stabilität 275.
 — dynamische — 184, 189, 191.
 — — bei Gleichstrom 21.
 — der Erregermaschine 97.
 — -Grenze 71.
 — statische — 184.
 — — bei Gleichstrom 21.
 Stabwicklung 153.
 Staffelpfad 353, 367.
 Staffelung 367.
 — Schutz- 348.
 Stahllakkumulator 53.
 Stahlluminium 89.
 Stahlblechgehäuse, Maschinen- 118
 Ständer, Streuspannungsabfall 67.
 — -Rückwirkung 67.
 Starterbatterie 102.
 Staubkammer 128.
 Staubmenge 126.
 Steuerbatterie 53, 333.
 Steuerkabel 545.
 Steuerleitung 244, 478, 484, 491, 507, 545.
 — für Schalterantrieb 327.
 Steuern 560.
 Steuerstromkreis 34.
 Stickstofflöschung 381.
 Störungsschreiber 435.
 Stoßerregung 197.
 Stoßwelle 385.
 — genormte — 386.
 Stromabsatz 549.
 Stromlieferungsbedingungen 226.
 Strompreis 22, 569, 576, 585.
 Stromregelung 17.
 Stromwaage 224.
 Stromwächter 53.
 Stromwandler 178, 519.
 — für Auslöser 341.
 — Einbau 448.
 — Kurzschlußbeanspruchung 253, 531.
 — Kurzschlußfestigkeit 448.
 — Meßkerne 366.

- Stromwandler**, Nennbürde 447, 451.
 — Sprungwellenschutz 453.
 — thermischer Grenzstrom 304, 306, 447.
 — Überstromziffer 366, 447, 452.
 — — für Vergleichsschutz 365, 383.
 — Umschaltung 454.
 — Wanderwellenbeanspruchung 395.
Stromweiche 544.
Stromwender 5, 59, 149, 249.
Stützungsmaschine 99.
Synchronmotor 105.
Synchronoskop 212.
Synchronstromerzeuger, asynchrones
 Durcheinanderlaufen 200.
 — Ausgleichstrom 425.
 — Außertrittfallen 71, 184, 197, 201,
 356, 364.
 — Drehzahl umschaltbar 114.
 — Eigenschwingung 188.
 — Einphasen- 91.
 — Erdschlußlöschung 424.
 — Größenbestimmung 70.
 — harter — 94, 199, 256.
 — kapazitive Belastung 69.
 — Kippen des — 71.
 — Kurzschlußbeanspruchung 296, 352.
 — Kurzschlußstrom 92, 94.
 — labiler Zustand 74.
 — Leistung 66.
 — Pendeln des — 356.
 — Polumschaltung 114.
 — Schwebungen 356.
 — Selbsterregung 75, 189.
 — Spannung 81.
 — Spannungserhöhung 71, 86.
 — Spannungsregelung 82.
 — Stabilität 71, 72, 80, 99, 180.
 — Überlastung 79, 80, 368.
 — Umkippen des — 184.
 — weicher — 94, 199.
 — Widerfangen des — 197.
 — Wirkungsgrad 81, 85, 123.
Synchronuhr 435, 578.

Taktzahl 201.
Talsperrenausnutzung 114.
Tauerscheinung 138.
Taupunkt 312.
Temperatur, Maschinen (siehe Erwärmung).
 — Frischluft- 79.
 — Wicklungs- 79, 369.
Temperaturüberwachung 79, 369.
Temperaturzeiger 138.
Tilgung 555.
Tilgungszeit 556.
Toleranz 3.
Trägeregler 17.
Tränkerder 547.
Traglager 167.

Trennschalter 529.
 — Abschirmung 314.
 — Antrieb 314.
 — Ausschalten des — 314.
 — Ausschaltgeschwindigkeit 338.
 — Einschalten des — 313.
 — Hilfsschaltstücke 466.
 — Isolatoren für — 536.
 — Kurzschlußbeanspruchung 314, 531.
 — thermischer Grenzstrom 306.
Trockenfilter 128.
Trommelläufer 90.
Tuchfilter 128.
Turbostromerzeuger (siehe auch Synchronstromerzeuger) 66, 74, 91, 150.
 — Streuspannung 181.
Überkompoundierung 24.
Überlastschutz 339, 346, 368.
Überlastung, Maschinen-(siehe auch Synchronstromerzeuger) 2, 4, 5, 20, 554.
 — Batterie- 37.
 — Kurzzeitige — 2.
Überregeln 17.
Überschlag, rückwärtiger — 390.
Überspannung 342, 371, 466.
 — Höhe der — 399.
Überspannungsableiter 386.
Überschlagsspannung 533, 536.
Überspannungsschutz 405, 466, 534.
 — Anforderung an — 396.
 — Ansprechspannung 534.
 — Anprechzähler 411.
 — Auswahl des — 416.
 — bei Bahnanlagen 413.
 — Einbau des — 409.
 — bei Gleichrichtern 413.
 — in Gleichstromanlagen 413.
 — durch Kabel 165.
 — für Maschinen 81.
 — Schutzwert des — 406.
Überstrom 85.
 — Meßwerke (siehe Inhaltsverzeichnis, Fehlerschutz).
Überstromschalter für Batterie 50, 51.
Überstromschutz (siehe auch Schalter, Selbstschalter, Sicherungen) 100, 178, 197, 199, 201, 221, 339, 346.
 — Kennlinienüberschneidung 348.
 — durch Sicherungen 240.
Umformer 34, 39.
 — Frequenz — 222.
Umformerwerk 60, 485.
Umspanner 191.
 — Dreiwicklungs- 82, 262, 272.
 — als Drosselspule 279.
 — Größenbestimmung 469.
 — Kurzschlußspannung 259.
 — Nullpunktsschwingungen 412.
 — Regel- 218, 222.
 — Regelung 72.

- Umspanner, Schaltung für Erdschlußlöschung 423.
 — Spar- 261.
 — Streuender — 76.
 — Überlastung 465.
 — Verluste 90.
 — Zusatz- 218.
 Umspannwerk 54, 85, 507.
 — Schalterantrieb 325.
 — Wiedereinschaltung 334.
 Ungleichförmigkeitsgrad 202.
 Verbundbetrieb 70, 94, 99, 176, 186, 253, 346, 351, 368, 451, 481, 567.
 Verdrillung 425.
 Vergleichsschutz 365, 372, 377, 383, 452.
 — stabilisierter — 366, 372, 383.
 Verlust, Leistungs- 566.
 Versicherungen 560.
 Vertragsdauer 553, 557.
 Verwaltungskosten 551.
 Verzerrung der Spannungskennlinie: 85.
 — der Stromkennlinie 86.
 Verzinsung 548.
 Viertaktmaschine 201.
 Vorbelastung 198, 273, 349.
 Wärmeauslöser 349.
 Wärmekraftwerk (siehe Dampfturbinenkraftwerk) 176.
 Wärmepreis 561.
 Wärmewirtschaft 563.
 Wahlschutz (siehe auch Meßwerke, Selektivschutz) 198, 357, 421.
 Walzwerkbetrieb 22, 27, 56, 468.
 Wanderwelle 384, 390.
 — Dämpfung der — 394, 400
 Wandler, Beglaubigung 438.
 — Öl- 437, 442.
 — Systemprüfung 438.
 Wasserkraftanlage 39, 176, 228, 486, 487, 501, 550.
 Wasserstoffkühlung 148.
 Wasserturbinenantrieb 34, 66, 102, 112, 149, 200, 208.
 — liegende Welle 115
 — Maschinenkühlung 146.
 — stehende Welle 117, 141, 165.
 Wasserzins 563.
 Webereimaschinenantrieb 14.
 Welle, liegende s. Wasserturbinenantrieb
 — stehende s. Wasserturbinenantrieb.
 WellendrehSchwingung 150.
 Welleneigenschwingung 297.
 Wellenleitung 297.
 Wellenwiderstand 390, 399.
 Wendepole 6, 59.
 Wicklung, Asphaltierung 155.
 — Eingangsspulen 83.
 — Einfach- 91, 156.
 — Glimmentladung 156.
 Wicklung, Glimmschutz 157.
 — Mehrfach- 90
 — Ozonisierung 156.
 — Temperatur 350.
 — Versteifung 83, 296.
 Wicklungsisolierung 7.
 — Austrocknen der — 7.
 — Beanspruchung der — 77.
 Wicklungsköpfe 83, 126.
 Wicklungsschaltung bei Synchronmaschinen 91.
 Wicklungsschluß 371.
 Widerstand, spannungsabhängiger — 375, 406.
 Widerstandstern 262.
 Windungsschluß 377.
 Wirkungsgrad, Maschinen — 3, 151.
 — der Asynchronmaschine 228.
 — der Gleichstrommaschine 11.
 — Jahres- 82, 468, 561, 566.
 — -Kessel — 561.
 Wirtschaftlichkeit, allgemein 5, 176, 369, 409, 549.
 — der Antriebsmaschinen 57.
 — der Batterie 37, 41.
 — des Verbundbetriebes 176, 488, 495, 559.
 Wirtschaftsklausel 587.
 Wischer 236, 420.
 Wucht 190.
 Zahlungsplan 550.
 Zähler 178.
 — Blindverbrauchs- 573.
 — Doppeltarif- 575.
 — Eichzwang 570.
 — Größenbestimmung 573.
 — Hauptbedingungen 571.
 — Prüfung 571.
 — Rücklaufhemmung für Gleichstrom- 572.
 — — für Wechselstrom- 574.
 — Spannungswandler für — 440, 444.
 — Spitzenlast- 578.
 — Stromwandler für — 451.
 — für Summenmessung 578.
 — Überverbrauchs- 578.
 Zeitfestwert, magnetischer — 99, 101
 Zeitschreiber 437.
 Zeitstaffelschutz 360.
 Zellschalter 36.
 — Antrieb 42.
 — Doppel- 41, 46, 50.
 — Einfach- 32, 41, 44.
 — Sparschaltung 43.
 Zellschalterleiter 41.
 Zinsen 550.
 Zusatzmaschine 6, 31.
 Zusatzwerk 232.
 Zweitaktmaschine 201.
 Zwischengetriebe 161.

Druckfehlerberichtigungen.

In Gl. (66), Seite 187 ist $\sqrt{3}$ zu streichen.

Seite 415, Zeile 12 von unten muß es heißen: 6 bis 30 kV und für Freileitungen
bis 100 kV gebaut.

Seite 477, Zeile 12 von unten: (Abb. 446) statt (Abb. 428).

Seite 545, Zeile 16 von unten: Abb. 467b, nicht 461.