

Elektrische
Kraftübertragung

von

H. Kyser

Erster Band

Die elektrische Kraftübertragung

Von

Dipl.-Ing. Herbert Kyser
Oberingenieur

I. Band:

Die Motoren, Umformer und Transformatoren
Ihre Arbeitsweise, Schaltung, Anwendung
und Ausführung

Mit 277 Textfiguren und 5 Tafeln



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1912

Copyright 1912 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin. 1912
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1912

ISBN 978-3-662-01880-4 ISBN 978-3-662-02175-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-02175-0

Vorwort.

Die stetig zunehmende Verwendung des elektrischen Stromes auf allen Gebieten des öffentlichen und privaten Lebens und die zahlreichen Ausführungsmöglichkeiten für die Stromerzeugung, die Fortleitung, Verteilung und Nutzbarmachung elektrischer Energie zwingen heute den Elektro- und Maschineningenieur und auch schon den Studierenden, sich mit dem ganzen Gebiete der Starkstromtechnik nach der theoretischen, praktischen und wirtschaftlichen Seite eingehend bekannt zu machen. Nur so wird der Ingenieur unter richtiger Berücksichtigung aller Vorteile in der Lage sein, ein wirtschaftlich gutes, betriebstechnisch befriedigendes und konkurrenzfähiges Projekt zusammen zu stellen.

In dem Bestreben, hier den Ingenieur und auch den Studierenden ratend und erklärend zu unterstützen, ist das vorliegende Werk entstanden, das also gewissermaßen die praktische Seite bei der Projektierung oder Begutachtung einer Anlage oder von Teilen einer solchen behandelt. Es soll also auch anregend nach der Richtung wirken, daß durch sein Studium eine zweckmäßige und gewinnbringende Verwertung der technischen Zeitschriftenliteratur, der Besichtigung ausgeführter Anlagen usw. ermöglicht wird. Dadurch verdichtet und festigt sich zu praktisch brauchbarem Wissen namentlich für den Studierenden das auf den Hochschulen mehr theoretisch Gelehrte, das Interesse an dem von ihm erwählten Berufe wird gehoben, und er ist leichter imstande, die ersten an ihn herantretenden Aufgaben bei seinem Übertritt in die Praxis mit guten Aussichten auf Erfolg zu lösen.

In möglichst knapper Form werden nun im vorliegenden I. Bande besprochen: die Motoren aller Gattungen, die Umformer und die Transformatoren, während der II. Band die Leitungsanlagen in mechanischer und elektrischer Hinsicht, die Apparate und Instrumente und die Stromerzeugung mit den Schaltanlagen usw. umfassen wird. Diese Reihenfolge in der Stoffeinteilung ist aus dem Grunde gewählt worden, weil zunächst die Arbeitsbedingungen und die Arbeitsweise der Stromverbraucher (Elektromotoren, elektrische Öfen, Landwirtschaft usw.) bekannt sein müssen, bevor man die vorteilhafteste Stromart und Spannung als Grundlage für ein Projekt feststellen kann.

Um dem Leser im I. Abschnitte zu zeigen, z. B. welche Motorgattung zum Antriebe einer bestimmten Arbeitsmaschine die günstigste ist, wie sich Drehmoment, Drehzahl, Leistung usw. mit Rücksicht auf die anzutreibende Maschine bei wechselnder Belastung zueinander verhalten,

welche Stromart demnach zu wählen ist und ähnliches, sind jeder Motor-gattung die Grundgleichungen vorangestellt. An Hand derselben und der notwendigen charakteristischen Kurven ist die Arbeitsweise im allgemeinen, das Anlassen, Regeln usw. abgeleitet.

Der II. Abschnitt behandelt die Umformung der elektrischen Energie. Da auch hierfür verschiedene, im gegenseitigen Vergleich ganz besonders zu beachtende Ausführungen möglich sind, so sei auf das reiche Tabellenmaterial besonders hingewiesen. Ferner ist der II. Abschnitt mit einer umfassenderen Einleitung versehen, die dem projektierenden Ingenieur neben allgemeineren Gesichtspunkten auch für Erläuterungsberichte u. dgl. manche Fingerzeige geben wird.

Den größten Umfang besitzt der III. Abschnitt, der von der Transformierung handelt. Auch hier ist aus den gleichen Gründen wie beim II. Abschnitte die Einleitung ausführlicher gehalten. Eines besonderen Hinweises bedarf noch die kritische Betrachtung der Schaltungsschemata und der ausgeführten Transformatorenstationen jeden Charakters und für alle Zwecke der Benutzung.

In den einzelnen Kapiteln ist schließlich, soweit die Notwendigkeit und Zweckmäßigkeit es als wünschenswert erscheinen ließ, auf Vorhergegangenes verwiesen worden, um den Leser gewissermaßen zu zwingen, sich des früher Gesagten zu erinnern und mit dem fortschreitenden Aufbau eines größeren Projektes nichts von Vorteil außer acht zu lassen.

Von der Beschreibung einzelner Konstruktionen, der Benutzung von Katalogmaterial u. ähnl. wurde mit Rücksicht auf die allgemeine Bestimmung des Werkes gänzlich abgesehen.

So übergebe ich denn diesen I. Teil der „Kraftübertragung“ der Öffentlichkeit, und ich werde stets mit Freude alle Mitteilungen über den weiteren Ausbau des Werkes begrüßen.

Den Elektrizitätsfirmen Siemens-Schuckertwerke, Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Maschinenfabrik Oerlikon, Brown-Boveri & Cie., A.-G., sei auch an dieser Stelle nochmals für die reiche und freundliche Unterstützung bestens gedankt.

Berlin-Friedenau, April 1912.

Kyser.

Inhaltsverzeichnis.

I. Abschnitt.

Die Motoren.

	Seite
A. Die Gleichstrommotoren	1 bis 47
1. Die Arbeitsweise der Gleichstrommotoren im allgemeinen	1
2. Der Gleichstrom-Hauptstrommotor	3
3. Die Regelung des Gleichstrom-Hauptstrommotors	10
a) Die Umkehrung der Drehrichtung	10
b) Die Regelung der Drehzahl im allgemeinen	13
c) Das Anlassen	13
d) Die Reihen-Parallelschaltung	17
e) Das Zusammenarbeiten von zwei Motoren.	19
f) Die Regelung durch Änderung des wirksamen Kraftflusses Φ	20
g) Die elektrische Bremsung	21
h) Die Apparate im äußeren Stromkreise	23
4. Der Gleichstrom-Nebenschlußmotor	26
5. Die Regelung des Gleichstrom-Nebenschlußmotors	29
a) Die Umkehr der Drehrichtung	29
b) Die Regelung der Drehzahl im allgemeinen	31
c) Das Anlassen	31
d) Die Änderung der Drehzahl durch Änderung der induzierten EMK.	33
e) Die Änderung der Drehzahl durch Änderung der Erregung, also des Kraftflusses Φ	37
f) Das Zusammenarbeiten mehrerer Motoren	39
g) Die elektrische Bremsung	40
h) Die Apparate im äußeren Stromkreise	43
6. Der Gleichstrom-Compoundmotor	45
7. Die Regelung des Compoundmotors	47
B. Die Ein- u. Mehrphasen-Wechselstrom-Induktionsmotoren 48 bis 87	
8. Der Ein- und Mehrphasen-Wechselstrommotor im allgemeinen	48
9. Der asynchrone Drehstrom-Induktionsmotor	49
10. Die Regelung des asynchronen Drehstrommotors	54
a) Die Regelung der Drehzahl im allgemeinen	54
b) Das Anlaufdrehmoment	54
c) Das Anlassen des Schleifringankermotors	56
d) Die Umkehr der Drehrichtung	61
e) Das Anlassen des Kurzschlußankermotors	61
f) Das Anlassen durch Änderung der Frequenz	68
g) Die Regelung der Drehzahl durch Änderung der Schlüpfung	69
h) Die Kaskadenschaltung	70
i) Die Regelung der Drehzahl durch Änderung der Polzahl	74
k) Die Regelung der Drehzahl durch besondere Regelmaschinen	80
l) Die elektrische Bremsung	81
m) Die Apparate im äußeren Stromkreise	83
11. Der asynchrone Einphasen-Induktionsmotor	86
12. Das Anlassen und die Regelung des asynchronen Einphasenmotors	87

	Seite
C. Die Ein- u. Mehrphasen-Wechselstrom-Kollektormotoren	89 bis 111
13. Der Einphasen-Kollektormotor im allgemeinen	89
14. Der Wechselstrom-Reihenschlußmotor	90
15. Die Regelung des Wechselstrom-Reihenschlußmotors	94
16. Der Repulsionsmotor	95
17. Die Regelung des Repulsionsmotors	97
a) Das Anlassen und die Regelung	97
b) Der Doppel-Repulsionsmotor	100
c) Die Apparate im äußeren Stromkreise	100
18. Der Repulsions-Induktionsmotor	100
19. Die Regelung des Repulsions-Induktionsmotors	101
20. Der kompensierte Wechselstrom-Reihenschlußmotor (Doppelschlußmotor)	103
21. Die Regelung des kompensierten Wechselstrom-Reihenschlußmotors	105
22. Der Drehstrom-Kollektormotor im allgemeinen	106
23. Der Drehstrom-Kollektormotor mit Hauptstromcharakteristik (Reihenschlußmotor) und seine Regelung	107
24. Der Drehstrom-Kollektormotor mit Nebenschlußcharakteristik (Nebenschlußmotor) und seine Regelung	111

II. Abschnitt.

Die Umformer.

25. Der Zweck der Umformung und die Einteilung der Umformer	113
D. Der Motorgenerator	117 bis 144
26. Der Motorgenerator im allgemeinen	117
27. Der Motorgenerator mit Synchronmotor	121
a) Der Drehstrom-Synchronmotor	121
b) Der selbstanlaufende Synchronmotor	127
28. Das Anwerfen des Synchron-Motorgenerators durch eine besondere äußere Kraft	129
a) Die eigene Erregermaschine als Anwurfsmotor	129
b) Der Gleichstromgenerator als Anwurfsmotor	131
c) Der Anwurf durch einen besonderen Asynchronmotor	132
29. Der asynchrone Motorgenerator	134
30. Die Apparate im äußeren Stromkreise	138
a) Der Synchron-Motorgenerator	138
b) Der asynchrone Motorgenerator	144
E. Der Einankerumformer	146 bis 173
31. Der Einankerumformer im allgemeinen	146
32. Die Erregung und die Spannungsregelung	151
a) Die Erregung	151
b) Die Spannungsregelung mittels Drosselspulen und Streutransformatoren	153
c) Die Spannungsregelung durch Änderung der Transformatorspannung	155
d) Die Spannungsregelung mittels einer besonderen Zusatzmaschine	157
e) Die Spannungsregelung durch Benutzung von Spaltpolen	160
33. Die Arbeitsweise des Einankerumformers	161
a) Die Drehstrom-Gleichstrom-Umformung	161
b) Die Apparate im äußeren Stromkreise	167
c) Die Gleichstrom-Drehstromumformung	170
d) Die Wechselstrom-Gleichstrom- und Gleichstrom-Wechselstrom-Umformung	171
e) Der Doppelstromgenerator	172
f) Der Parallelbetrieb des Einankerumformers	173

	Seite
F. Der Kaskadenumformer	173 bis 181
34. Der Kaskadenumformer im allgemeinen	173
35. Die Arbeitsweise des Kaskadenumformers	175
a) Die Drehzahl und die Spannungsverhältnisse	175
b) Das Anlassen.	179
c) Die Spannungsregelung	180
d) Die Verwendung des Kaskadenumformers	181
36. Ausgeführte Umformeranlagen	182

III. Abschnitt.

Die Transformatoren.

G. Die Gleichstrom-Transformierung	192 bis 193
a) Motorgenerator	192
b) Teilweise Transformierung	193
H. Die Wechselstrom-Transformierung	195 bis 271
37. Die Arbeitsweise der Transformatoren im allgemeinen.	195
38. Die Schaltung der Transformatorwicklungen im allgemeinen (Innere Schaltung)	204
a) Der Einphasentransformator	204
b) Der Zweiphasentransformator	205
c) Der Dreiphasen- oder Drehstromtransformator	207
d) Das Parallelarbeiten	212
39. Die Bauart der Transformatoren im allgemeinen	215
a) Kern- und Manteltransformator	215
b) Der konstruktive Aufbau	216
c) Die Isolation des Transformators und die Kühlung im allgemeinen	217
40. Die Trockentransformatoren	218
41. Die Wärmeentwicklung und Wärmebeseitigung in Transformatorenanlagen	219
a) Die Wärmeentwicklung	219
b) Die Raumtemperatur	220
c) Die natürliche Belüftung eines Raumes	221
d) Die künstliche Belüftung eines Raumes	228
e) Die künstliche Belüftung der Transformatoren selbst	231
f) Die Berechnung der Belüftungskanäle	233
g) Die Ventilatoren	236
42. Die Öltransformatoren im allgemeinen und das Öl	241
43. Die künstliche Kühlung der Öltransformatoren	245
a) Die besondere Belüftung des Transformatorenraumes	245
b) Die Kühlung des Öles durch Berieselung der Kesselwände	248
c) Die unmittelbare Kühlung des Öles	250
44. Die besondere Schaltung von Transformatoren (Äußere Schaltung)	256
a) Die Zweiphasen-Dreiphasen-Umformung	256
b) Der Spar- oder Autotransformator	259
c) Schaltung zur Verminderung der Transformator-Leerlaufverluste	261
d) Die Benutzung von Einphasentransformatoren in Drehstromnetzen	263
45. Die Spannungsregelung in Wechselstromnetzen	264
a) Die Spannungsregelung im allgemeinen	264
b) Der Transformator mit Wicklungsunterteilung	266
c) Der drehbare Zusatztransformator (Induktions- oder Potentialregler)	271
J. Der Aufbau vollständiger Transformatorenanlagen im allgemeinen	278 bis 300
46. Das Schaltungsschema, die Apparate und die Instrumente im allgemeinen	278

	Seite
a) Das Schaltungsschema	278
b) Die Trennmesser (Trennschalter, Abschalter)	280
c) Sicherungen und Schalter	284
d) Die Verteilung der Sicherungsvorrichtungen im Schaltungsschema	288
e) Die Meßinstrumente	291
f) Der Blitz- und Überspannungsschutz	294
g) Die Sammelschienen	297
h) Der Aufbau der Schaltanlage und die Aufstellung der Transformatoren	300
K. Ausgeführte Transformatorstationen	306 bis 352
47. Transformatorstationen innerhalb vorhandener Gebäude	306
48. Selbständige Transformatorstationen für Überlandzentralen u. dgl. mit einem oder zwei Transformatoren bis etwa 15 000 Volt Überspannung	313
49. Transformatorstationen innerhalb großer Städte	322
a) Oberirdische Aufstellung der Transformatoren	322
b) Unterirdische Aufstellung der Transformatoren	322
50. Große selbständige Transformatorstationen	325
51. Masttransformatorstationen	344
a) Allgemeines über die Ausführung	344
b) Die Schaltung	346
c) Ausgeführte Stationen	348
52. Fahrbare Transformatorstationen	353
Zusammenstellung der in den Formeln verwendeten Buchstaben	359
Zusammenstellung der Zeichnungsabkürzungen	362
Alphabetisches Sachregister	364

Berichtigung.

Auf Seite 185, Zeile 32 von oben muß es heißen 45 000 Volt statt 5000 Volt.

I. Abschnitt.

Die Motoren.

A. Die Gleichstrommotoren.

1. Die Arbeitsweise der Gleichstrommotoren im allgemeinen.

Die Gleichstrommotoren, deren grundsätzliche Bauart als bekannt vorausgesetzt wird, nämlich daß sich ein mit isolierten Drähten bewickelter und mit einem Kollektor (Kommutator, Stromwender) versehener Anker in einem von Elektromagneten erzeugten Felde dreht, werden je nach der Art der Schaltung zwischen Anker (A.) und Feldwicklung (F.W.) in drei Hauptgruppen eingeteilt, und zwar in:

Hauptstrommotoren,
Nebenschlußmotoren,
Compoundmotoren.

Jede dieser drei Motorgattungen hat besondere charakteristische Eigenschaften, die derselben das Anwendungsgebiet je nach den an den Antriebsmotor zu stellenden Bedingungen zuweisen.

Der Behandlung der einzelnen Motorgattungen sollen die Grundgleichungen vorangestellt werden, die für Gleichstrommotoren allgemeine Gültigkeit haben, und aus denen man dann das Charakteristikum für die einzelnen Motorschaltungen leicht ableiten kann. Dabei soll von der Berechnung¹⁾ der Motoren abgesehen und nur das angeführt werden, was für den projektierenden Ingenieur von Wichtigkeit ist, um die Wahl des Motors je nach den vorliegenden Bedingungen für einen bestimmten Antrieb zweckentsprechend treffen zu können, und zwar in bezug auf das Verhalten von Drehzahl und Drehmoment bzw. Leistung beim Anlauf, bei Belastungs- und Spannungsschwankungen, bei der Regelung u. dgl.

Bezeichnet:

E_k die Klemmenspannung in Volt,
 E_a die im Anker induzierte elektromotorische Kraft (EMK.) in Volt,

$J = J_a + i_n$ den aufgenommenen Strom in Amper,

J_a Ankerstrom,

i_n Strom in der Nebenschlußwicklung,

$W_g = W_a + W_h + W_n$ den gesamten Motorwiderstand in Ohm,

¹⁾ Siehe E. Arnold: Die Gleichstrommaschine. 1908, Band I und II.

W_a Ankerwiderstand,
 W_h Widerstand der Hauptstromwicklung,
 W_n Widerstand der Nebenschlußwicklung,
 D_t das theoretische Drehmoment,
 D das praktische Drehmoment,
 Φ den wirksamen Kraftfluß (Kraftlinienmenge) eines Poles,
 n die Drehzahl in der Minute,
 N die Zahl der in Reihe geschalteten Ankerleiter,
 $2p$ die Anzahl der Pole,
 $2a$ die Anzahl der Ankerstromzweige,

so ist die im Anker eines Gleichstrommotors induzierte EMK.:

$$\left. \begin{aligned} E_a &= E_k - J_a \cdot W_a \\ &= \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot N \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt.} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Daraus folgt die Drehzahl:

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{N \cdot \Phi} \cdot E_a \\ &= \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{N \cdot \Phi} \cdot [E_k - J_a \cdot W_a], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

d. h. ganz allgemein: Die Drehzahl eines Gleichstrommotors ist proportional der im Anker induzierten EMK. und somit abhängig von der Klemmenspannung bzw. dem Widerstande des Ankerstromkreises.

Fließt im Anker der Strom J_a , so ist das theoretische Drehmoment des Ankers:

$$D_t = \frac{E_a \cdot J_a}{\omega} = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \cdot \Phi \cdot J_a \cdot 10^{-8} \text{ Watt}, \quad (3a)$$

oder in mkg/sec ausgedrückt:

$$D_t = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi \cdot g} \cdot \Phi \cdot J_a \cdot 10^{-8}, \quad (3b)$$

worin $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$ die Winkelgeschwindigkeit und $g = 9,81$ m/sec die

Beschleunigung durch die Erdschwere bedeutet (1 mkg/sec = g Watt).

Während in Gl. (2) die Umdrehungszahl in Abhängigkeit von der im Anker induzierten EMK. bzw. der Klemmenspannung dargestellt ist, läßt sich dieselbe auch in Beziehung bringen zum Drehmoment, was sich später bei der Beurteilung der Brauchbarkeit eines Gleichstrommotors zum Antriebe besonderer Maschinen als nützlich erweisen wird. Aus Gl. (3a) folgt:

$$n = \frac{60}{2\pi \cdot g} \cdot \frac{E_k - J_a \cdot W_a}{D_t} \cdot J_a = 0,9735 \cdot \frac{E_a \cdot J_a}{D_t} \quad (4)$$

und infolgedessen:

$$D_t = 0,9735 \frac{E_a \cdot J_a}{n} \quad (5)$$

Das theoretische Drehmoment kann der Motor nun aber nicht entwickeln. Eine Reihe von Verlusten mechanischer, elektrischer und magnetischer Natur bedingen, daß das praktische oder Nutzdrehmoment D kleiner ist als das theoretische. Die mechanischen Verluste sind die Folge der Lager-, Luft- und Bürstenreibung, während die elektrischen Verluste durch Stromwärme, Hysteresis und Kommutation und die magnetischen durch Ankerrückwirkung und Wirbelströme hervorgerufen werden. Man bezeichnet das Verhältnis von praktischem zu theoretischem Drehmoment als das Güteverhältnis des Motors, also:

$$g_m = \frac{D}{D_t} < 1.$$

Somit geht die Gl (5) über in die Form:

$$D = g_m \cdot D_t = 0,9735 \cdot g_m \frac{E_a \cdot J_a}{n} \quad (6)$$

Das Drehmoment ist also unabhängig von der Klemmenspannung, wenn man von dem vernachlässigbaren Einfluß letzterer auf g_m absieht.

Die Nutzleistung schließlich, die vom Motor abgegeben werden kann, ist bekanntlich:

$$L_M = \frac{E_k \cdot J}{736} \cdot \eta_M \text{ PS}, \quad (7)$$

η_M = Wirkungsgrad des Motors,

und die aufgenommene elektrische Energie:

$$L_M^0 = \frac{E_k(J_a + i_n)}{1000} = \frac{\text{PS}}{1,36 \cdot \eta_M} \text{ KW}. \quad (8)$$

Diese Grundgleichungen genügen, um nun die drei Motorgattungen hinsichtlich ihrer ihnen eigentümlichen Arbeitsweise zu untersuchen.

2. Der Gleichstrom-Hauptstrommotor.

Beim Hauptstrommotor (Fig. 1) liegen Anker (A.) und Magnetwicklung (H.W.) in Reihe miteinander; daraus folgt ohne weiteres, daß die Stärke des Kraftflusses Φ bzw. die Erregung vom Strome $J = J_a$, also von der Belastung des Motors abhängig ist. Die Gl. (1) geht über in die Form:

$$\left. \begin{aligned} E_a &= E_k - J_a(W_a + W_h) \\ &= k_1 \cdot n \cdot \Phi \\ k_1 &= \frac{p}{a} \cdot \frac{N \cdot 10^{-8}}{60}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

oder da $\Phi = f(J)$, wird:

$$E_a = k_1 \cdot n \cdot f(J), \quad (10)$$

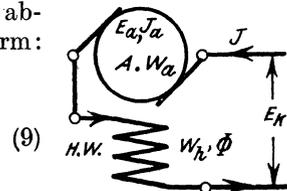


Fig. 1. Stromlaufschema des Gleichstrom-Hauptstrommotors.

und es ist somit die Drehzahl:

$$n = \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{N} \cdot \frac{E_k - J_a(W_a + W_h)}{\Phi} = k_2 \cdot \frac{E_a}{\Phi} \left. \vphantom{n} \right\} \quad (11)$$

$$k_2 = \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{N}.$$

Die Gl. (11) besagt also, daß beim Hauptstrommotor die Umdrehungszahl mit wachsender Belastung selbsttätig abnimmt, weil mit zunehmendem Strome J der Kraftfluß Φ steigt und die induzierte EMK. E_a abnimmt, und umgekehrt.

Das Drehmoment ergibt sich nach Gl. (3) und (6):

$$D = k_3 \cdot \Phi \cdot J_a = k_3 \cdot f(J) \cdot J_a \left. \vphantom{D} \right\} \quad (12)$$

$$k_3 = g_m \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi \cdot g} 10^{-8},$$

also wächst dasselbe anfangs mit dem Quadrate des Stromes, und wenn das Eisen sich zu sättigen anfängt, etwas langsamer; oder wenn man nach Gl. (6) das Drehmoment in Abhängigkeit von der Drehzahl bringt, so findet man:

$$D = 0,9735 \cdot g_m \frac{E_a \cdot J_a}{n} \quad (13)$$

d. h. es steigt mit der Belastung, indessen nicht proportional, sondern infolge der zunehmenden Verluste in etwas geringerem Maße.

Zusammengefaßt liegt demnach das Charakteristikum des Gleichstrom-Hauptstrommotors darin, daß derselbe mit wachsender Belastung in der Drehzahl ab- und an Drehmoment selbsttätig zunimmt, und umgekehrt. Umdrehungszahl und Drehmoment stellen sich also ohne äußeres Zutun nach der jeweiligen Belastung ein, demnach auch im Augenblicke des Anlaufes, so daß das Anlaufdrehmoment groß ist, oder, wie weiter unten gezeigt werden wird, auf jeden — selbstverständlich durch die Motorgröße begrenzten — Wert eingestellt werden kann.

Für manche Fälle wird es erwünscht sein, statt des Drehmomentes die Zugkraft zu kennen, die der Motor entweder an der Welle oder bei gegebenem Übersetzungsverhältnis z. B. am Umfange einer Seiltrommel zu entwickeln imstande ist. Bezeichnet r den Halbmesser des Ankers in Metern, so ist die Zugkraft:

$$Z = \frac{D}{r} \text{kg}, \quad (14)$$

bzw. ist u das Übersetzungsverhältnis zwischen Motorwelle und Vorgelegewelle, also:

$$u = \frac{\text{Umdrehungszahl des Triebes}}{\text{Umdrehungszahl des Zahnrades}},$$

$$= \frac{\text{Zähnezahl des Zahnrades}}{\text{Zähnezahl des Triebes}},$$

$$= \frac{\text{Umdrehungszahl der Motorwelle}}{\text{Umdrehungszahl der Vorgelegewelle}},$$

so ist:

$$Z = \left. \begin{aligned} & \frac{u \cdot D}{r_s} \eta_u \\ & = \frac{2u \cdot D}{d_s} \eta_u; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

η_u = Wirkungsgrad des Vorgeleges (der Übersetzung),

r_s = Halbmesser der Seiltrommel in m,

d_s = Durchmesser der Seiltrommel in m.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Seiltrommel ist dann:

$$v_s = \frac{2 \cdot r_s \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot u} \text{ m/sec.} \quad (16)$$

Die Nutzleistung schließlich folgt aus dem Produkte von Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit zu:

$$L_M = \left. \begin{aligned} & \frac{D \cdot \omega}{75} = \frac{g_m}{9,81 \cdot 75 \cdot 60} \cdot \frac{p \cdot N \cdot n}{a} \cdot J_a \cdot 10^{-8} = \\ & = \frac{E_a \cdot J_a}{736} = \frac{[E_k - J_a(W_a + W_h)]J_a}{736} = \\ & = \frac{E_k \cdot J}{736} \eta_M \text{ PS,} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

und die aufzuwendende elektrische Energie:

$$L_M^0 = \frac{736 \cdot \text{PS}}{1000 \cdot \eta_M} \text{ KW.} \quad (18)$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen kann vollständig geprüft werden, ob für einen bestimmten Fall des elektrischen Antriebes der Hauptstrommotor den gestellten Arbeitsbedingungen genügt.

Alles das bisher durch Gleichungen zur Darstellung Gebrachte läßt sich auch in Form von Schaulinien behandeln, die man die charakteristischen Kurven des Motors nennt, und die die Abhängigkeiten zwischen n , D , E , η_M usw. noch einfacher und deutlicher erkennen lassen.

Um die Änderung der Drehzahl und des Drehmomentes mit der Belastung bzw. dem Strome J zu zeigen, sind zunächst in Fig. 2 und 3 die diesen entsprechenden Schaulinien dargestellt, während in Fig. 4 das vollständige Motordiagramm wiedergegeben ist. Nicht immer jedoch werden diese Kurven, die zur Beurteilung der Arbeitsweise eines Hauptstrommotors von besonderer Bedeutung und notwendig sind, im ganzen vorhanden sein. Man muß deshalb die eine aus der anderen entwickeln, und da bieten die elektrischen Verhältnisse ein sehr bequemes Mittel, um leicht und schnell zum Ziele zu kommen. Bekannt müssen nur sein: die Magnetisierungskurve¹⁾, die Drehzahl bei der

¹⁾ Die Magnetisierungskurve oder auch Leerlaufcharakteristik ist diejenige Kurve, welche bei der Bürstenstellung in der neutralen Zone, unveränderter Drehzahl und der Belastung Null die im Anker induzierte EMK. in Abhängigkeit von dem Erregerstrom darstellt.

experimentellen Aufnahme derselben und der Motorwiderstand $W_g = W_a + W_h$, wobei jedoch in W_h auch der Übergangswiderstand an den Bürsten berücksichtigt sein muß.

Die zeichnerische Ermittlung der Drehzahlkurve (n n Kurve in Fig. 2) geschieht auf folgende Weise: In einem rechtwinkligen Koordinatensystem, in welchem in Richtung der Ordinaten die Spannung E bzw. der Kraftfluß Φ und in Richtung der Abscissen die Stromstärke J abgetragen sind, wird die als unveränderlich vorausgesetzte Klemmenspannung E_k dargestellt durch eine Gerade, gegen die die im Anker

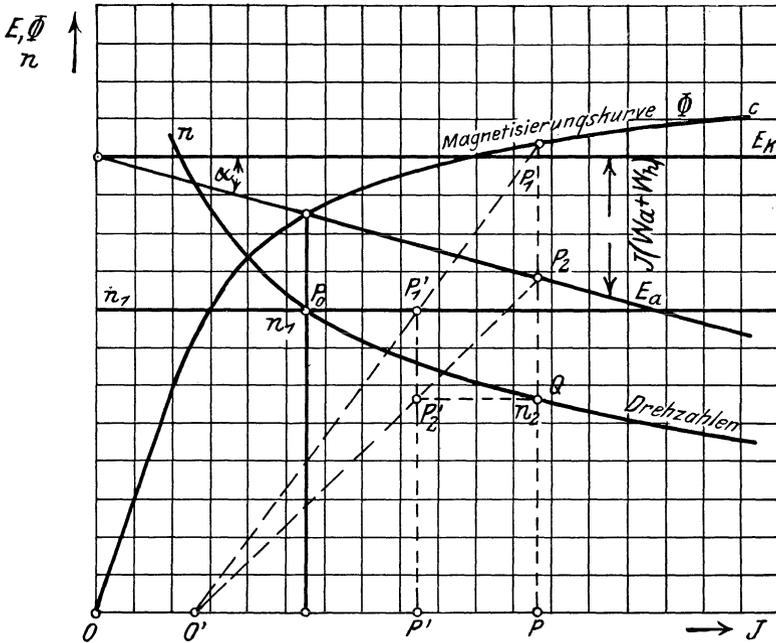


Fig. 2. Drehzahlkurve des Gleichstrom-Hauptstrommotors.

induzierte EMK. $E_a = E_k - J_a(W_a + W_h)$ um einen Winkel α geneigt ist, dessen:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{J_a(W_a + W_h)}{J_a} = W_a + W_h.$$

Die zwischen den Geraden für E_k und E_a liegenden Ordinatenabschnitte geben somit den Spannungsabfall im Motor bei bestimmtem Belastungsstrom J an. Die Magnetisierungskurve, die bei einer Drehzahl n_1 aufgenommen sei, werde dargestellt durch die Kurve Oc in Fig. 2. Aus Gl. (11) folgt nun:

$$n_1 = \frac{E_{a_1}}{\Phi_1},$$

oder für jeden anderen Wert:

$$n_2 = \frac{E_{a_2}}{\Phi_2},$$

d. h. die Drehzahlen verhalten sich bei einem bestimmten Werte für den Kraftfluß Φ oder den Strom J wie die im Anker induzierten EMKe. E_a . Dieses Verhältnis läßt sich zeichnerisch leicht verwerten (Fig. 2). Wählt man auf der Abscissenachse einen Punkt O' beliebig, verbindet diesen mit den einer beliebigen Stromstärke J — Punkt P auf der Abscissenachse — entsprechenden Punkten P_1 und P_2 auf der Magnetisierungskurve und der Geraden für die induzierte EMK. E_a , zieht von dem Schnittpunkte der durch den Punkt P_0 , der der bekannten Umdrehungszahl n_1 entspricht, parallel zur Abscissenachse gelegten Geraden mit $O'P_1$ (Punkt P'_1) eine Senkrechte bis zum Schnitt mit $O'P_2$ und überträgt diesen Punkt P'_2 parallel zur Abscissenachse auf die Gerade PP_1 , so ist der gefundene Punkt Q ein Punkt der Drehzahlkurve nn . Durch Wiederholung dieses Verfahrens für eine Reihe anderer Punkte der Φ - und E_a -Kurve, also andere Ströme J , kann die nn -Kurve vollständig ermittelt werden.

Aus Fig. 2 folgt zum Beweise ohne weiteres:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{PP_2}{PP_1} = \frac{P'P'_2}{P'P'_1} = \frac{P'P'_2}{n_1},$$

also:

$$P'P'_2 = PQ = n_2.$$

Der Verlauf der Drehzahlkurve läßt erkennen, daß n mit wachsender Belastung, also zunehmender Stromstärke J , abnimmt und bei Entlastung steigt, bis die Umdrehungszahl bei Leerlauf theoretisch unendlich wird bzw. praktisch einen Wert annimmt, dem das Material des Ankers, die Befestigung der Wicklungen usw. nicht gewachsen sind. Man sagt, der Motor „geht durch“. Es darf daher ein Hauptstrommotor niemals völlig entlastet oder ohne Last angelassen werden. Begründet ist diese Erscheinung darin, daß mit abnehmendem Strome die Sättigung der Magnete, wie dieses auch aus dem Verlaufe der Magnetisierungskurve hervorgeht, rasch abnimmt, und dadurch dem Ankerfelde kein genügend starkes Magnetfeld mehr gegenübersteht.

Weiter von besonderem Interesse ist die Drehmomentkurve, um überblicken zu können, wie sich das Drehmoment beim Anlauf, bei Belastungsänderungen bzw. bei Schwankungen in der Drehzahl des Motors verhält. Nach Gl. (12) ist:

$$D = k_3 \cdot \Phi \cdot J_a,$$

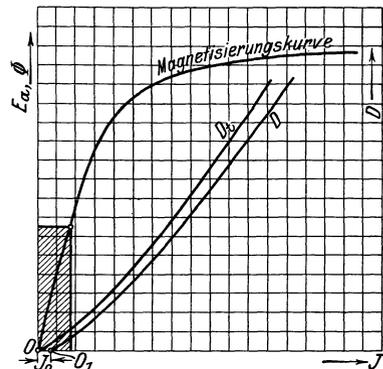


Fig. 3. Drehmomentkurven des Gleichstrom-Hauptstrommotors.

also proportional dem Inhalte eines Rechteckes, dessen Seiten Φ und J_a bilden (Fig. 3). Ermittelt man aus dieser Gleichung für verschiedene Punkte der Φ -Kurve die Werte, so kann die D -Kurve unter Berücksichtigung der Konstante in passendem Maßstabe gezeichnet werden. Die Kurve des praktischen Drehmomentes D beginnt aber nicht im Koordinatenursprunge, sondern in einem Punkte O_1 , entsprechend dem im Leerlaufe auszuübenden Drehmomente bei einem Leerlaufstrom J_0 .

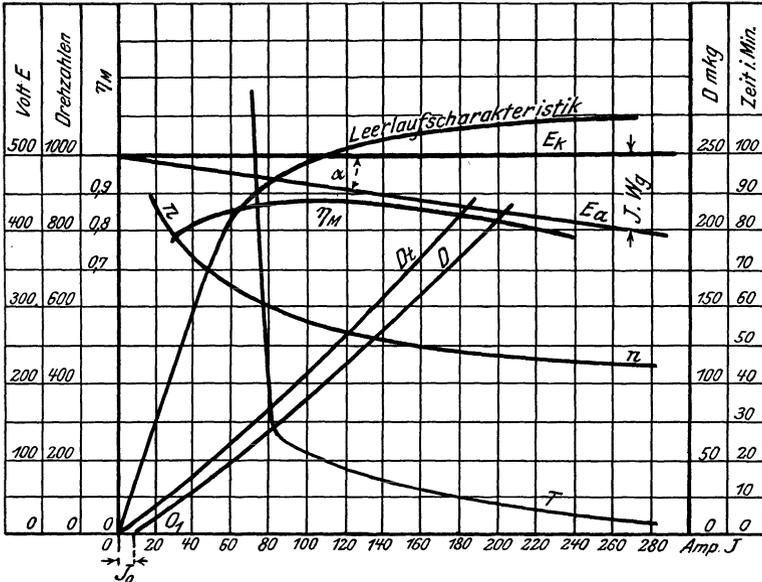


Fig. 4. Vollständiges Motordiagramm für den Gleichstrom-Hauptstrommotor.

In Fig. 4 schließlich sind alle wissenswerten Schaulinien für E_k und E_a , n , D_t und D und η_M zusammengestellt, die somit eine vollständige Einsicht in die Arbeitsweise des Hauptstrommotors gestatten.

Dienen die Motoren zum Antriebe solcher Maschinen, die nur intermittierend arbeiten, d. h. die nicht dauernd mit Vollbelastung im Betriebe sind (Dauerbetrieb), sondern bei denen nach jeder Arbeitsperiode eine Ruhepause eintritt (Hebezeuge), so ist wohl ohne weiteres einzusehen, daß derartige Motoren mit wesentlich höheren Leistungen beansprucht werden können als für den Dauerbetrieb, weil sie nach einer Arbeitsperiode Zeit haben, sich wieder abzukühlen. Jeder Motor erwärmt sich naturgemäß beim Stromdurchgange und erreicht nach einer bestimmten Zeit eine Temperatur über derjenigen der umgebenden Luft, die zumeist nach den Vorschriften des V. D. E.¹⁾ fest-

¹⁾ Siehe Normalien für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (V. D. E.).

gesetzt wird und 50° Cels. beträgt. Der stationäre Zustand ist erreicht, wenn der Motor diese Temperatur im Dauerbetriebe angenommen hat. Ist nun der Betrieb ein intermittierender, so wird der Motor in der nach Minuten zählenden Arbeitsperiode selbst bei Vollbelastung die höchste Übertemperatur nicht erreichen können, weil inzwischen schon eine Ruhepause eingetreten ist, in der er sich abkühlen kann. Es bauen aus diesem Grunde auch alle Firmen besondere Motoren für intermittierenden Betrieb, sog. Kranmotoren, um dadurch kleinere, im Gewichte leichtere und damit billigere Modelle für solche Betriebsverhältnisse verwenden zu können.

Die Belastung kann in diesem Falle um so größer sein, je länger die Pausen im Vergleich zu den Arbeitszeiten sind, und zwar ist dieselbe dann nur begrenzt durch die Erwärmung der Wicklungen und des Eisens des Motors, abgesehen vom Feuern der Bürsten auf dem Kommutator, das durch entsprechende Mittel (Wendepole) beseitigt werden kann. Die Erwärmung der Wicklungen darf naturgemäß eine bestimmte, durch die Widerstandsfähigkeit der verwendeten Isolationsmaterialien gegebene Grenze nicht überschreiten. Für die Wahl der Motorgröße in solchen Betrieben ist demnach der Grad der Intermittenz maßgebend. Als die „Leistung bei intermittierendem Betriebe“ ist, um diesen Begriff eindeutig festzulegen, diejenige von dem V. D. E.¹⁾ festgesetzt worden, die vom Motor eine Stunde lang abgegeben werden kann, ohne daß dabei die zulässige Temperatur der Wicklungen überschritten wird. Man bezeichnet diese Leistung als Stundenleistung.

So bedienen sich z. B. die Siemens - Schuckert - Werke folgenden Verfahrens zur Ermittlung der Motorgröße:

Bezeichnet a_M die Arbeitszeit und r_M die Ruhepause, während welcher der Motor ganz ausgeschaltet ist, so ist der Quotient:

$$\frac{a_M + r_M}{a_M}$$

ein Maß für den Grad der Intermittenz. Z. B. kann im normalen Kranbetriebe erfahrungsgemäß die Pause doppelt so lang angenommen werden wie die Arbeitszeit, so daß also:

$$\frac{a_M + r_M}{a_M} = 3 .$$

Ist $\frac{a_M + r_M}{a_M} < 3$, so muß das Drehmoment entsprechend niedriger angenommen, ist $\frac{a_M + r_M}{a_M} > 3$, so kann es über das normale erhöht werden, mit welchem der Motor ohne die festgesetzte Übertemperatur²⁾ zu überschreiten beliebig lange intermittierend belastet werden darf,

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 8.

²⁾ Mit „Übertemperatur“ bezeichnet man die Erhöhung der Temperatur des Motors über diejenige der umgebenden Luft (Raumtemperatur).

wenn $\frac{\alpha_M + r_M}{\alpha_M} = 3$ ist. Die Leistung berechnet sich hierbei nach Gl. (17), wenn D in mkg ausgedrückt wird:

$$L_M = \frac{2\pi \cdot n}{60 \cdot 75} D = \frac{n \cdot D}{716} \text{ PS.}$$

Für diese „Belastungsfähigkeit“ ergibt sich eine Kurve, die in Fig. 5 abgebildet ist und für „offene“ Motoren Gültigkeit hat. Bei vollständig gekapselten, sog. „geschlossenen“ Motoren, bei denen das

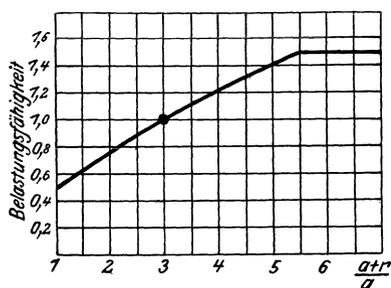


Fig. 5.

Motorinnere gegen das Eindringen von Staub, Feuchtigkeit, unreiner Luft usw. durch eine entsprechende Ausbildung der Lagerschilder oder Gehäuse-Seitenverkleidungen geschützt ist, hat diese Kurve naturgemäß einen anderen Verlauf, weil die Abführung der im Innern des Motors erzeugten Wärme nicht durch die natürliche Luftzirkulation erfolgt, sondern lediglich durch die

äußere Abkühlung des Gehäuses vor sich geht, also eine beschränkte ist.

Um die Temperaturverhältnisse eines Motors deutlicher zur Anschauung zu bringen, ist in Fig. 4 auch eine Zeitkurve T^1) eingetragen, aus deren Verlauf man sofort erkennen kann, wieviel Minuten ein Motor mit einer bestimmten Stromstärke laufen darf, ohne eine gewisse Temperatur zu überschreiten.

3. Die Regelung des Gleichstrom-Hauptstrommotors.

Das hinsichtlich der Regelung des Hauptstrommotors zu Besprechende erstreckt sich auf die Umkehrung der Drehrichtung (Reversieren), das Anlassen und eine gewollte, künstliche Änderung der Drehzahl, sowie das Bremsen. Von den zahlreichen Regelungsarten sollen hier jedoch nur die in der Praxis häufiger zur Anwendung kommenden behandelt werden.

a) Die Umkehrung der Drehrichtung. Die Richtung des Umlaufes ist bekanntlich abhängig von der Richtung des Stromes in der Feldwicklung und im Anker. Wird eine dieser geändert, also entweder diejenige in der Magnetwicklung oder diejenige im Anker, dann läuft der Motor in einem dem ursprünglichen entgegengesetzten Drehsinne. Es ist üblich, letzteren auf die Riemenscheibe des Motors gesehen mit „Rechtslauf“ zu bezeichnen, wenn er im Sinne des Uhrzeigers verläuft (Fig. 6), und mit „Linkslauf“, wenn er entgegengesetzt gerichtet ist (Fig. 7).

¹⁾ Näheres über die Berechnung derselben siehe E. Arnold: Die Gleichstrommaschine und Müller-Mattersdorf: Die Bahnmotoren.

Die Änderung der Stromrichtung in der Magnetwicklung wird in der Praxis so gut wie gar nicht angewendet; sie ist bei solchen Motoren,

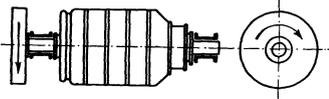


Fig. 6. Rechtslauf eines Motors.

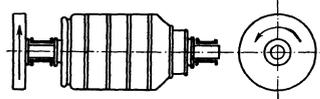
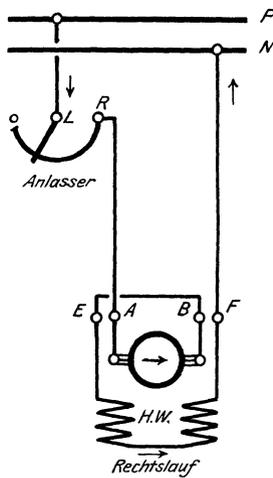


Fig. 7. Linkslauf eines Motors.

die oft und schnell umgesteuert werden müssen, grundsätzlich zu verwerfen, weil die Umkehrung des Magnetfeldes infolge der Selbstinduktion



eines Gleichstrom-Hauptstrommotors.
Fig. 8.

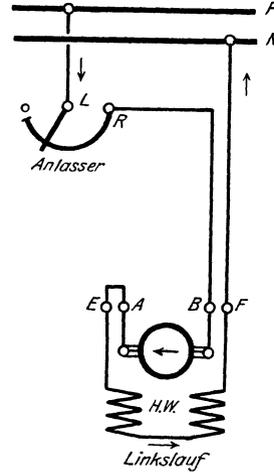


Fig. 9.

Zeit und Energie kostet. Wird der Motor beim Umschalten als Bremse benutzt, worauf weiter unten noch besonders eingegangen werden wird, dann ist die Umkehrung des Magnetfeldes ganz besonders zu vermeiden, um den remanenten Magnetismus der Pole für die Bremsung nicht zu vernichten. Die Änderung der Stromrichtung soll vielmehr stets im Ankerstromkreise vorgenommen werden. In Fig. 8 und 9 sind die Stromlaufschemas und in Fig. 10 die Schaltung mit Hilfe eines Umschalters gezeichnet.

Bei schweren und unregelmäßigen Betriebsverhältnissen mit starken Überlastungen, also z. B. bei Hebezeugen, Bahnmotoren usw., sind die Motoren mit Wendepolen auszurüsten. Letzteren fällt die Aufgabe zu, die Kommutation zu verbessern, um das

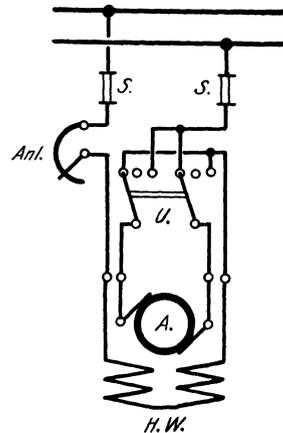


Fig. 10. Drehrichtungsänderung beim Gleichstrom-Hauptstrommotor.

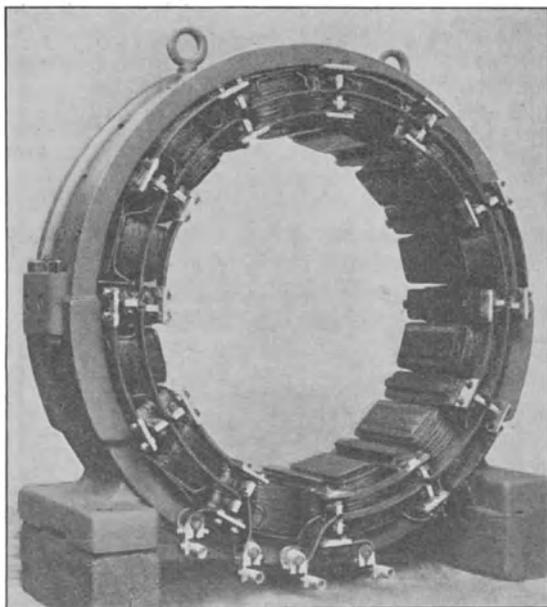
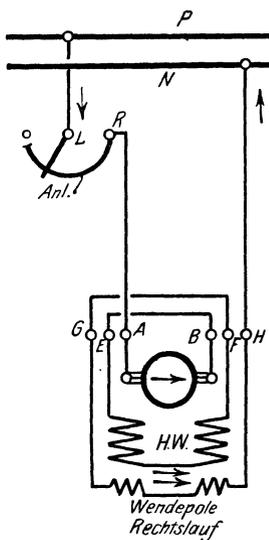


Fig. 11. Motorgehäuse mit Haupt- und Wendepolen.

schädliche „Bürstenfeuer“ bei Überlastungen, durch das der Kommutator und die Bürsten außerordentlich stark angegriffen werden, zu verhindern. Unter solchen Wendepolen sind kleine Hilfspole zwischen den Hauptpolen der Maschine zu verstehen, die vom Ankerstrom ebenfalls durchflossen werden und zu dem Hauptfeld der Magnetpole noch ein zusätzliches Feld erzeugen. Neuerdings wird von diesen Wendepolen auch bei Motoren, die mit hoher Spannung und hohen

Umdrehungszahlen laufen, und insbesondere wenn sie häufiger umgesteuert werden müssen, sehr weitgehender und befriedigender Ge-



eines Gleichstrom-Hauptstrommotors.
Fig. 12.

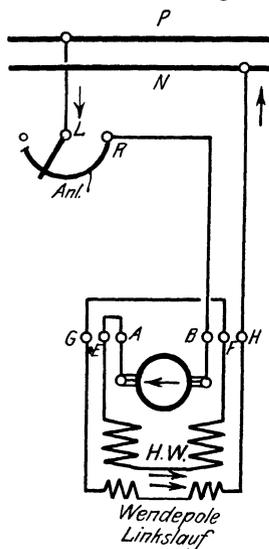


Fig. 13.

brauch gemacht. Fig. 11 zeigt ein Motorgehäuse, in das zwischen den Magnetspulen derartige Wendepole eingebaut sind. Für solche Motoren hat die Umkehrung der Drehrichtung nur durch Änderung der Richtung des Stromes im Anker nach Fig. 12 und 13 zu erfolgen. Zur Drehrichtungsänderung bedient man sich auch hier eines einfachen Umschalters.

b) Die Regelung der Drehzahl im allgemeinen. Die Gleichungen für die Drehzahl und das Drehmoment lauteten [Gl. (11) und (12)]:

$$n = \frac{\alpha}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{N} \cdot \frac{E_k - J_a(W_a + W_h)}{\Phi},$$

$$D = g_m \frac{p}{\alpha} \cdot \frac{N}{2\pi \cdot g} \cdot \Phi \cdot J_a 10^{-8}.$$

Unter der Voraussetzung gleichbleibender Klemmenspannung (Netzspannung) E_k kann also nach Gl. (11) eine Regelung der Drehzahl — Anlassen und Drehzahlerhöhung bzw. -verminderung — erfolgen durch Änderung:

- 1) der Polzahl p ,
- 2) der Anzahl der Ankerleiter N ,
- 3) des Gesamtwiderstandes $W_g = W_a + W_h$,
- 4) des wirksamen Kraftflusses Φ .

Die unter 1) und 2) genannten Möglichkeiten haben in der Praxis so gut wie keinen Eingang gefunden, und es sollen infolgedessen nur die nach 3) und 4) eingehender behandelt werden.

Für die Zwecke des Arbeitsmaschinenantriebes wird in der Regel nur stets ein Motor für je eine Arbeitsverrichtung zur Anwendung kommen, und dabei eine Änderung der Drehzahl durch besondere Mittel für den Hauptstrommotor nicht notwendig sein. Immerhin finden sich jedoch bei Transport- und Hebevorrichtungen, Verladebrücken, Rollgängen u. dgl. unter Umständen Verhältnisse, die es wünschenswert erscheinen lassen, zwei Motoren für einen Bewegungsvorgang zu benutzen, und es wird daher die Regelung auch für diesen zweiten Fall mit in die Betrachtung gezogen werden.

c) Das Anlassen. Das Anlassen erfolgt heute fast ausschließlich durch Änderung des Gesamtwiderstandes W_g . Schaltet man dem Motor einen Widerstand W_v vor, so wird die Umdrehungszahl:

$$n = k_2 \cdot \frac{E_k - J(W_a + W_h + W_v)}{\Phi} \cong k_2 \cdot \frac{E_k - J(W_a + W_h)}{J} - k_2 \cdot W_v, \quad (19)$$

$$[J_a = J; \quad \Phi = f(J)],$$

und es gibt $k_2 \cdot W_v$ die Verminderung der Umdrehungszahl an, die durch den Vorschaltwiderstand hervorgerufen wird. Hieraus folgt eine für den Betrieb außerordentlich wichtige Erscheinung, und zwar daß ein Hauptstrommotor bei vollständiger Entlastung auch dann durchgeht, wenn der Anlasser vorgeschaltet ist, denn $k_2 \cdot W_v$ ist unabhängig von der Stromstärke. Man darf daher einen

Hauptstrommotor nicht nur nicht leerlaufen lassen, sondern ihn auch niemals ohne Belastung anlassen. Wählt man W_v so groß, daß:

$$J(W_a + W_h + W_v) = E_k,$$

dann wird $n = 0$.

Für den Anlauf gilt nun folgendes: Die Stromstärke, die im Augenblicke des Anlassens auftritt, ist bestimmt durch das Anlaufdrehmoment:

$$D_A = \left[\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi \cdot g} \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \right] J_A > D_R + D, \quad (20)$$

g_m wird hier = 1, so daß die Anlaufstromstärke:

$$J_A > \frac{2\pi \cdot g \cdot 10^8}{N \cdot \Phi} \cdot \frac{a}{p} (D_R + D), \quad (21)$$

worin D_R das Drehmoment zur Überwindung der Reibung der Welle in den Lagern (Reibung der Ruhe) bezeichnet. Es wird demnach beim Anlauf eine bedeutende Stromstärke auftreten, die sich ihrer Größe nach zusammensetzt aus der Stromstärke, die zur Überwindung des äußeren Drehmomentes notwendig ist, und derjenigen für das Reibungsdrehmoment. Auf solche Stromstöße ist, wie schon hier kurz bemerkt sein soll, bei der Wahl der Stromerzeugungsmaschinen des Kraftwerkes, besonders wenn es sich um kleinere Anlagen mit Gas- oder Rohölmotorenantrieb u. dgl. (Dieselmotoren, Benzin usw.) handelt, Rücksicht zu nehmen, denn die hohe Stromstärke ist bedingt durch das vom Motor verlangte Drehmoment, das jede gewünschte Größe erreichen kann. Gerade in diesem Umstande, mit hohem Drehmomente auch anlaufen zu können, liegt einer der bedeutendsten Vorzüge des Hauptstrommotors.

Um den Motor nun vom Stillstande allmählich auf seine Betriebsdrehzahl zu bringen und die Stromstärke dabei auf ein bestimmtes, zulässiges Maß zu begrenzen, schaltet man den Widerstand W_v und zwar mit veränderlicher Größe vor. Da aber W_v von seinem Maximalwerte bis auf Null praktisch nicht gleichmäßig abnehmen kann, muß der Vorschaltwiderstand in mehrere Stufen unterteilt werden. Die Stromstärke wird infolgedessen zwischen zwei Grenzen schwanken, von denen die eine — J_{\max} — gleich ist der Anlaufstromstärke, und die zweite so bestimmt sein muß, daß einmal die Stromschwankung J_{\max} bis J_{\min} und der damit verbundene Spannungsabfall in der Zuleitung bzw. die Beanspruchung des Kraftwerkes nicht zu groß wird, und ferner die Zunahme der Drehzahl von Anlaßstufe zu Anlaßstufe nicht zu stark ausfällt. Letzteres könnte unter Umständen für die angetriebenen Maschinen schädlich oder gefährlich sein. Selbstverständlich sollen aber die Anlasser andererseits nur möglichst wenige Stufen besitzen, damit man tunlichst rasch auf die Betriebsdrehzahl kommt und dadurch nicht nur an unnötigem Stromverbrauche, sondern auch an Zeit spart, was z. B. im Kranbetriebe oft recht bedeutend ins Gewicht

fällt. Es wird naturgemäß im Anlasser durch den vorgeschalteten Widerstand elektrische Energie in Wärme umgewandelt, also nutzlos verbraucht, und diese Energie ist vom Kraftwerke über die tatsächlich in mechanische Arbeit umgeformte zu liefern, infolgedessen auch zu bezahlen. Wenn dieses auch in solchen Betrieben, in denen die Motoren nur wenige Male am Tage angelassen werden, keine besondere Rolle spielt, so kann es bei häufiger Benutzung des Anlassers unter Umständen doch merklich ins Gewicht fallen. Das gilt namentlich dann, wenn der Strom z. B. von einem fremden Elektrizitätswerke oder einer Überlandzentrale bezogen wird.

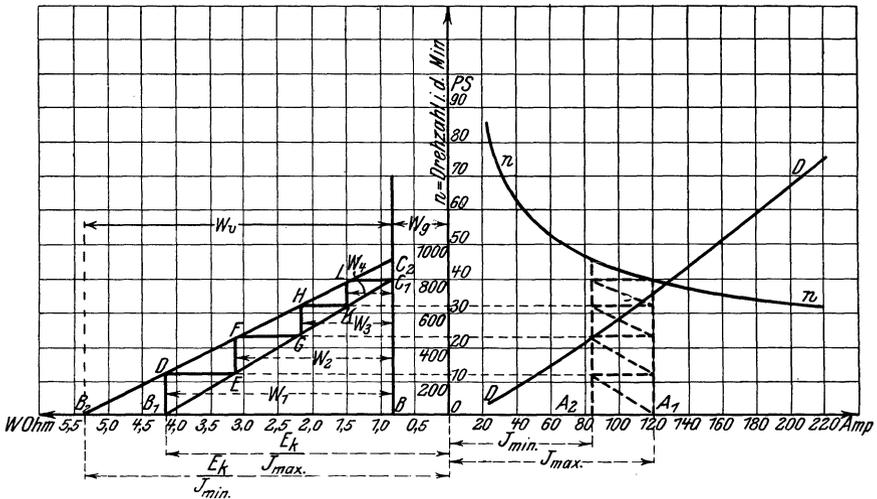


Fig. 14. Anlaßdiagramm für einen Gleichstrom-Hauptstrommotor.

In Fig. 14 ist der Vorgang beim Anlassen eines Hauptstrommotors in einem Schaubilde zur Darstellung gebracht, und zwar unter Zugrundelegung des Schaltungschemas Fig. 15 für einen Hebezeugmotor mit Drehrichtungsänderung. Das Anlassen, Umsteuern und ferner in Fig. 16 auch das Bremsen wird mit nur einer Anlaßwalze (Steuerwalze, Anlasser) vorgenommen. Wird die Steuerwalze nach Schließen des Schalters *Sch.* und des selbsttätigen Höchststromschalters *Sch._{max}* in die Stellung „vorwärts I“ gebracht, so fließt der Strom von *P* über *b* nach *0*, durch den ganzen Widerstand (W_1, W_2, W_3, W_4) über *A* nach dem Motor, von *B* über *z* zur Magnetwicklung und von dieser zur negativen Sammelschiene *N*. Dadurch, daß nun die Walze nacheinander auf die Kontakte 2 bis 5 gebracht wird, wird der Widerstand stufenweise abgeschaltet, bis schließlich in der Stellung 5 der Motor unmittelbar am Netz liegt.

Die Fig. 14 zeigt den Verlauf des Anlassens in folgender diagrammatischer Form: Sind die Stromstärken $J_{max} = 0 A_1$ und $J_{min} = 0 A_2$ festgesetzt und infolgedessen die Größe des Gesamtwiderstandes

$W_g = W_a + W_h + W_v$ bekannt, dann tritt auf Stellung 1 der Steuerwalze (Fig. 15) die Stromstärke J_{\max} auf. Der Motor beginnt, sich zu drehen, die Gegen-EMK. steigt und die Stromstärke sinkt auf J_{\min} . Wird nun auf Kontakt 2, 3... übergegangen, also W_v nacheinander verringert, was in der linken Seite der Fig. 14 zum Ausdruck kommt, so wiederholt sich das Spiel des Anwachsens und Abnehmens von J und des Steigens der Drehzahl, bis schließlich auf Punkt 5 der Motor auf der Drehzahlkurve n arbeitet. Das Drehmoment sinkt dabei von seinem höchsten Werte und steigt wieder aber nur in dem Maße, wie sich die Stromstärke zwischen den Punkten A_1 und A_2 ändert.

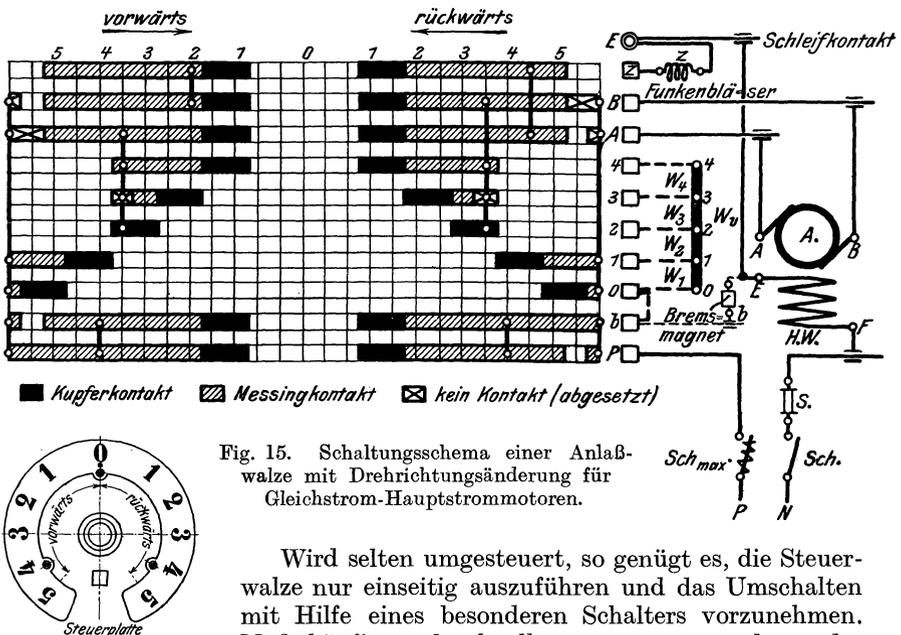


Fig. 15. Schaltungs- und Steuerwalzenschema einer Anlaufwalze mit Drehrichtungsänderung für Gleichstrom-Hauptstrommotoren.

Wird selten umgesteuert, so genügt es, die Steuerwalze nur einseitig auszuführen und das Umschalten mit Hilfe eines besonderen Schalters vorzunehmen. Muß häufig und schnell umgesteuert werden, oder sind z. B. bei Hebezeugen Lasten zu senken bzw. bestimmte Höhenlagen des Kranhakens zu erreichen, dann empfiehlt es sich, die Steuerwalze so zu wählen, daß die Umschaltung durch dieselbe selbst vorgenommen wird, die Bedienungskurbel also links und rechts drehbar ist. Der Nullpunkt liegt dann in der Mitte beider Bewegungen. Diese Ausführung bietet den Vorteil der Zeitersparnis. Ferner kann die Arbeitsmaschine zwischen dem Übergange von der einen zur anderen Drehrichtung des Motors durch eine besondere Schaltung gebremst werden, was weiter unten noch behandelt werden wird. In Fig. 16 ist das Schema einer solchen Steuerwalze und die Schaltung des Motors wiedergegeben. Über die in Fig. 16 noch gezeichneten Bremskontakte B_1, B_2, B_1 wird auf S. 21 gesprochen werden.

Sowohl im Schema Fig. 15 wie auch in Fig. 16 erfolgt die Änderung der Drehrichtung durch Umschalten der Stromrichtung im Anker.

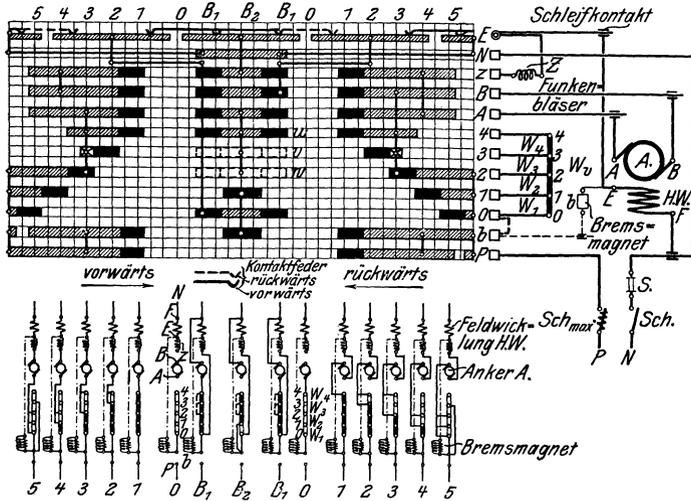


Fig. 16. Schaltungs- und mechanisches Schema einer Anlaßwalze mit Drehrichtungsänderung und Bremsung für Gleichstrom-Hauptstrommotoren.



Die besonderen Bremsmagnete dienen zur Betätigung mechanischer Bremsen; sie sind, worauf besonders zu achten ist, so zu schalten, daß sie beim Umsteuern ebenfalls nicht ummagnetisiert werden; also sie müssen im Stromkreise der Magnetwicklung oder parallel zu dieser liegen.

d) Die Reihen-Parallelschaltung. Eine andere Art der Widerstandsregelung, die aber nur dann zur Anwendung kommt, wenn zwei Motoren zum Antriebe einer Maschine benutzt werden, ist die Reihen-Parallelschaltung (Fig. 17). Das Anlassen erfolgt hierbei gleichfalls mittels Vorschaltwiderständen.

Eine andere Art der Widerstandsregelung, die aber nur dann zur Anwendung kommt, wenn zwei Motoren zum Antriebe einer Maschine benutzt werden, ist die Reihen-Parallelschaltung (Fig. 17). Das Anlassen erfolgt hierbei gleichfalls mittels Vorschaltwiderständen.

Für den Anlauf werden beide Motoren in Reihe geschaltet. Die Stromstärke ist dabei die maximale, also das Anlaufdrehmoment das höchst erreichbare. Der Anlaufwiderstand kann hier aber wesentlich kleiner bemessen werden als bei nur einem Motor, denn die Eigenwiderstände der Motorwicklungen sind hintereinander geschaltet, und die Motoren selbst erhalten nur die halbe Spannung. W_0 wird also wegen der Widerstände der Motorwicklungen geringer. Die

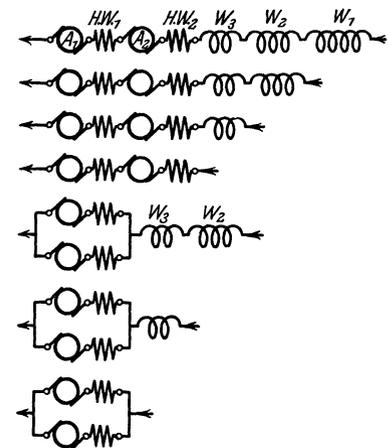


Fig. 17. Reihen-Parallelschaltung zweier Gleichstrom-Hauptstrommotoren.

der Bequemlichkeit wegen vom Koordinatenursprunge aus gezogen worden.

Diese Art der Regelung hat den großen Vorzug, daß sie nicht allein für das Anlassen benutzt werden kann, sondern — und das ist die Hauptsache — dazu dient, mit zwei Drehzahlen dauernd und wirtschaftlich zu arbeiten, ein Vorteil, der insbesondere bei Gleichstrombahnmotoren benutzt wird.

Den Vorgang des Anlassens diagrammatisch dargestellt, zeigt Fig. 19. Auch hier wird der Vorschaltwiderstand mittels des Anlassers oder

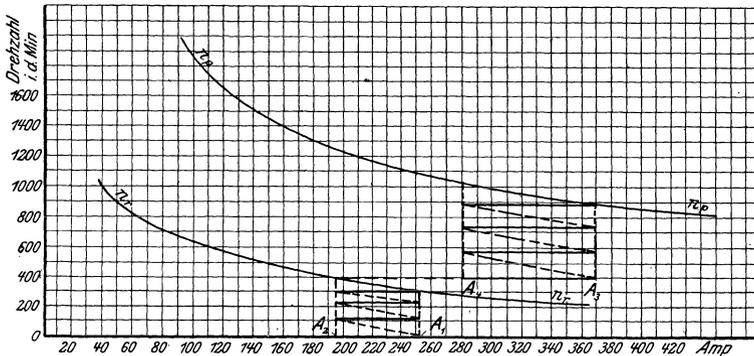


Fig. 19. Anlaßdiagramm bei Reihen-Parallelschaltung zweier Gleichstrom-Hauptstrommotoren.

der Steuerwalze stufenweise ausgeschaltet, bis zunächst bei halber Drehzahl die Regelung selbsttätig nach der n_r -Kurve erfolgt. Um auf die n_p -Kurve zu kommen, werden, wie bereits erwähnt, wiederum Vorschaltwiderstände eingeschaltet, die nacheinander abgetrennt werden (Fig. 17).

e) Für das Zusammenarbeiten von zwei Motoren ist jedoch noch auf einen Umstand aufmerksam zu machen, und zwar daß beide Motoren nicht immer die gleiche Leistung abgeben bzw. das gleiche Drehmoment entwickeln. Sind die Feldstärken beider Motoren nicht gleich — vollkommen gleiche Feldstärken zu erreichen ist nicht möglich, da das Eisen der Pole und die Länge der Wicklungen bezüglich des Widerstandes maßgebend sind —, so daß sich der Strom bei Parallelschaltung nicht gleichmäßig auf beide Anker verteilt, dann wird der Motor mit stärkerem Felde mehr Leistung abgeben, also unter Umständen überlastet und damit gefährdet. Um das zu vermeiden, d. h. um die Feldstärken bzw. die Leistung jedes Motors zu justieren, sind Parallelwiderstände zu den Magnetwicklungen und gegebenenfalls Beruhigungswiderstände vor die Anker zu schalten.

Die gebräuchlichsten Schaltungen sind in Fig. 20a bis e zusammengestellt. In der Voraussetzung, daß in Fig. 20a, b und c die Motoren starr gekuppelt und in d und e nur elektrisch miteinander gekuppelt

sind¹⁾, ist zu den einzelnen Schaltungen folgendes zu bemerken: In Fig. 20a sind die Drehmomente und die Drehzahlen gleich, weil die

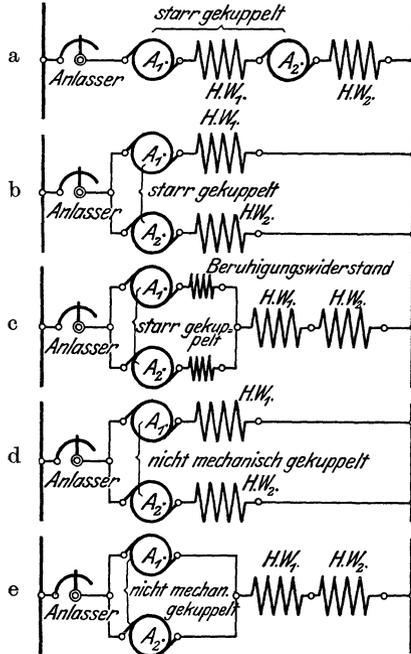


Fig. 20.

beide Motoren nur schwer zu erzielen, und man muß dann sog. Beruhigungswiderstände vor beide Anker und gegebenenfalls noch Parallelwiderstände zu den Feldwicklungen benutzen. Diese Schaltung ist deshalb weniger günstig.

Sind die Motoren nicht mechanisch, sondern nur elektrisch miteinander gekuppelt, dann richtet sich für Fig. 20d das Drehmoment jedes derselben nach der Belastung, und die Drehzahlen sind ungleich; dasselbe gilt für die Schaltung Fig. 20e mit dem Unterschiede, daß die Drehzahlen annähernd gleich sind oder durch Parallelwiderstände auf die gleiche Höhe eingestellt werden können. Fig. 20e kann ohne Bedenken angewendet werden.

f) Die Regelung durch Änderung des wirksamen Kraftflusses Φ .

Es kann hierbei nur eine Schwächung des Feldes und damit nach Gl. (11) eine Steigerung der Drehzahl erzielt werden. Das geschieht entweder dadurch, daß man einen Widerstand parallel zur Magnet-

Motorenwellen mechanisch starr miteinander verbunden sind; die Motoren erhalten je die halbe Netzspannung. Liegen die Motoren dauernd parallel zueinander, wird die Reihen-Parallelschaltung also nicht angewendet, so können dieselben mit nur einem Anlasser angelassen werden (Fig. 20 b). Die Drehmomente können aber aus dem oben genannten Grunde voneinander abweichen, und man muß dann einen Parallelwiderstand zum Felde des weniger leistenden Motors anordnen, um beide Motoren auf gleiches Drehmoment zu regulieren. Die Schaltung nach a und b kann trotzdem empfohlen werden.

Sind die Anker (A_1 und A_2) parallel, die Feldwicklungen ($H.W_1$ und $H.W_2$) aber in Reihe geschaltet (Fig. 20c), so ist gleiches Drehmoment für

¹⁾ Unter „starr gekuppelt“ ist die feste mechanische Verbindung der beiden Motorwellen mittels Kupplung u. dgl. zu verstehen, während „elektrisch gekuppelt“ soviel bedeuten soll, als daß die Motoren elektrisch miteinander in einer dauernden Verbindung stehen.

wicklung schaltet, oder durch Abschalten einiger Windungen der Hauptstromwicklung.

Diese Schaltungen, die auch der Anordnung nach Sprague zugrunde liegen, werden heute kaum mehr angewendet, und es kann infolgedessen davon abgesehen werden, näher auf dieselben einzugehen.

g) Die elektrische Bremsung. Wie auf S. 16 erwähnt, ist in der Fig. 16 eine Schaltung eingetragen, nach der eine elektrische Bremsung des Motors möglich ist. Diese Bremswirkung wird nun nicht etwa dadurch erreicht, daß der Drehsinn geändert wird, wodurch naturgemäß auch eine Bremswirkung eintritt, sondern auf die Weise hervorgerufen, daß der Motor nach Abschalten desselben vom Netz durch die den in Bewegung befindlichen Massen der angetriebenen Maschine innewohnende lebendige Kraft angetrieben wird, z. B. durch den Nachlauf einer Seiltrommel, bei Hebezeugen, Rollgangsbetrieben, in Walzwerken usw. Der Motor wird dann zum Generator und entzieht die für den Antrieb des letzteren notwendige Kraft z. B. der auslaufenden Seiltrommel. Die Drehzahl nimmt allmählich ab und wird schließlich Null, wenn der Generator elektrisch belastet wird. Diese elektrische Belastung erfolgt durch Widerstände, die in den Generatorstromkreis mit regelbarer Größe eingeschaltet werden (Fig. 16). Auf der ersten Bremsstufe ist der Widerstand der größte, und er nimmt mit jeder Stufe ab, so daß also die vom Generator der jeweiligen Antriebskraft entsprechende erzeugte Energie vernichtet — in Wärme umgesetzt — wird. Sobald die lebendige Kraft der Arbeitsmaschine nicht mehr imstande ist, das durch den eingeschalteten Widerstand, also durch die Belastung verlangte Drehmoment an den Generator abzugeben, fällt die Drehzahl, und man muß die dieser neuen Drehzahl entsprechende geringere erzeugte elektrische Energie durch einen entsprechend geringer bemessenen Widerstand vernichten. Reicht das Drehmoment auch hierfür nicht mehr aus, dann ist der Widerstand weiter zu verkleinern usw., bis schließlich nur noch der Eigenwiderstand des Motors übrig bleibt. Die Arbeitsmaschine könnte demnach theoretisch auf diese Weise nicht vollständig zum Stillstande gebracht werden, indessen wird die noch zu vernichtende geringe Antriebskraft durch die Reibung der Getriebe usw. aufgezehrt, so daß praktisch ein Stillstand wohl erreichbar ist.

Da nun bekanntlich ein Hauptstrommotor bei unverändertem Drehsinne und unveränderter Schaltung von Magnet- und Ankerwicklung nicht als Generator arbeiten kann, weil die veränderte Stromrichtung in der Magnetwicklung das Magnetfeld vernichtet, und damit naturgemäß Spannung und Stromstärke abnehmen, so muß die Stromrichtungsänderung dadurch berücksichtigt werden, daß die Verbindung zwischen Magnet- und Ankerwicklung geändert wird. Nach der auf S. 11 gegebenen Erklärung ist es vorteilhafter, die Stromrichtungsänderung nur im Ankerstromkreise vorzunehmen; die Fig. 21 a/b zeigt die entsprechende Schaltung.

Bezeichnet:

E'_k die Klemmenspannung des Generators,

E'_a die im Anker induzierte EMK.,

so ist:

$$\text{oder} \quad \left. \begin{aligned} E'_k &= E'_a - J(W_a + W_h), \\ E'_a &= E_k + J(W_a + W_h), \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

und wenn $W_g = (W_a + W_h)$ der Gesamtwiderstand des Motors, W_B der eingeschaltete Bremswiderstand, dann ist:

$$E'_k = J(W_g + W_B). \quad (28)$$

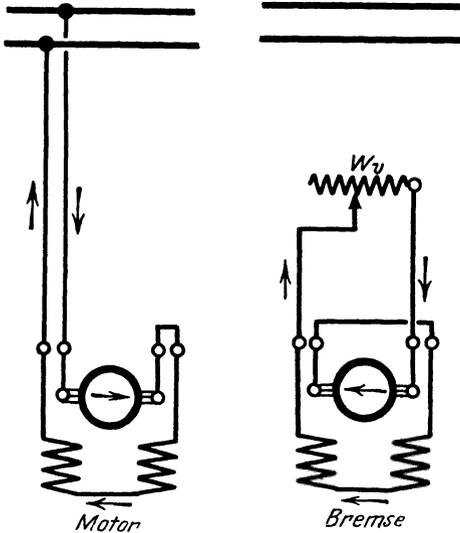


Fig. 21 a.

Fig. 21 b.

Gleichstrom-Hauptstrommotor als Motor und Generator (Bremswirkung).

Sind J und $W_g + W_B$ bekannt, so kann E'_k sofort berechnet werden.

Die z. B. den Schwunghmassen innewohnende lebendige Kraft entspricht dem vom Motor entwickelten Drehmomente. Dieses Drehmoment kommt aber für den Generator nicht voll zur Wirkung, weil durch dasselbe auch die Reibungs- und sonstigen Verluste gedeckt werden müssen.

Ist η' der gesamte Wirkungsgrad einschließlich Getriebe usw., dann ist das Drehmoment für den Generator:

$$D_G = D_t \cdot \eta', \quad (29)$$

oder da die Verluste gleich sind ($D_t - D$), so ist das Bremsdrehmoment:

$$D_B = D_t + (D_t - D) = 2D_t - D. \quad (30a)$$

Durch Umformung erhält man dann:

$$D_B = D \left(\frac{2 - \eta'}{\eta'} \right). \quad (30b)$$

Die Kurve für das Bremsmoment weicht somit von der Drehmomentkurve des Motors ab. Sie kann mit Benutzung des Motordiagramms leicht verzeichnet werden.

Wie bereits gesagt, wird die durch die generatorische Wirkung des Motors erzeugte elektrische Energie in Widerständen durch Umsetzung in Wärme vernichtet. Für diese Widerstände werden stets die bereits vorhandenen Anlaßwiderstände benutzt, um an Material, Raum usw. zu

sparen, und die Steuerwalzen sind dabei so ausgebildet, daß die Bremskontakte in der Mitte zwischen den Kontakten für die beiden Fahrrichtungen liegen (Fig. 16), wodurch neben der besseren konstruktiven Anordnung erreicht wird, daß beim Wechsel der Drehrichtung stets erst der Motor bis nahezu auf Null in der vorher innegehabten Drehrichtung abgebremst wird. Starke Stöße u. dgl. werden also durch eine derartige Bremsung vermieden, die beim einfachen Umschalten des Drehsinnes des Motors unter Umständen recht bedeutend und für viele Verhältnisse nicht nur für das Kraftwerk (Spannungsschwankungen durch große plötzliche Stromstöße), sondern auch für die angetriebenen Maschinen unzulässig sind (Gießereikrane, elektrische Bahnen usw.). Durch Versetzen des Kontaktes u nach v oder w in Fig. 16 also durch Änderung der Widerstandsgröße kann die Bremswirkung noch verstärkt werden.

Man nennt diese Bremsung des Motors die **Kurzschlußbremsung**. Sie besitzt neben den bereits genannten Vorzügen noch diejenigen, daß sie unabhängig ist von dem durch das äußere Leitungsnetz zugeführten Strome und keine besonderen Kosten durch Stromverbrauch aus dem Netze verursacht, letzteres im Gegensatze zu den selbständigen, elektrisch betätigten Bremsen. Die Anwendung ist namentlich für solche Betriebe, die ein oftmaliges Umschalten schwerer Massen, oder wie bei Hebezeugen ein Halten der Last in bestimmten Stellungen erfordern, häufig.

h) Die Apparate im äußeren Stromkreise, die für das Einschalten des Motors, die Sicherung desselben vor unzulässigen Überlastungen und für die Beaufsichtigung bzw. Prüfung des guten Arbeitens des Motors notwendig sind, sind in ihrer Gesamtzusammensetzung recht mannigfaltig, und zwar nicht nur in der Zahl, sondern auch in der Ausführung, weil jede Firma naturgemäß ihre eigenen Konstruktionen hat. Es kann nun hier selbstverständlich nicht auf die konstruktiven Einzelheiten aller der zur Verwendung kommenden Apparate eingegangen werden, vielmehr sollen nur die Gesichtspunkte zur Erläuterung kommen, die für die Wahl der Apparate grundsätzlich bestimmend sind.

In den Schaltungsschemas Fig. 15 und 16 ist ein Hebelschalter Sch . mit einer Sicherung S . in dem einen Pole der Zuleitung und ein Höchststromausschalter Sch_{max} . in dem anderen Pole angegeben. In dieser Form ist der Motorstromkreis für ein gutes In- und Außerbetriebsetzen und für die Sicherung des Motors vollkommen genug mit Apparaten ausgerüstet. Es sind zwei Sicherungen verschiedener Art benutzt, und zwar die Schmelzstreifensicherung S . und der selbsttätig wirkende Schalter Sch_{max} ., der beim Überschreiten einer den Motor gefährdenden Stromstärke zuerst den Stromkreis unterbricht. Solche automatischen Maximalschalter beruhen auf dem Prinzip, daß durch das Einschalten des Hebels zur Herstellung der Stromverbindung eine eiserne Klinke gespannt wird, die sich als Anker über einem vom Motorstrom durchflossenen Elektromagneten befindet. Übersteigt nun der Strom eine bestimmte, eingestellte Grenze, dann wird die Klinke angezogen, gibt den Hebel frei, und letzterer wird durch Federkraft sofort aus dem Kontakt-

schuh gezogen. Ein solcher Schalter, der ein- oder auch zweipolig hergestellt werden kann, gewährt demnach nicht nur die beste Sicherung, sondern er hat auch den Vorteil, daß der Stromkreis nicht eher wieder geschlossen werden kann, als bis die Fehlerquelle beseitigt ist, denn das Klinkwerk soll in angezogenem Zustande das Wiedereinschalten des Hebels verhindern. Ferner ist es nicht notwendig, Reserveschmelzstreifen vorrätig zu halten, wenn man einen zweipoligen Schalter benutzt. Der Betrieb kann vielmehr, wenn der Fehler oder die Ursache des Ausschaltens nur vorübergehend war, sofort wieder aufgenommen werden im Gegensatz zu den Schmelzsicherungen, bei denen zur Auswechslung der Patronen immerhin längere Zeit vergeht. Da es bei einem solchen selbsttätig wirkenden Schalter, der Gleitbahnen, Federn usw. besitzt, durch ungenügende Reinigung der einzelnen Teile doch hin und wieder und in der Regel gerade dann, wenn keine Aufsicht in der Nähe ist, vorkommen kann, daß der Auslösungsmechanismus nicht ordnungsmäßig arbeitet, oder durch das Bilden von Schmelzperlen beim Ausschalten an den Kontaktflächen ein Kleben zwischen den zu trennenden Kontakten eintritt, so ist in Fig. 15 und 16 nur ein einpoliger Automat und im zweiten Pole des Stromkreises die Schmelzsicherung *S*. eingeschaltet, die dann in Gefahrenfällen abschmilzt und so den Motor schützt.

Bei Motoren kleinerer Leistung wählt man diese Schalter- und Sicherungsverteilung häufig deswegen nicht, weil die Anschaffungskosten zu hohe sind, und nimmt dafür lieber in jedem Pole einen einfachen Hebelschalter und eine Schmelzstreifensicherung. Der Nachteil dieser Anordnung liegt nun darin, daß einmal die Sicherungen nicht so schnell und so zuverlässig ansprechen wie die automatischen Schalter, und ferner stets Reserveschmelzstreifen vorhanden sein müssen. Die Auswechslung nimmt natürlich mehr Zeit in Anspruch, als für das erneute Anlassen des Motors bei einem automatischen Schalter erforderlich ist. Außerdem können die Schmelzstreifen bei unzuverlässigem Betriebspersonal leicht durch Kupfer- oder Eisenstücke ersetzt und damit eine Sicherung des Motors illusorisch gemacht werden.

Namentlich bei Motoren mittlerer und großer Leistungen und bei Spannungen über 250 Volt sollte man daher stets die Apparatenanordnung nach Fig. 15 bzw. 16 wählen.

Zu der Lage der Sicherungen und Schalter im Stromkreise ist noch zu bemerken, daß von den Sammelschienen gerechnet zunächst der Schalter und erst dann die Sicherung angeordnet wird, damit man letztere durch das Öffnen des Schalters spannungslos macht und die Auswechslung der Sicherungspatrone oder des Schmelzstreifens gefahrlos vornehmen kann. Nach den Vorschriften des V. D. E. muß der Motor stets allpolig abschaltbar sein, damit derselbe im Stillstande auch gegen Erde spannungsfrei ist. Es ist also immer ein zweipoliger Schalter zu verwenden, vorteilhaft auch dann, wenn der Anlasser bereits einen Ausschaltkontakt hat.

Ist der Stromkreis im Betriebe unterbrochen worden, so muß vor dem erneuten Einschalten zunächst der Anlasser wieder in die An-

laufstellung gebracht werden, weil anderenfalls der Motor durch den großen Strom, den derselbe bei ausgeschaltetem Vorschaltwiderstande im Augenblicke des Anlaufes aufnimmt, gefährdet oder unter Umständen vollständig zerstört werden kann. Auch für die angetriebene Maschine dürfte in den meisten Fällen die dabei eintretende Beschleunigung nachteilig sein. Wenn die Bedienung des Motors aber unzuverlässigen Leuten anvertraut werden muß, oder die Schalter in erheblicher und unübersehbarer Entfernung vom Motor installiert sind, dann empfiehlt es sich, die Anlasser derart zu wählen, daß die Anlaßkurbel beim Stromrückgange, also bei der Unterbrechung automatisch in die Anlaßstellung zurückkehrt. Auch dieses wird in der Regel mittels eines Magneten bewirkt, der die Kurbel in der Betriebsstellung durch ein Klinkwerk festhält und beim Aufhören des Stromes freigibt, so daß eine Feder dieselbe in die Nullstellung zurückziehen kann.

Das gleiche, was für den Höchststromschalter und den automatischen Anlasser gilt, ist auch in Wirksamkeit von der Spannung ausführbar, und zwar dann zu wählen, wenn namentlich in kleineren Anlagen damit zu rechnen ist, daß die Spannung der Stromerzeugungsquelle ausbleiben oder auf einen solchen Wert plötzlich sinken kann, daß der Motor stehen bleibt. Ist der Stromkreis nicht unterbrochen, wenn die Spannung plötzlich wiederkehrt, dann springt der Motor mit hoher Drehzahl an, und es besteht die gleiche Gefahr wie oben. Man nennt solche automatischen Schalter Spannungs-Rückgangsschalter. An Stelle der Stromrelais treten hier Spannungsrelais. In reinen Motoranlagen, d. h. solchen, in denen die Motoren keine Generatoren, sondern Arbeitsmaschinen, Transmissionen usw. antreiben, sind die Spannungs-Rückgangsschalter indessen weniger anzutreffen.

Als Meßinstrumente kommen — in der Regel jedoch nur bei größeren Motoren — Stromzeiger, Spannungszeiger und Zähler zur Verwendung. Überall dort, wo mit Rücksicht auf die anzutreibende Maschine vorsichtig angelassen werden muß, oder wo die Energie, die die Arbeitsmaschine erfordert, nicht für alle Verhältnisse bekannt ist, und daher eine dauernde Überlastung des Motors unter Umständen nicht ausgeschlossen werden kann, ist ein Stromzeiger von großem Werte. Dann sollte man aber über der Skala der Stromwerte noch eine in PS geeichte zweite Skala und bei dem normalen Werte von Strom bzw. Leistung einen roten Strich anbringen lassen, damit der den Motor Bedienende stets einwandfreie Ablesungen vornehmen kann.

Spannungszeiger sind bei Gleichstrommotoren selten anzutreffen. Sie sind hier auch nur von geringem Werte und zumeist nur für die Betriebsleiter angebracht. Es ist bei allen Anlagen, die nicht von technischem Personal bedient werden, an Apparaten tunlichst zu sparen, weil erfahrungsgemäß z. B. der gewöhnliche Arbeiter, der einen Motor zu bedienen hat, sicherer seine ihm aufgetragenen Funktionen verrichtet, wenn er nicht viel mit Meßinstrumenten zu tun oder nach denselben zu schalten hat. Er verliert im entgegengesetzten Falle an Sicherheit, und darunter leidet dann stets der Betrieb.

Auf die Zähler, die zur Messung der verbrauchten Energie dienen, soll hier ebenfalls kurz eingegangen werden. Wo sie in den einzelnen Teilen der Anlage einzubauen sind, richtet sich ganz nach den Wünschen des Besitzers oder nach den Vorschriften des Elektrizitätswerkes, an das die Anlage angeschlossen wird. Vorteilhaft ist es, an der Zahl der Zähler zu sparen, dafür besser getrennte Stromkreise für Licht und Kraft anzulegen und den Energieverbrauch für mehrere Motoren durch einen Zähler festzustellen, der dann an der geeignetsten Stelle montiert, somit leicht bedient und gewartet werden kann. Dieses ist von vornherein dann geboten, wenn der elektrische Strom von einer fremden Anlage bezogen wird, und zwar weil der Strompreis für Kraft stets billiger ist als der für Licht. Sind Einzelzähler nicht zu vermeiden, dann dürfen dieselben an oder in unmittelbarer Nähe solcher Maschinen, die Erschütterungen aufweisen oder verursachen, nicht installiert werden, da sie sonst bald nicht mehr zuverlässig arbeiten werden. Schließlich ist jeder Zähler und jedes andere Meßinstrument stets so in seiner Lage zu der zugehörigen Maschine zu montieren, daß die Ablesung bequem vorgenommen werden kann.

Zur Aufstellung des Anlagers sei noch kurz bemerkt, daß derselbe unmittelbar zum Motor gehört und deshalb nicht an einer Hauptschalttafel od. dgl. in größerer Entfernung vom Motor unterzubringen ist. Genau so wie das Dampfventil sich an der Dampfmaschine befindet, so soll auch der Anlasser beim Motor stehen. Der Hauptgrund hierfür liegt darin, daß man sich vor dem Anlassen stets davon überzeugen muß, ob Motor und angetriebene Maschine zum Anlauf vorbereitet sind, keine Werkzeuge, Putzlappen usw. auf ihnen herumliegen und ähnliches mehr. Nur in Ausnahmefällen sollte man von dieser Aufstellungsregel abweichen. Auch die Schalter und Sicherungen gehören stets in die unmittelbare Nähe des Motors, damit man sie immer zur Hand hat.

4. Der Gleichstrom-Nebenschlußmotor.

Der Nebenschlußmotor unterscheidet sich vom Hauptstrommotor darin, daß die Erregung im Nebenschluß zum Anker liegt, also unabhängig ist vom Ankerstrom, demnach von der Belastung, dagegen abhängig von der Spannung an den Klemmen also der Netzspannung E_k (Fig. 22). Unter der Voraussetzung unveränderlicher Klemmenspannung E_k ist somit die im Anker induzierte EMK.:

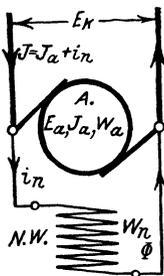


Fig. 22. Stromlaufschema des Gleichstrom-Nebenschlußmotors.

$$\left. \begin{aligned} E_a &= E_k - J_a \cdot W_a \\ &= \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} N \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \\ &= k_1 \cdot n \cdot \Phi \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

bzw. die Drehzahl:

$$n = \frac{E_a}{k_1 \cdot \Phi} = \frac{E_k - J_a \cdot W_a}{k_1 \cdot \Phi} \quad (32)$$

Der Kraftfluß Φ ist nicht dauernd konstant, sondern nimmt mit zunehmender Belastung infolge der Ankerrückwirkung ab; die Umdrehungszahl steigt infolgedessen, weil das Feld geschwächt wird. Andererseits steigt mit wachsendem J_a der Ohmsche Spannungsverlust $J_a \cdot W_a$ im Anker, und E_a nimmt ab. In der Praxis macht man nun bei normalen Motoren den Ohmschen Spannungsverlust und die Ankerückwirkung so groß, daß sie sich, weil sie entgegengesetzt wirken, fast vollständig aufheben, und man erhält dann einen Motor mit fast unveränderlicher Drehzahl bei allen Belastungen. Die Gl. (32) geht für diesen Fall über in die Form:

$$n = \text{const. } E_a . \quad (33)$$

Das praktische Drehmoment ergibt sich unter Benutzung der Gl. (3b) und (6) zu:

$$\left. \begin{aligned} D &= g_m \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi \cdot g} \Phi \cdot J_a \cdot 10^{-8} \\ &= k_3 \cdot \Phi \cdot J_a , \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

oder wenn die Klemmenspannung also die Erregung (Φ) unverändert bleibt:

$$D = \text{const. } J_a , \quad (35)$$

d. h. das Drehmoment eines Nebenschlußmotors ist unabhängig von der Drehzahl und bei konstanter Netzspannung direkt proportional dem Ankerstrom, also der Belastung. Spannungsschwankungen haben dagegen einen bedeutenden Einfluß sowohl auf die Drehzahl als auch auf das Drehmoment bzw. die Zugkraft, und es ist bei der Berechnung der Zuleitung insbesondere bei großen Motoren auf diesen Umstand entsprechend Rücksicht zu nehmen. Man kann mit hinreichender Genauigkeit $\Phi = \text{const. } E_k$ setzen; es verhalten sich dann die Drehmomente bei verschiedenen Spannungen zueinander wie die Spannungen selbst, also:

$$\frac{D}{D_1} = \frac{E_k}{E_{k_1}} , \quad D_1 = \frac{E_{k_1}}{E_k} \cdot D . \quad (36)$$

Das Charakteristikum eines Nebenschlußmotors liegt somit darin, daß derselbe bei unveränderter Klemmenspannung mit annähernd gleicher Umdrehungszahl bei allen Belastungen läuft, während sich das Drehmoment mit der Belastung ändert. Der Einfluß von E_k auf das Güteverhältnis g_m kann auch hier vernachlässigt werden.

Die vom Motor abgegebene Leistung ist:

$$L_M = D \cdot \omega = \text{const. } J_a \cdot n , \quad (37)$$

und man erkennt aus Gl. (37), daß sich die Leistung annähernd proportional mit der Drehzahl ändert.

Es ist ferner die abgegebene mechanische Leistung:

$$L_M = \frac{E_k \cdot J}{736} \eta_M \text{ PS}, \tag{38}$$

und die aufgenommene elektrische Energie:

$$L_M^0 = \frac{736 \cdot \text{PS}}{1000 \cdot \eta_M} \text{ KW}. \tag{39}$$

Die charakteristischen Kurven eines Nebenschlußmotors sind in Fig. 23 abgebildet und zwar zum besseren Vergleiche mit denjenigen des Hauptstrommotors wiederum in Abhängigkeit von der Stromstärke. Sie sind für die Drehzahl n und das Drehmoment D nach Gl. (33) und (35) mit hinreichender Genauigkeit Gerade, die um bestimmte Winkel gegen die Abszissenachse geneigt sind

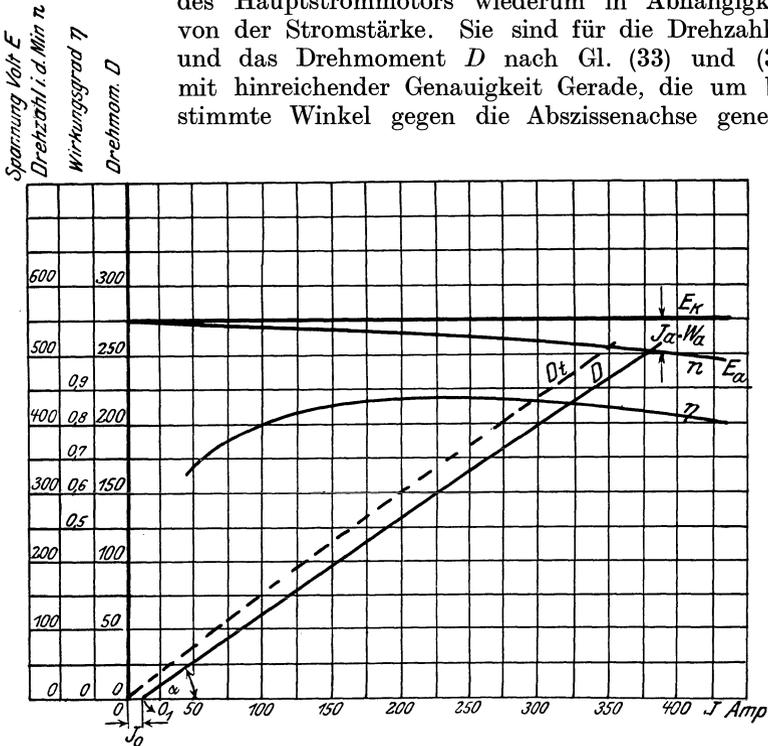


Fig. 23. Vollständiges Motordiagramm für den Gleichstrom-Nebenschlußmotor.

sind, die sich für $E_k = \text{const.}$ ergeben für die n -Kurve aus dem Spannungsabfall im Anker $J_a \cdot W_a$ und für das Drehmoment aus der Beziehung:

$$\text{tg } \alpha = \frac{g_m \cdot N \cdot p}{2 \pi \cdot g \cdot a} \cdot \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Auch hier beginnt naturgemäß die Drehmomentkurve nicht im Koordinatenursprunge, sondern in einem Punkte O_1 , wobei OO_1 gleich ist dem Leerlaufstrom J_0 . In Fig. 23 ist noch die Kurve für das theoretische Drehmoment D_t eingetragen.

In welcher Weise sich die Drehzahl ändert, wenn der Motor mit verschiedenen Klemmenspannungen betrieben wird, geht aus den Schaulinien der Fig. 24 hervor.

Aus Gl. (32) folgt ferner, daß die n -Kurve in einem anderen Maßstabe gemessen zugleich die Kurve für die induzierte EMK. E_a darstellt.

Der Gleichstrom-Nebenschlußmotor ist von den Gleichstrommotoren der für Arbeitsmaschinenantriebe bei weitem am häufigsten verwendete und zwar hauptsächlich deswegen, weil seine Drehzahl bei verschiedenen Belastungen unverändert bleibt. Einen Nachteil besitzt er allerdings darin, daß sein Anlaufdrehmoment sehr gering ist, weil z. B. bei

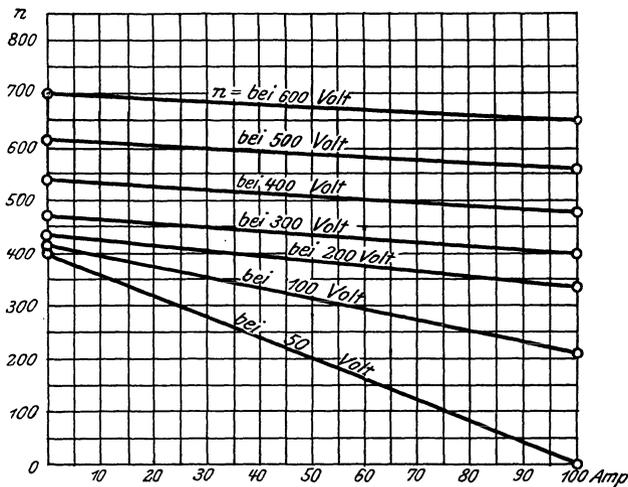


Fig. 24. Drehzahlkurven eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors bei verschiedenen Klemmenspannungen.

einer hohen Ankerstromstärke im Augenblicke des Anlassens ein bedeutender Spannungsabfall in der Zuleitung eintritt, der eine Abnahme des wirksamen Kraftflusses zur Folge hat. Dessenungeachtet hat aber der Motor noch einen weiteren Vorzug in der Energierückgewinnung, wenn er von einer äußeren Kraft und zwar mit dem gleichen Drehsinne, mit dem er als Motor läuft, angetrieben wird. Hierauf wird weiter unten besonders eingegangen werden.

Das über den intermittierenden Betrieb beim Hauptstrommotor Gesagte gilt auch für den Nebenschlußmotor; allerdings findet man bei letzterem diese Arbeitsweise verhältnismäßig selten, weil auch für Hebezeuge der Nebenschlußmotor nur vereinzelt und zwar in der Regel nur beim Einmotorenkran zur Verwendung kommt.

5. Die Regelung des Gleichstrom-Nebenschlußmotors.

a) Die Umkehr der Drehrichtung. Soll der Drehsinn des Nebenschlußmotors geändert werden, so erfolgt das ebenfalls durch den Wechsel der Stromrichtung nur entweder im Anker oder in der

Magnetwicklung wie in den Fig. 25 und 26 gekennzeichnet. Es empfiehlt sich aus den bekannten Gründen, ebenfalls die Stromrichtung im

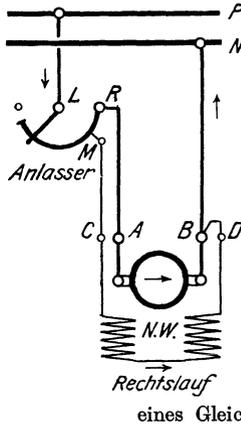


Fig. 25.

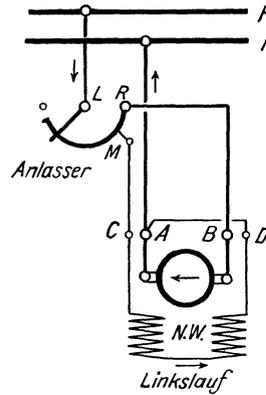


Fig. 26.

Anker umzuschalten, hier insbesondere aber noch deswegen, weil das Magnetfeld ausgebildet sein muß, bevor der Anker Strom erhält, denn anderenfalls findet das Ankerfeld kein entsprechendes Gegenfeld der Magnete, und der Motor nimmt dann eine Drehzahl an, die weit über der normalen liegt. Man sagt auch hier, der Motor „geht durch“. In Fig. 27 ist die Umschaltung mit Hilfe eines einfachen Umschalters dargestellt.

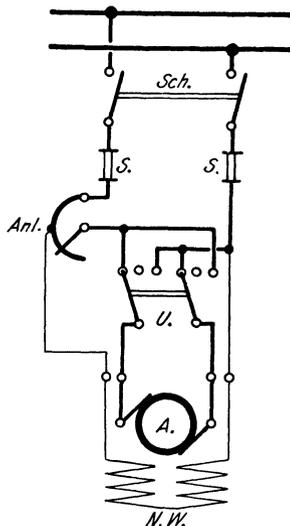
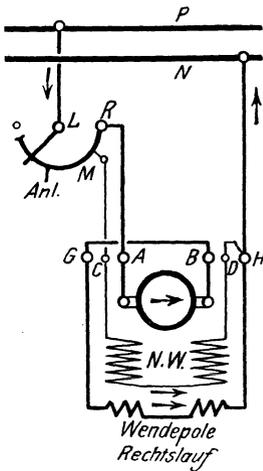


Fig. 27. Drehrichtungsänderung beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor.

Noch in stärkerem Maße wie der Hauptstrommotor neigt der Nebenschlußmotor bei höherer als der normalen Belastung zum Feuern der Bürsten, denn während beim ersteren das Magnetfeld mit zunehmender Belastung gleichfalls steigt, also die sich entgegenarbeitenden Amperwindungen von Anker und Magnetwicklung stets in einem bestimmten, nahezu unveränderten Verhältnisse bleiben, ist das beim Nebenschlußmotor nicht der Fall. Hier bleibt das Feld konstant, während die Amperwindungen des Ankers mit der Belastung zunehmen. Man rüstet infolgedessen diese Motoren viel häufiger mit Wendepolen aus und hat damit selbst bei den schwersten Betriebsverhältnissen

sehr gute Erfahrungen gemacht. Ist die Wirkung der Wendepole sehr bedeutend, was dann vorkommen kann, wenn die Motoren für starke Überlastungen bemessen sein müssen, dann ist es unter

Umständen zweckmäßig, noch eine besondere Hilfswicklung auf die Magnete aufzubringen, um ein Durchgehen des Motors bei Entlastung, wenn also die im Hauptstrom liegenden Wendepole den



eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors.

Fig. 28.

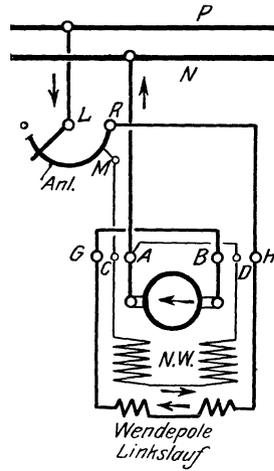


Fig. 29.

Motor gewissermaßen zu einem Hauptstrommotor machen würden, zu verhüten.

Da die Wendepole im Ankerstromkreise liegen, muß auch bei diesen die Stromrichtung bei Umkehr des Drehsinnes des Motors geändert werden (Fig. 28 und 29).

b) Die Regelung der Drehzahl im allgemeinen. Nach Gl. (32) war die Umdrehungszahl:

$$n = \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{\Phi \cdot N} E_a$$

$$= \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{\Phi \cdot N} (E_k - J_a \cdot W_a),$$

und es ist also wie beim Hauptstrommotor eine Änderung von n zu erreichen durch Änderung:

- 1) der Polzahl p ,
- 2) der Anzahl der Ankerleiter N ,
- 3) der induzierten EMK. E_a bzw. der Klemmenspannung E_k ,
- 4) des wirksamen Kraftflusses Φ (der Erregung).

Die unter 1) und 2) genannten Möglichkeiten sollen, da sie in der Praxis ebenfalls so gut wie gar nicht gebräuchlich sind, nicht näher besprochen werden.

c) Das Anlassen. Um den Motor in Gang zu bringen, bedient man sich auch beim Nebenschlußmotor heute fast ausschließlich eines veränderlichen Widerstandes, der in den Ankerstromkreis geschaltet

wird (Fig. 25); die Änderung der Drehzahl von Null bis zur normalen erfolgt hier demnach ebenfalls durch Änderung der induzierten EMK.

Es ist:

$$E_a = E_k - J_a \cdot W_a ;$$

vergrößert man W_a durch einen vorgeschalteten veränderlichen Widerstand W_v , so kann E_a verringert und n infolgedessen auf Null gebracht werden Gl. (32). Das hat aber zur Voraussetzung, daß die Klemmenspannung konstant ist, eine Bedingung, die bei parallel an ein Verteilungsnetz angeschlossenen Motoren meist zutrifft. Die vorgenannte Gleichung geht unter Berücksichtigung von W_v über in:

$$E_a = E_k - J_a(W_a + W_v) . \quad (40)$$

Da nun ferner nach Gl. (35) die Stromstärke J_a von dem zu entwickelnden Drehmomente abhängig ist, kann die Gl. (40) auch in der Form geschrieben werden:

$$E_a = E_k - \text{const. } D(W_a + W_v) , \quad (41)$$

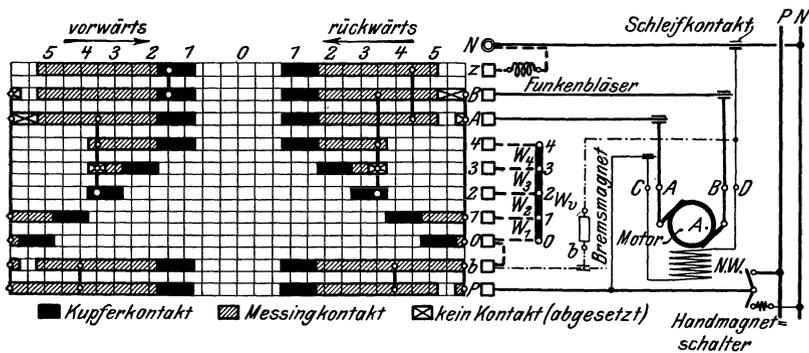


Fig. 30. Schaltungsdiagramm einer Anlaufwalze mit Drehrichtungsänderung für Gleichstrom-Nebenschlußmotoren.

und man ersieht daraus, daß der Einfluß eines bestimmten Vorschaltwiderstandes auf E_a bzw. n abhängig ist von dem Drehmomente, das der Motor zu entwickeln hat. Da D während der Anlaufperiode, wie bereits auseinandergesetzt, sehr klein ist, muß W_v sehr groß gemacht werden.

Den Vorgang beim Anlassen diagrammatisch darzustellen, kann übergangen werden, denn das Schaubild ist nach den beim Hauptstrommotor gegebenen Erklärungen leicht vorstellbar.

In Fig. 30 ist für das bessere Verständnis des Verfahrens zum Anlassen eines Nebenschlußmotors und zum Vergleich mit dem Hauptstrommotor das Schaltungsdiagramm wiederum für eine Steuerwalze abgebildet. Auch hier werden die einzelnen Widerstandsstufen W_1 , W_2 , $W_3 \dots$ nacheinander durch die Schaltwalze abgeschaltet, bis auf Kontakt 5 der Motor seine volle Drehzahl erreicht hat. Die Vor-

schaltwiderstände liegen nur im Ankerstromkreise, und der Magnetstromkreis bleibt also stets unverändert. Die Fig. 31 zeigt das Schema für eine solche Steuerwalze mit Bremsstellungen B_1 , B_2 , B_1 der Kurbel.

Auf die Ausführung des Anlassers, die abweichend vom Hauptstrommotor für den Nebenschlußmotor eine besondere sein muß, wird weiter unten bei der Besprechung der „Apparate im äußeren Stromkreise“ näher eingegangen werden.

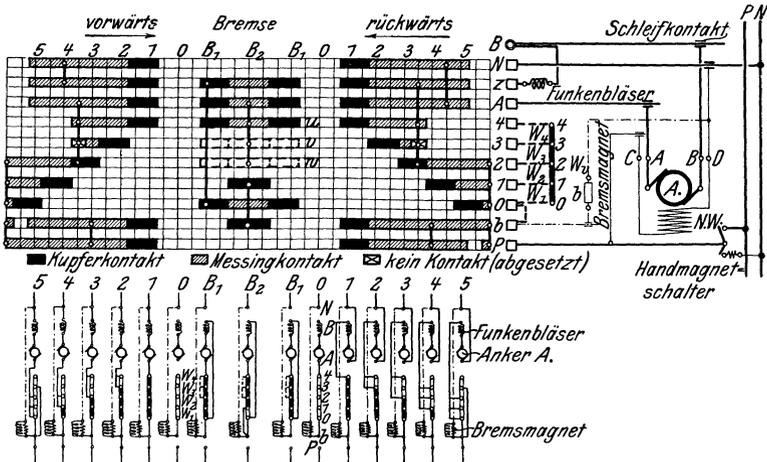


Fig. 31. Schaltungsschema einer Anlaßwalze mit Drehrichtungsänderung und Bremsung für Gleichstrom-Nebenschlußmotoren.

d) Die Änderung der Drehzahl durch Änderung der induzierten EMK. Das Vorschalten von Widerständen vor den Anker wird auch dazu benutzt, die Drehzahl des Motors im Betriebe zu ändern, und zwar ist nach Gl. (32) dadurch nur eine Drehzahlverminderung möglich. Dabei sinkt dann die Leistung ungefähr im gleichen Maße, wie die Umdrehungszahl abnimmt [Gl. (37)]. Nach Obigem bestimmt ferner das vom Motor zu entwickelnde Drehmoment den Einfluß eines Vorschaltwiderstandes auf E_a bzw. n . Im Leerlauf wird der vorgeschaltete Widerstand die Drehzahl nur wenig beeinflussen, während n andererseits bei einem großen Drehmomente durch den gleichen Vorschaltwiderstand mehr herabgesetzt wird als bei kleinerem D . Einen bestimmten Wert von n durch diese Regulationsart einzustellen ist also nur dann möglich, wenn D bekannt und der Vorschaltwiderstand entsprechend bemessen ist.

Aber noch einen weiteren Nachteil besitzt die Benutzung von Vorschaltwiderständen zur dauernden Regelung der Umdrehungszahl, und das ist die Unwirtschaftlichkeit, weil dem Motor die volle elektrische Energie zugeführt werden muß, von der nur ein Teil nutzbar abgegeben, während soviel an Energie im Vorschaltwiderstande in Wärme umgesetzt, also nutzlos verloren geht, als die Drehzahl herabgesetzt wird. Der Wirkungs-

grad dieser Regelungsart ist somit ein außerordentlich schlechter, und zwar sinkt η_M im Verhältnisse der Umdrehungszahlen $\frac{n_1}{n}$. Man benutzt dieselbe deshalb auch nur ungerne und eigentlich nur zum Anlassen.

Diese Unwirtschaftlichkeit in der Drehzahlverminderung des Nebenschlußmotors hat dazu geführt, eine ganze Reihe von Schaltungen durchzubilden, die es gestatten, das Anlassen und vornehmlich die dauernde Verminderung der Drehzahl wirtschaftlicher vorzunehmen,

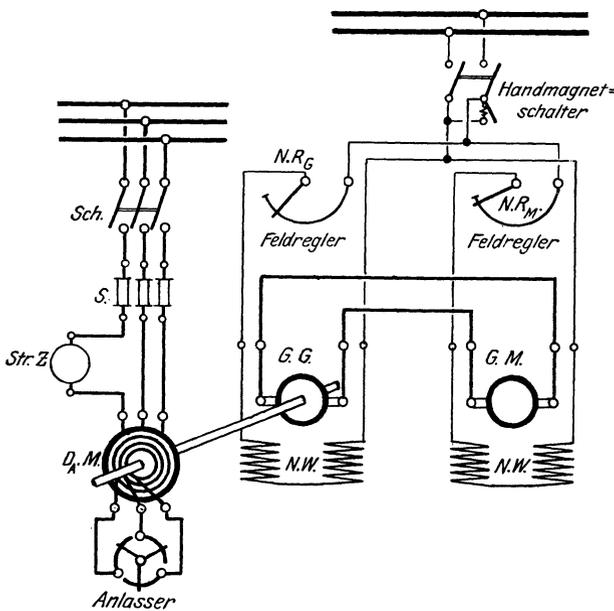


Fig. 32. Drehzahlregelung beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor nach Ward-Leonard.

und das in der Hauptsache deswegen, weil dieser Gleichstrommotor namentlich für den Arbeitsmaschinenantrieb in seiner gleichbleibenden Drehzahl bei Belastungsänderungen ein so außerordentlich schätzenswertes Verhalten hat. Nun ist nach Gl. (32) eine so gut wie verlustlose Änderung von n nur durch Änderung der Klemmenspannung E_k zu erreichen. Der zu regelnde Motor muß hierbei also an einen besonderen Generator angeschlossen werden, dessen Spannung durch Änderung seiner Erregung — im selteneren Falle seiner Drehzahl —

geändert wird. Andere Betriebe können dann aber von einem solchen Generator nicht mehr mit Strom versorgt werden.

Ein in der Praxis häufiger zur Verwendung kommende System, das von H. Ward - Leonard angegeben worden ist, ist im Schaltungs-bilde Fig. 32 dargestellt. Der zu regelnde Motor $G.M.$ ist an den Generator $G.G.$ angeschlossen. Die Änderung der Drehzahl von $G.M.$ erfolgt durch die Änderung der Klemmenspannung, und zwar wird dieses erreicht durch Verstellen des Nebenschlußreglers $N.R_G$ des Generators. Jedem Werte der Generatorspannung entspricht eine bestimmte Umdrehungszahl des Motors, die derselbe hier bei allen Leistungen bzw. bei jedem beliebigen Drehmomente stets annähernd beibehält. Der Antrieb des Generators erfolgt in Fig. 32 durch einen Drehstrommotor $D.M.$ Sofern ein besonderes Gleichstromnetz vorhanden ist, wird natürlich der Generator von einem Gleichstrom-Nebenschlußmotor angetrieben,

und es empfiehlt sich dann, den Generator fremd zu erregen, d. h. seine Magnetwicklung an die vorhandene Stromquelle anzuschließen. Die Erregerwicklung des Motors *N.W.* liegt dann gleichfalls an den besonderen Gleichstromsammelschienen und erhält einen Regulator *N.R.M.*, um die Drehzahl des Motors noch weiter zu erhöhen, wenn die Klemmenspannung des Generators eine Zunahme nicht mehr zuläßt. Warum durch Änderung der Erregung des Motors eine Drehzahlzunahme eintritt, wird auf S. 37 behandelt werden. Dem Schema Fig. 32 ist ferner noch zugrunde gelegt worden, daß für die Erregung eben die vorerwähnte Gleichstromquelle mit konstanter Spannung vorhanden ist, deren Leistung aber nicht ausreicht, um auch einen Gleichstrommotor an Stelle des Drehstrommotors zum Antriebe des Regelsatzes zu benutzen. Auf diese Weise sind mehrere Schaltmöglichkeiten zusammengefaßt worden.

Da die Schaltapparate bei der Leonardschaltung in den Nebenschlußstromkreisen liegen, sind dieselben nur für kleine Ströme zu bemessen, demnach einfach und sicher, was mit dem Vorteile der wirtschaftlichen Regelung dieses System insbesondere für große Motoren, die häufig angelassen und abgestellt werden oder noch mit umkehrbarer Drehrichtung arbeiten müssen (Walzenzugmotoren, Werkzeugmaschinenantriebe, Förderanlagen usw.), zu einem sehr geeigneten macht.

Die Regelung der Drehzahl bei Papiermaschinen soll schließlich noch erwähnt werden, weil dieselbe wohl die weitgehendsten Anforderungen bezüglich der Änderung von n stellt mit noch der weiteren Bedingung, daß die Regelung außerordentlich feinstufig erfolgen muß. Es kommen hierbei Änderungen der Papiergeschwindigkeit in den Grenzen von mehr als 100 bis herab auf 3 bis 5 Papiermeter in der Minute vor. Der Kraftbedarf sinkt dabei im allgemeinen proportional mit der Papiergeschwindigkeit; die geringen Geschwindigkeiten erfordern jedoch eine Leistungsabgabe, die ein wenig größer ist, als ihnen im Verhältnis der verminderten Umdrehungszahl zukommen würde. Es ist aus diesem Grunde empfehlenswert, den Antriebsmotor, dessen Leistung in der Regel für seine höchste Drehzahl angegeben wird, etwas reichlich zu bemessen.

Neben der oben beschriebenen Leonardschaltung kommt für solche Betriebe vielfach die Zu- und Gegenschaltung zur Verwendung. Die Drehzahlregelung erfolgt bei diesem System wiederum dadurch, daß dem Arbeitsmotor der Papiermaschine unter Benutzung eines besonderen Zusatzaggregates Energie von veränderlicher Spannung zugeführt wird.

Das Zusatzaggregat besteht aus zwei Gleichstrommaschinen, deren jede annähernd eine Leistung gleich der Hälfte des Arbeitsmotors hat. Von diesen beiden Maschinen liegt die eine, die kurz mit „Zusatzmotor“ bezeichnet werden soll, unmittelbar am Netz. Der Anker der anderen, des sog. „Zusatzgenerators“, ist mit dem Anker des Arbeitsmotors in Reihe geschaltet (Fig. 33). Die Felder aller drei Maschinen liegen am vorhandenen Gleichstromnetze, werden also fremderregt.

Unter der Annahme, daß die Netzspannung z. B. 220 Volt beträgt, werden Zusatzmotor und Zusatzgenerator auch je für 220 Volt gebaut, während der Anker des Arbeitsmotors für 440 Volt gewickelt ist.

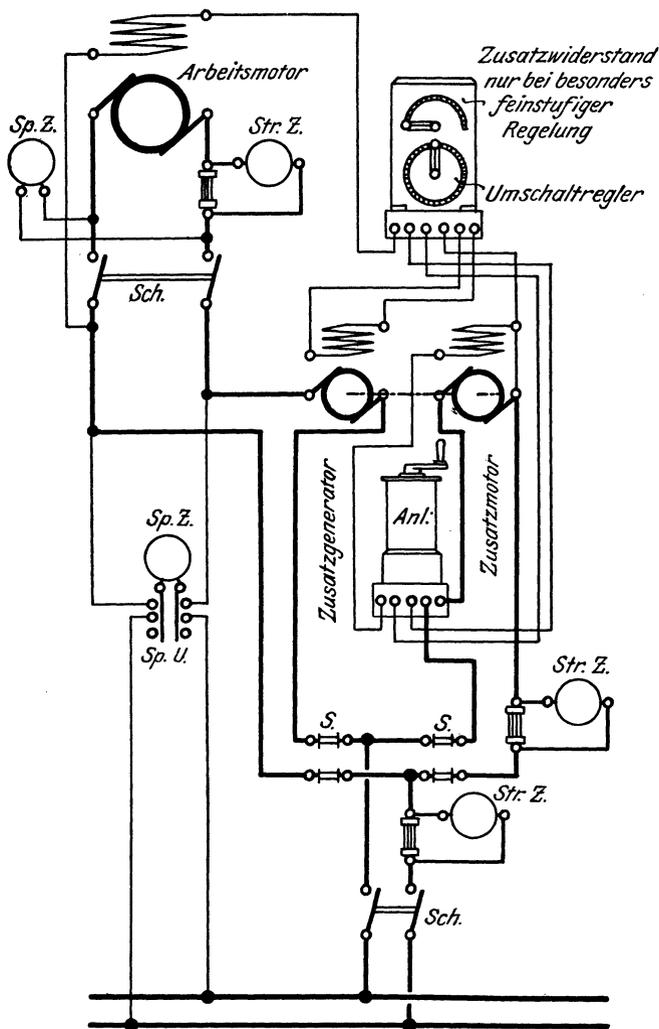


Fig. 33. Drehzahlregelung beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor durch Zu- und Gegenschaltung.

Die Spannung des Zusatzgenerators, die durch einen Umschaltregler für ganz feinstufige Regelung in den Grenzen von Null bis zum Höchstwerte geändert werden kann, wird im Stromkreise des Motors der Netzspannung je nach einer gewünschten höheren oder kleineren Drehzahl

zu- oder gegengeschaltet, und erhöht oder erniedrigt dieselbe dadurch entsprechend.

Der Vorgang der Regelung ist nun folgender: Soll der Arbeitsmotor ganz langsam laufen, so wird seinem Anker eine dieser geringen Umdrehungszahl entsprechende niedrige Spannung zugeführt. Soll diese Spannung z. B. 20 Volt betragen, so wird der Regler so eingestellt, daß der gegen die Netzspannung geschaltete Zusatzgenerator 200 Volt an seinen Klemmen aufweist. Von den 220 Volt Netzspannung erhält dann der Arbeitsmotor nur 20 Volt; mit den übrigbleibenden 200 Volt läuft der Zusatzgenerator als Motor und treibt seinen bisherigen Antriebsmotor als Generator an. Zur weiteren Erhöhung der Drehzahl des Arbeitsmotors wird dann die Gegenspannung des Zusatzgenerators immer mehr und mehr verringert, bis sie schließlich auf Null gebracht ist. Dann steht dem Motor die volle Netzspannung von 220 Volt zur Verfügung, und er läuft, da er für 440 Volt gewickelt ist, mit halber Umdrehungszahl.

Beim Weitschalten wird der Erregerstrom und damit die Polarität des Magnetfeldes des Zusatzgenerators durch den bereits erwähnten Umschaltregler umgeschaltet. Die Spannung des Zusatzgenerators, die bisher gegen die Netzspannung geschaltet war, addiert sich jetzt zu dieser. Wird dann die Spannung des Zusatzgenerators allmählich von 0 bis 220 Volt gesteigert, dann läuft der Arbeitsmotor schneller, bis er bei 440 Volt insgesamt seine volle Drehzahl hat. In Fig. 33 sind auch alle für die Betriebsführung erforderlichen Apparate und Meßinstrumente eingetragen.

Diese Art der Regelung in sehr weiten Grenzen, die sowohl mit der Leonardschaltung als auch mit der weiter unten besprochenen Regelung im Magnetstromkreise des Motors nicht erreicht werden kann, ist ebenfalls völlig betriebssicher und wirtschaftlich, denn es ist dabei möglich, für alle drei Maschinen raschlaufende Modelle zu verwenden, die mit besserem Wirkungsgrade arbeiten als etwa ein bei Verwendung reiner Nebenschlußregelung (siehe weiter unten) erforderlicher langsamlaufender Motor.

Eine andere Regelung eines Nebenschlußmotors durch Änderung der Klemmenspannung, die hier der Vollständigkeit wegen kurz erwähnt sei, besteht schließlich noch darin, an Stelle des dauernd mitlaufenden Generators eine Akkumulatorenbatterie zu verwenden, deren Zellenzahl in mehrere Gruppen unterteilt ist. Da bei großen Motoren mit hohen Spannungen die Kosten für die Anschaffung der Batterie und der Apparate, sowie die der Unterhaltung recht beträchtliche sind, und für das Aufladen viel Zeit verloren geht, ist dieses System, soweit bekannt, bisher nicht zur praktischen Verwendung gekommen.

e) Die Änderung der Drehzahl durch Änderung der Erregung, also des Kraftflusses Φ . Nach Gl. (32) kann durch Änderung von Φ lediglich eine Erhöhung der Umdrehungszahl erreicht werden. Die Beeinflussung von Φ , also der Erregung, erfolgt dadurch, daß man der Magnetwicklung einen Widerstand vorschaltet

(Fig. 34). Dieses ist die einfachste und in der Praxis sehr oft angewendete Form für die Steigerung der Drehzahl durch Schwächung des Feldes.

Die Drehzahl des Motors kann dadurch aber nicht bis zu einer beliebigen Höhe aufwärts reguliert werden, denn dieselbe ist durch die Kommutation begrenzt, die beim Überschreiten eines bestimmten Wertes für Φ nicht mehr funkenfrei vor sich geht. Das ist für die Haltbarkeit des Kommutators, dieses wichtigsten und besondere Aufmerksamkeit erfordernden Teiles einer Gleichstrommaschine, unbedingt notwendig, und aus diesem Grunde sind solche regelbaren Motoren zweckmäßig mit Wendepolen auszurüsten. Dann können Steigerungen von n im Verhältnis von etwa 1 : 4 noch betriebssicher erfolgen, sofern natürlich der Motor hierfür besonders gebaut ist.

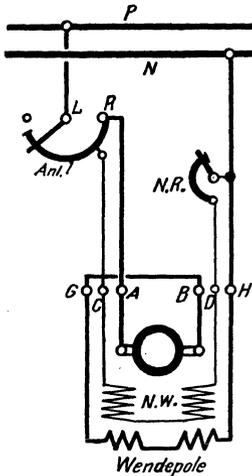


Fig. 34. Drehzahlregelung beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor durch Änderung der Erregung.

Die Regelung im Erregerstromkreise hat den großen Vorteil, daß sie ohne besondere Verluste erfolgt einmal, weil i_n und die Vorschaltwiderstände sehr klein sind, und ferner, weil der Wirkungsgrad des Motors hierbei nur unwesentlich beeinflusst wird.

Eine Änderung von n durch die Erregung kann auch noch in der Weise geschehen, daß man die Magnetwicklung unterteilt und die einzelnen Teile verschiedenartig hintereinander und parallel schaltet, doch hat sich diese Methode in der Praxis nur wenig Eingang verschafft, weil sie, obgleich ebenfalls verlustlos, aber umständlich ist.

Mit Rücksicht auf das bereits bei der Drehzahlverminderung durch Vorschaltwiderstände Gesagte ist auch hier bei der Wahl des Anlassers mit besonderer Überlegung zu verfahren. Der Nebenschlußmotor hat die Eigenschaft, die Leistung bei der höchsten durch die Nebenschlußregelung erreichten Drehzahl auch bei allen innerhalb der Nebenschlußregelung liegenden tieferen Umdrehungszahlen abgeben zu können. Das ist aber bei einer größeren Zahl anzutreibender Maschinen z. B. Kolbenpumpen, Zentrifugalventilatoren usw. in der Regel nicht notwendig, sondern es kommt vielmehr darauf an, daß das Drehmoment während der Nebenschlußregelung unverändert bleibt, d. h. also, daß:

$$D = \frac{L_M}{n} = \text{const.}$$

Für diesen Fall würde z. B. bei einem Motor von 20 PS, dessen Drehzahl im Nebenschluß im Verhältnis 1 : 2 geändert werden soll, der Anlasser nur für $\frac{20}{2} = 10$ PS zu wählen sein, denn nur diese Leistung

bzw. die dieser entsprechende Stromstärke tritt tatsächlich beim Anlassen auf. Der Endkontakt des Anlassers müßte dabei aber selbstverständlich für die volle der Leistung von 20 PS entsprechende Stromstärke bemessen werden. Die Anlasser werden dann, wie das Beispiel zeigt, wesentlich kleiner also im Preise billiger beschafft werden können.

Wird im Regelungsbereiche statt konstanten Drehmomentes konstante Leistung also mit der Umdrehungszahl veränderliches Drehmoment verlangt, wie das bei dem Antriebe von Werkzeugmaschinen der Fall ist, wenn z. B. an einer Drehbank bei geringerer Drehzahl ein stärkerer Span geschnitten werden soll, dann ist der Anlasser natürlich für die volle Leistung zu bemessen. Es muß daher für jeden Fall der gewünschten Drehzahlsteigerung angegeben werden, ob das Drehmoment oder die Leistung bei der Drehzahlregelung konstant sein soll, um den Motor und besonders auch den Anlasser und den Nebenschlußregler zweckentsprechend wählen zu können.

f) Das Zusammenarbeiten mehrerer Motoren. Für gewöhnlich wird der Nebenschlußmotor ebenfalls nur im einzelnen verwendet. Es finden sich aber auch hier Fälle, bei denen zwei Motoren entweder starr gekuppelt oder an ein Netz im Parallelbetriebe angeschlossen eine Arbeitsmaschine anzutreiben haben. Der Vollständigkeit wegen soll daher auch auf diese Verhältnisse etwas näher eingegangen werden.

Sind die Motoren miteinander mechanisch starr gekuppelt, so kann die Schaltung von Anker und Feldwicklungen nach Fig. 35a oder b vorgenommen werden. In Fig. 35a liegen die Anker (A_1 , A_2) und die Magnetwicklungen ($N.W_1$, $N.W_2$) je in Reihe miteinander, werden also von den gleichen Strömen durchflossen. Das Anlassen erfolgt durch nur einen Anlasser im Ankerstromkreise. Diese Schaltung

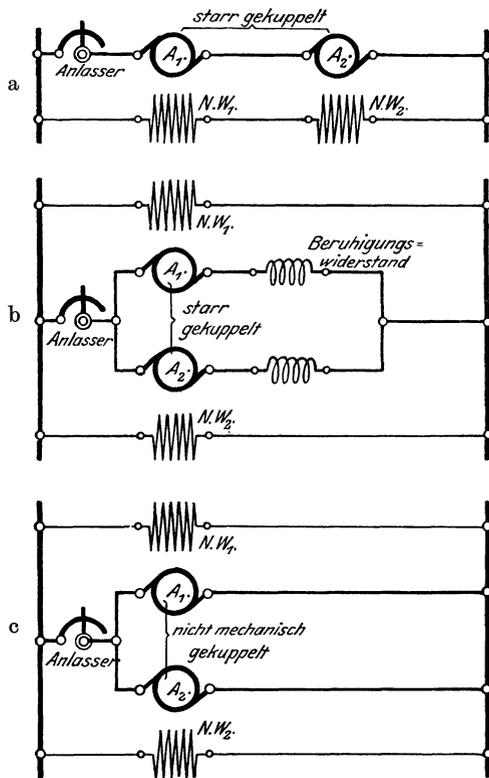


Fig. 35a bis c.

kann ohne Bedenken angewendet werden, da Schwierigkeiten hinsichtlich der Belastungsverteilung auf jeden der beiden Motoren nicht zu fürchten sind. Die Drehmomente und die Umdrehungszahlen beider Motoren sind gleich, weil sie starr gekuppelt sind. Der Anlasser ist für die Gesamtleistung der beiden Motoren zu bemessen.

Schaltet man aber die Motoren parallel nach Fig. 35 b oder c, so ist gleiches Drehmoment auch dann, wenn die Motorwellen starr miteinander gekuppelt sind, nur schwer zu erreichen, und man muß „Beruhigungswiderstände“ einbauen. Obgleich ferner die Umdrehungszahlen beider Motoren für Fig. 35 b infolge der Kupplung gleich sind, kann es dennoch vorkommen, daß schon bei einer geringen Verschiedenheit der Felder eine ungleiche Verteilung der Stromaufnahme und damit eine Überlastung des einen und eine Entlastung des zweiten Motors eintritt, was zu Betriebsstörungen bei dem ersten Motor führen kann. Um dem vorzubeugen, sind wie in Fig. 35 b nicht angedeutet unter Umständen noch besondere Vorschaltwiderstände vor die Feldwicklungen zu schalten. Das Anlassen kann mit nur einem oder auch mit zwei Anlassern erfolgen, die dann aber zu kuppeln sind. Letzteres ist indessen weniger zu empfehlen, wie überhaupt diese Schaltung Fig. 35 b weniger gut ist.

Sind die beiden Motoren nicht mechanisch miteinander gekuppelt, also in der allgemeinen Form in Parallelschaltung an das Netz angeschlossen (Fig. 35 c), so bestehen Gefahren für die einzelnen Motoren nicht. Die Drehmomente richten sich nach der Belastung; die Drehzahlen sind natürlich ungleich, können aber durch kleine Justierwiderstände in den Magnetwicklungen leicht auf gleiche Höhe eingestellt werden. Das Anlassen kann dabei ebenfalls mit nur einem Anlasser geschehen, der dann natürlich für die Gesamtleistung zu bemessen ist.

g) Die elektrische Bremsung. Beim Nebenschlußmotor liegen im Gegensatz zum Hauptstrommotor, wenn derselbe als Generator arbeiten und damit zur Bremsung der angetriebenen Maschine benutzt werden soll, die Verhältnisse zunächst insofern günstiger, als derselbe sowohl als Motor wie auch als Generator ohne Änderung der Schaltung zwischen Magnet- und Ankerwicklung in dem gleichen Drehsinne arbeitet. Von der Behandlung der Bremsung durch Umkehr der Drehrichtung soll abgesehen werden, da sie nichts besonderes Bemerkenswertes bietet. Als Antriebskraft zur Erzeugung der generatorischen Wirkung dient auch hier ebenfalls das in der angetriebenen Maschine nach Abschalten des Motors vom Netze aufgespeicherte Arbeitsvermögen. Um eine befriedigende Bremswirkung zu erhalten, ist der Nebenschlußmotor wiederum entgegengesetzt dem Hauptstrommotor, wenn irgend möglich, nicht mit Selbsterregung, sondern mit Fremderregung zu betreiben. Die Magnetwicklung bleibt infolgedessen auch während der Bremsung dauernd am äußeren Netz (Fig. 30 und 31).

Da dann die Erregung konstant ist, ist die induzierte EMK.:

$$\left. \begin{aligned} E'_a &= k_1 \cdot n \cdot \Phi \\ &= k'_1 \cdot n, \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

und die zu erzeugende Stromstärke J' nur abhängig von der Größe des in den Generatorstromkreis eingeschalteten Widerstandes W , also:

$$J' = \frac{E'_a}{W}.$$

Nimmt die Drehzahl ab, so fallen auch Spannung und Stromstärke, und der Widerstand muß verkleinert werden.

Auch hier werden der Einfachheit wegen beim Kontrolller die gleichen Widerstände, die für das Anlassen dienen, für die Bremsung mitbenutzt.

Erwähnt sei schließlich noch, daß der Nebenschlußmotor in seiner Arbeitsweise als Generator auch dazu verwendet werden kann, den erzeugten Strom ins Netz zurückzuliefern. Man nennt diesen Vorgang die *Nutzbremmung* und wendet sie vereinzelt bei elektrischen Bahnen, sowie bei Kranen (bei sinkender Last) und Arbeitsmaschinen z. B. Hobelmaschinen an, die beim Rücklauf mit erhöhter Geschwindigkeit laufen.

Wenn der Nebenschlußmotor Strom ins Netz geben soll, so muß die Drehzahl desselben über diejenige, die er als Motor besitzt, erhöht werden, damit die im Anker induzierte EMK. zur treibenden EMK. wird, also die Netzspannung überwiegt, denn es ist:

$$\left. \begin{aligned} \text{für den Motor} \quad E_a &= E_k - J_a \cdot W_a, \\ \text{für den Generator} \quad E'_a &= E_k + J_a \cdot W_a. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Daß eine solche Arbeitsweise nicht nur möglich ist, sondern im praktischen Betriebe öfters zur Anwendung kommt, zeigt Fig. 36. Das Diagramm ist dem Antriebe einer Hobelmaschine entnommen, wie derselbe von den Siemens-Schuckert-Werken ausgeführt wird, und es läßt deutlich den Verlauf der Energieaufnahme und -rückgabe erkennen. Der Motor hat eine Leistung von 25 PS bei 440 Volt Spannung. Die Drehzahl des Motors ist für das Hobeln zwischen 500 und 877 in der Minute regelbar, während derselbe beim Rückhube mit 1250 Umdrehungen läuft. Der Regelbereich liegt demnach in dem Verhältnisse von 1 : 2,5. Die Kurven in Fig. 36 sind mit einem Oszillographen aufgenommen worden, entsprechen also den tatsächlich aufgetretenen Momentanwerten.

Die durch die Kurve eingeschlossene Fläche A zeigt die dem Netze entnommene Energie, die notwendig ist, um den Hobeltisch mit Antriebsmechanismus und den Motor von der niedrigsten Tischgeschwindigkeit aus stillzusetzen und auf die gleich große Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung zu beschleunigen. Die Fläche C (bzw. C_1) zeigt die Reibungsarbeit, während die Fläche B die für die Beschleunigung der Massen von der Geschwindigkeit 1 auf 2,5 notwendige Arbeit

andeutet. Vor dem Umsteuern wird das Feld verstärkt, und der Teil *D* der Arbeit (abzüglich C_1) wieder für das Netz vom Motor in seiner Wirkung als Generator gewonnen. Die Fig. 36 läßt leicht erkennen, daß die wiedergewonnene Energie nur wenig geringer als die vorher

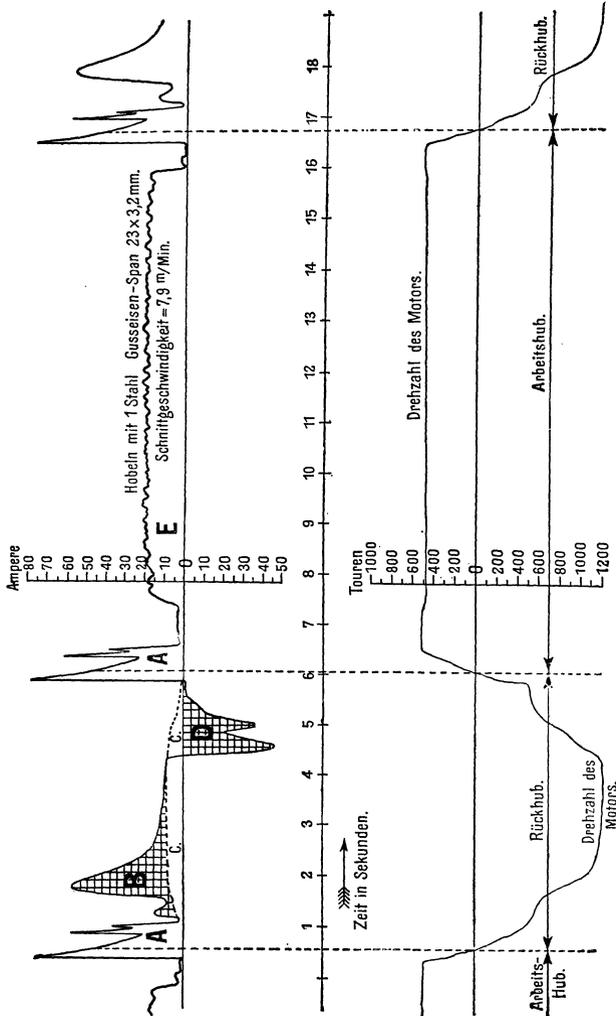


Fig. 36. Diagramm für die Nutzbremmung beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor.

aufgewendete Beschleunigungsenergie *B* ist. Die untere Kurve zeigt in jedem Augenblicke die entsprechende Drehzahl des Motors.

Unter Umständen kann bei der Nutzbremmung eine recht beträchtliche Energieersparnis erzielt werden, die allerdings so sehr von den Betriebsverhältnissen abhängig ist, daß allgemeine Angaben, die eine leichte, rechnerische Verfolgung der Vorgänge ermöglichen, nicht gemacht werden können.

h) Die Apparate im äußeren Stromkreise. Über die Schalter, Sicherungen und Meßinstrumente gilt im allgemeinen das gleiche, was auf S. 23 für den Hauptstrommotor bereits gesagt worden ist. Nur die Ausführung des Anlagers und die Abschaltung der Magnetwicklung bedürfen noch besonderer Erwähnung.

Jeder Anlasser für die Inbetriebsetzung eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors muß so ausgebildet sein, daß das Magnetfeld, noch bevor der Anker Strom erhält, bereits voll vorhanden ist, daß dasselbe also früher eingeschaltet wird als der Anker, denn anderenfalls würde dem Ankerfelde kein genügend starkes Magnetfeld im Augenblicke des Anlaufes gegenüberstehen, weil dasselbe bis zur vollen Ausbildung infolge der magnetischen Trägheit immerhin eine gewisse Zeit braucht, und der Motor dadurch eine abnormal hohe Drehzahl annehmen. Man sagt auch hier, der Motor „geht durch“. Dasselbe gilt in entsprechender Weise auch beim Stillsetzen, d. h. also die Feldwicklung darf erst dann abgeschaltet werden, wenn der Ankerstromkreis bereits unterbrochen ist.

In den Fig. 25 und 28 ist daher der eine Pol der Magnetwicklung an den Anlasser gelegt und dadurch schematisch das oben Gesagte angedeutet. In der praktischen Ausführung des Anlagers wird z. B. bei einem solchen, dessen Kurbel in einer Kreisbewegung zu führen ist, eine zu der Kontaktbahn für das Ab- bzw. Zuschalten von Widerstandsstufen konzentrische Kontaktschiene ohne Unterbrechung angeordnet, auf der eine besondere Bürste schleift. Diese Bürste für die Stromlieferung an die Nebenschlußwicklung eilt der Hauptkontaktbürste beim Anlassen derart vor, daß sie ihre Kontaktschiene eher erreicht, als der Stromschluß zum Widerstande und damit zum Anker erfolgt, so daß also auf diese Weise der oben gestellten Bedingung entsprochen wird. In Fig. 30 und 31 ist die Magnetwicklung überhaupt nicht mit der Steuerwalze verbunden, sondern vor derselben bereits abgezweigt. Der zweite Pol der Magnetwicklung wird in der Regel fest mit der einen Ankerklemme am Motor verbunden. Man erspart dadurch bei Selbsterregung eine Leitung bis zum Schalter bzw. den Sammelschienen.

Ist der Anlasser mit einem besonderen Ausschaltkontakt versehen, der den einen Pol des Motors vollständig von den Sammelschienen abtrennt, so genügt es, wenn auf große Billigkeit in der Anlage gesehen wird, nur einen einpoligen Ausschalter im Motorstromkreise zu verwenden, der dann in die Leitung zum anderen Pole der Maschine eingeschaltet wird. Hierbei ist es aber erforderlich, eine eventuelle Sicherung hinter den Anlasser, also zwischen Anlasser und Motor zu legen, damit sie ohne Spannung gegen Erde im Bedarfsfalle ausgewechselt werden kann. Die Sicherung schützt in diesem Falle aber nicht auch den Anlasser. Man sollte aus diesen Gründen daher stets auch bei jedem Nebenschlußmotor einen doppelpoligen Ausschalter oder in jedem Pole einen Schalter (Automat und Hebelschalter) verwenden.

Steht der Motor still, dann erst darf bzw. muß auch der Magnetstromkreis geöffnet werden, denn geschieht dieses nicht, so besteht die Gefahr, daß die Feldwicklung bei längerer Betriebsunterbrechung,

z. B. während der Nacht, mit der Zeit verbrennt, oder die Isolation der Spulen stark beschädigt wird (Austrocknen, Brüchigwerden der Isolation). Es fehlt nämlich im Stillstande die Kühlung für die Magnetwicklung, die im Betriebe durch den rotierenden Anker entweder in natürlicher Form oder mit Unterstützung durch besonders angebaute Ventilationsflügel hervorgerufen wird, und die bei der Berechnung des Drahtquerschnittes der Feldwicklung berücksichtigt worden ist.

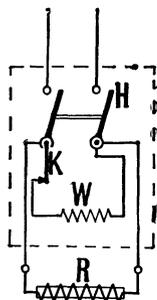


Fig. 37. Schalt-
schema eines
Magnetausschalters.

Ist die Magnetwicklung nicht mit dem Anlasser verbunden, sondern direkt vom Netz abgezweigt, so darf das Ausschalten derselben namentlich bei Motoren größerer Leistung nicht einfach durch Öffnen des Stromkreises erfolgen, weil dabei ebenfalls eine Beschädigung der Wicklungen eintreten kann und zwar aus folgendem Grunde:

Der Magnetstromkreis ist ein solcher induktiver Natur, bei welchem beim Unterbrechen des Stromes das verschwindende Kraftlinienfeld in der Wicklung selbst eine elektromotorische Kraft induziert, die beim schnellen Unterbrechen des Stromes die Netzspannung, für die die Isolation der Wicklung bemessen ist, um ein Vielfaches übersteigen und dadurch einen Isolationsdurchschlag verursachen kann. Um dieses zu vermeiden, verwendet man besondere sog. Magnetausschalter, wie ein solcher z. B. in dem Schema Fig. 30 eingetragen und in den Fig. 37 und 38 abgebildet ist. Dieser Magnetschalter ist derart gebaut, daß die Stromstärke beim Ausschalten nicht plötzlich unterbrochen wird, sondern allmählich bis zum Nullwerte herabsinkt. Die Siemens-Schuckert-Werke benutzen einen induktionsfreien Widerstand, der mit der Magnetwicklung nach der Abtrennung von der Stromquelle in Reihe geschaltet wird (Fig. 37). Im Augenblicke des Ausschaltens des Motorstromkreises wird mittels eines besonderen Schalters ein geschlossener Stromkreis für die Magnetwicklung geschaffen, in welchem der Induktionsstrom gefahrlos verlaufen kann. Dieser Strom hat die gleiche Richtung wie der auszuschaltende, und sein Kraftlinienfeld ergänzt das im Verschwinden begriffene der Magnetwicklung, so daß die Abnahme des Magnetismus langsamer vor sich geht und die Spannung keine gefährliche Höhe erreichen kann. Bei diesem Schalter wird auch das Auftreten eines Lichtbogens dadurch vermieden, daß die Unterbrechung ohne gefährliche Spannungssteigerung mit der Schnelligkeit eines Momentenschalters erfolgt, dessen Bauart ein solcher Schalter aufweisen muß.

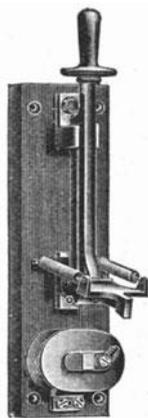


Fig. 38. Ein-
poliger Hand-
Magnetausschalter.

Die Bedienung des Schalters erfolgt durch einen einzigen Handhebel. An diesem Handhebel *H* ist außer dem Schaltmesser, das die Stromquelle abschaltet, noch ein zweiter Hebel *K* befestigt, durch den der

induktionsfreie Widerstand W eingeschaltet wird. Der Widerstand ist in Form einer kleinen Spule auf der Schaltergrundplatte montiert (Fig. 38) und trägt einen Kontakt, der mit dem einen Ende der Spule verbunden ist. Auf diesen Kontakt trifft beim Öffnen des Schaltmessers H der Hebel K und zwar derart eingerichtet, daß, wenn H aus dem Kontakt kommt, der Stromkreis über K sofort geschlossen und damit der Kurzschluß der Magnetwicklung über den induktionsfreien Widerstand hergestellt wird. Die Funkenbildung beim Ausschalten kann bei richtiger Bemessung des Widerstandes W vollständig unterdrückt werden.

Solche Magnetausschalter, die auch zum Ausschalten von Bremsmagneten und ähnlichen, Eisen enthaltenden, Stromkreisen zu benutzen sind, werden ein- und zweipolig und für Stromstärken bis 400 Amper bei Spannungen bis 600 Volt ausgeführt.

Ist die Erregerwicklung unmittelbar mit dem Anlasser verbunden, dann ist in der Regel ein besonderer Magnetausschalter nicht erforderlich, weil der Endkontakt des Anlassers selbst zweckentsprechend ausgebildet wird.

6. Der Gleichstrom-Compoundmotor.

Unter Compoundmotor versteht man ganz allgemein einen Motor mit zwei Wicklungen, von denen die eine im Hauptstrom und die zweite im Nebenschluß zum Anker liegt. Dabei ist aber ein Unterschied dahin zu machen, ob ein Hauptstrommotor noch mit einer Nebenschlußwicklung oder ein Nebenschlußmotor noch mit einer Hauptstromwicklung versehen wird. Beide Arten kommen zur Ausführung, und sie haben dann ihre bestimmten Eigentümlichkeiten.

Wie auf S. 7 angegeben, hat der Hauptstrommotor den Nachteil, daß er ohne Belastung nicht angelassen werden und nicht leerlaufen darf, weil er durchgehen würde. Dieser Übelstand wird beseitigt, wenn man die Magnete noch mit einer Nebenschlußwicklung versieht. Da jetzt eine Nebenschlußerregung vorhanden ist, wird der Verlauf der Magnetisierungskurve und der Drehzahlkurve in Fig. 2 und 4 ein anderer werden. In Fig. 39 ist diese Verschiedenheit vergleichsweise zur Darstellung gebracht. Die Leerlaufcharakteristik verschiebt sich parallel zur Abszissenachse von I nach II , und unter Benutzung dieser Kurve II findet man die neue Drehzahlkurve $n' n'$ nach dem gleichen zeichnerischen Verfahren wie für die Ermittlung der ursprünglichen n -Kurve. Aus der Fig. 39 ist zu ersehen, daß die $n' n'$ -Kurve einen flacheren Verlauf hat als die ursprüngliche Drehzahlkurve und die Ordinatenachse in einem Punkte p schneidet, weil die Nebenschlußwicklung auch bei der Belastung Null ($J = 0$) ein Feld erzeugt, das das Durchgehen des Motors verhindert.

Den Nebenschlußmotor zu compoundieren, kann aus zweierlei Gründen erwünscht sein. Einmal kann die Drehzahl dieses Motors, wenn man sich des auf S. 27 Gesagten erinnert, durch die

zusätzliche Wicklung bei allen Belastungen praktisch unverändert gehalten werden; dann hat also die Hauptstromwicklung den Zweck, die Verschiedenheiten der Einflüsse von Ohmschem Spannungsabfall und Ankerrückwirkung auf die Umdrehungszahl auszugleichen. Eine vollkommen gleichbleibende Drehzahl kann aber auch hierdurch nicht erzielt werden, weil die Ankerrückwirkung nicht direkt proportional mit dem Strome ist, und aus diesem Grunde wird die Compoundierung für diesen Zweck so gut wie gar nicht angewendet.

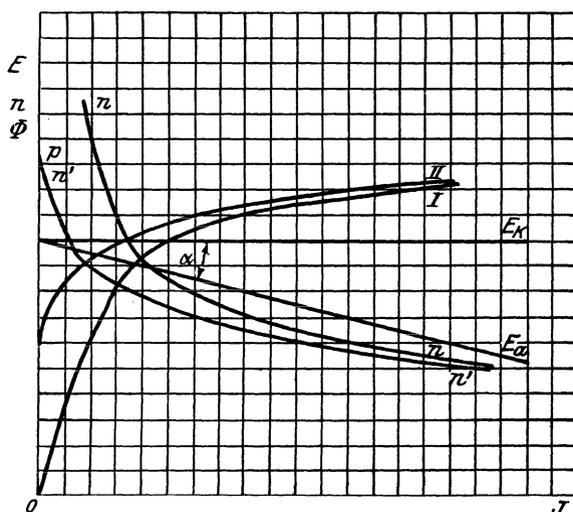


Fig. 39. Motordiagramm für den compoundierten Gleichstrom-Hauptstrommotor.

Wird jedoch vom Nebenschlußmotor ein größeres Anlaufdrehmoment verlangt, als dieser Motor mit reiner Nebenschlußerregung zu entwickeln imstande ist, so kann dieses mit Hilfe einer zusätzlichen Hauptstromwicklung erreicht werden. Dabei empfiehlt es sich aber, nach Beendigung des Anlaufes die Hauptstromwicklung abzuschalten, um einmal den Wirkungsgrad wenn auch nur um ein wenig zu erhöhen, und ferner bei starker Compoundierung dem Motor für den Leerlauf nicht Hauptstrommotor-Eigenschaft zu geben. Läßt sich das Abschalten der Zusatzwicklung im Betriebe nicht gut durchführen, dann muß mit Rücksicht auf das zuletzt Gesagte der Motor noch mit einer Hilfscompoundwicklung versehen werden.

Drehzahl und Drehmoment lassen sich für den Compoundmotor nicht in gleicher Weise durch einfache Gleichungen zur Darstellung bringen wie für die Motoren mit reiner Schaltung, denn es werden D und n naturgemäß in erster Linie davon abhängen, ob es sich um einen compoundierten Hauptstrom- oder Nebenschlußmotor handelt. Der Verlauf der charakteristischen Kurven und die Arbeitsweise beim Anlassen, bei Belastungsschwankungen usw. wird sich daher nur nach der Stärke der Compoundierung richten.

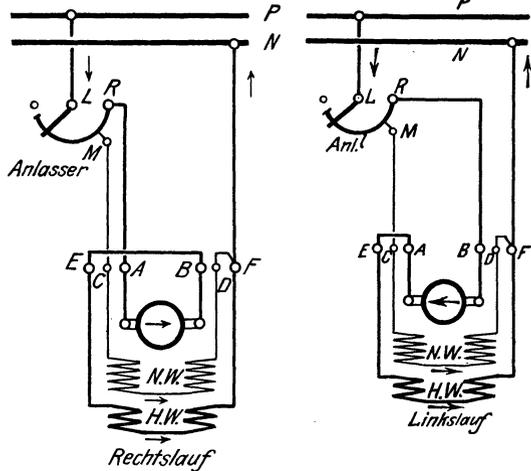
7. Die Regelung des Compoundmotors.

Das Anlassen und die Regelung erfolgt in der Regel nach der Grundsaltung des Motors also ohne Berücksichtigung der Compoundierung. In Fig. 40 bis 43 sind die Schaltungen für Rechts- und Linkslauf solcher Motoren dargestellt; von einer besonderen Erklärung kann abgesehen werden. Nur sei darauf aufmerksam gemacht, daß bei der Umkehr der Drehrichtung die Compoundwicklung nicht mit umgeschaltet werden darf, wenn die Ankerklemmen vertauscht werden (Fig. 41 und 43).

Bei Walzenzugmotoren, die beispielsweise mit bis 100% Überlastung anlaufen müssen, verwendet man gleichfalls gemischte Nebenschluß- und Hauptstromerregung und versieht den Motor außerdem noch mit Wendepolen.

Die Nebenschlußwicklung dient zur Einstellung der Grunddrehzahl je nach dem zu verarbeitenden Walzgute, während mit der Hauptstromwicklung durch einen Widerstandsregler der Schlupf in der Weise eingestellt wird, daß der Motor genau nach der Art des Walzgutes mit der Umlaufzahl nachgibt und damit die Schwungmassen (Schwungräder) zur Geltung kommen läßt. Hierdurch werden die großen Schwankungen in der Stromaufnahme und damit die Stromstöße auf das Netz erheblich gemildert.

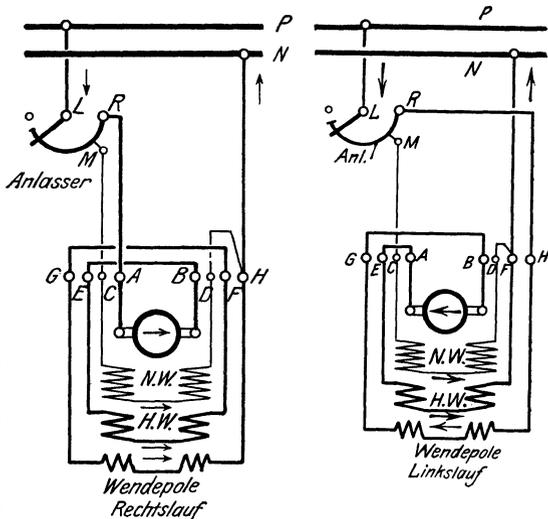
Über die Apparate im äußeren Stromkreise gilt sinngemäß das auf S. 23 bzw. 43 Gesagte.



eines Gleichstrom-Compoundmotors.

Fig. 40.

Fig. 41.



eines Gleichstrom-Compoundmotors.

Fig. 42.

Fig. 43.

B. Die Ein- und Mehrphasen-Wechselstrom-Induktionsmotoren.

8. Der Ein- und Mehrphasen-Wechselstrommotor im allgemeinen.

Mit der zunehmenden Verwendung des elektrischen Stromes zum Antriebe aller Arten von Arbeitsmaschinen auch für die größten Leistungen kommt man, wenn es sich um weitverzweigte Anlagen und große zu übertragende Energiemengen handelt, bei Gleichstrom bald an eine Grenze, die durch die Höhe der benutzbaren Spannung gezogen ist. Gleichstrommotoren über 500 bis im Maximum 750 Volt (mit Ausnahme der elektrischen Bahnen und vereinzelter besonderer Fälle, bei denen man heute bis 2000 Volt geht) werden für die Zwecke des Arbeitsmaschinenantriebes nicht mehr verwendet, weil sie in der Herstellung des Kommutators Schwierigkeiten machen und sehr reichlich dimensioniert werden müssen, im Preise demzufolge stark steigen und einer besonders sorgfältigen Wartung bedürfen, um Betriebsstörungen zu vermeiden. Außerdem gelten Anlagen über 500 Volt, also über 250 Volt zwischen Leiter und Erde, nach den Errichtungsvorschriften des V. D. E. bereits als Hochspannungsanlagen und sind infolgedessen besonderen Ausführungen unterworfen. Ist aber eine hohe Spannung vorhanden, dann muß dieselbe für Motoren kleinerer Leistung herabgesetzt werden, was bei Gleichstrom nur durch rotierende Umformer (S. 192 bis 195) möglich ist und die Anlage nicht nur ganz erheblich verteuert, sondern auch den Gesamtwirkungsgrad unwirtschaftlich beeinträchtigt. Ferner erhält man infolge der geringen Spannungen bei großer Leistung mit Rücksicht auf den Verlust so starke Leitungsquerschnitte, daß eine mehrfache Unterteilung der Zuleitung nötig wird. Das erhöht wiederum die Kosten der Gesamtanlage und drängt in Gegenüberstellung mit diesen dadurch die gewiß ganz hervorragenden Eigenschaften der Gleichstrommotoren mehr und mehr in den Hintergrund.

Wenn auch diese Motoren selbst für die größten Leistungen und die schwersten Betriebsverhältnisse, wie sie in Hütten- und Walzwerken vorkommen, heute mit vollkommener Betriebssicherheit gebaut werden können, so geht man besonders bei umfangreicheren und auf Vergrößerung berechneten Anlagen immer mehr dazu über, an Stelle des Gleichstrommotors den ein- oder mehrphasigen Wechselstrommotor zu verwenden, wenn es die Bedingungen, die an den Antriebsmotor gestellt werden, nur irgend gestatten (Anlaufdrehmoment, Drehzahlregelung usw.). Das geschieht in der Hauptsache deswegen, weil die Spannung durch die Benutzung der einfachen Transformatoren beliebig hoch gewählt bzw. leicht und ohne bedeutende Verschlechterung des Gesamtwirkungsgrades herabgesetzt (herabtransformiert) werden kann. Hierzu

kommt oftmals noch der Zwang, Wechselstrom als Stromart wählen zu müssen, wenn nämlich die Stromerzeugungsstation in größerer Entfernung vom Gebrauchsgebiete angelegt werden muß bzw. vorhanden ist (Überlandzentralen usw.).

Auch die Ein- und Mehrphasenstrommotoren genügen in ihrer Arbeitsweise einer ganzen Reihe von Bedingungen, die durch die Arbeitsmaschinen und die Betriebsverhältnisse gefordert werden.

So allgemeine Gleichungen wie auf S. 2 für die Gleichstrommotoren entwickelt lassen sich indessen für die Wechselstrommotoren nicht aufstellen, denn man unterscheidet bei letzteren, wie wohl als bekannt vorausgesetzt werden darf, je nach der Bauart zwischen: Induktions- und Kollektormotoren. Während erstere sowohl für Mehrphasen- wie auch für Einphasenstrom gebaut werden, wurden die Kollektormotoren bisher nur mit Einphasenstrom betrieben, und erst in jüngster Zeit ist man dazu übergegangen, auch die Mehrphasenmotoren, besonders den Drehstrommotor, mit einem Kollektor zu versehen.

Die Induktionsmotoren teilt man ferner ein in: synchrone und asynchrone d. h. in solche, die mit einer durch die Periodenzahl und Polzahl unverändert festgelegten, mit den Stromerzeugern im Synchronismus (Phasen- und Periodengleichheit) befindlichen Drehzahl laufen, und solche, die von dieser synchronen Drehzahl abweichen. Über die Synchronmotoren soll erst im II. Abschnitte ausführlicher gesprochen werden, weil sie nur verhältnismäßig selten und für ganz bestimmte Fälle zur Verwendung kommen.

In der nun folgenden Betrachtung ist der asynchrone Dreiphasen- oder -Drehstrommotor vorangestellt, weil dieser für den Arbeitsmaschinenantrieb bisher die bei weitem größte Verbreitung von allen Wechselstrommotoren gefunden hat.

9. Der asynchrone Drehstrom-Induktionsmotor.

Eine ebenso häufige Verwendung wie der Gleichstrom-Nebenschlußmotor findet der asynchrone Drehstrommotor (Dreiphasen-Wechselstrommotor) dann, wenn es sich um Verhältnisse handelt, bei denen eine feinstufige Änderung der Umdrehungszahl nicht erforderlich ist, weil dieser Motor hinsichtlich seiner Drehzahl bei normalem Betriebe und schwankender Belastung ein dem Nebenschlußmotor ähnliches Verhalten zeigt, während dagegen z. B. das Anlaufdrehmoment bei dieser Motorgattung je nach der Schaltung der Läuferwicklung und der Art des Anlassens günstiger ist. Außerdem besitzt er die großen Vorteile, unmittelbar mit Hochspannung betrieben werden zu können — was bei hohen Leistungen ganz besonders von Bedeutung ist und oftmals das Fortlassen eines Transformators ermöglicht — und ferner großer Überlastbarkeit.

Der Aufbau des Motors muß als bekannt vorausgesetzt werden. Die Wirkungsweise ist kurz folgende: Der mit einer Dreiphasenwicklung versehene Ständer (Stator) erzeugt ein Drehfeld, das auf den Läufer

(Rotor) ein Drehmoment ausübt. Letzterer ist im Betriebe stets kurzgeschlossen. Das sich drehende magnetische Feld des Ständers schneidet die Läuferwicklung und versetzt damit den Läufer aus bekannten Gründen in Drehung. Da die durch Luft- und Lagerreibung bedingten Widerstände nicht verschwindend klein gehalten werden können, bleibt der Läufer gegenüber dem Drehfelde zurück. Dadurch werden Kraftlinien geschnitten, infolgedessen ein Strom in der Läuferwicklung induziert, und es entsteht ein Drehmoment. Die Drehzahl des Läufers ist also nicht die gleiche (synchrone) wie die des primären Drehfeldes, und aus diesem Grunde wird der Motor als *asynchroner* bezeichnet. Das Zurückbleiben des Läufers gegenüber der Geschwindigkeit des Statorfeldes nennt man die *Schlüpfung*. Im Stillstande, wenn die Läuferwicklung offen und der Ständer eingeschaltet ist, ist ein solcher Motor nichts anderes als ein Transformator mit offener Sekundärwicklung.

Die charakteristischen Eigenschaften bei den verschiedenen Betriebsverhältnissen sollen nun gleichfalls an Hand der wichtigsten Gleichungen und Kurven betrachtet werden.

Bezeichnet:

ω_1, ω_2 die Winkelgeschwindigkeiten des Statorfeldes bzw. des Läufers,

n_1, n_2 die Drehzahlen des Statorfeldes bzw. des Läufers,
 c die Periodenzahl (Frequenz) des zugeführten Stromes,

so ist die Schlüpfung¹⁾ definiert durch:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}, \quad (44)$$

oder auch, da:

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{60}, \quad \omega_2 = \frac{2\pi \cdot n_2}{60}, \quad (45)$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

bzw. in Prozenten ausgedrückt:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100.$$

Daraus folgt die Umdrehungszahl des Läufers:

$$n_2 = n_1(1 - s), \quad (46)$$

und da bekanntlich die Periodenzahl des Wechselstromes:

$$c = \frac{p \cdot n_1}{60}, \quad (47)$$

¹⁾ Die Schlüpfung kann durch ein Asynchronoskop gemessen werden; siehe S. 137 und Dr. F. Horschitz: Das Asynchronometer, ein neuer Schlüpfungsmesser. E. K. B. 1909, Heft 24.

also hier:

$$n_1 = \frac{60 \cdot c}{p}$$

(p = Polpaarzahl des Ständers),

so geht die Gl. (46) über in:

$$n_2 = \frac{60 \cdot c}{p} (1 - s), \quad (48)$$

d. h. die Drehzahl des Läufers ist proportional der Periodenzahl des zugeführten Stromes und abhängig von der Polzahl des Ständers.

Die Schlüpfung s nimmt mit zunehmender Belastung zu; sie ist bei stillstehendem Läufer = 1 und wäre bei synchronem Lauf = 0,

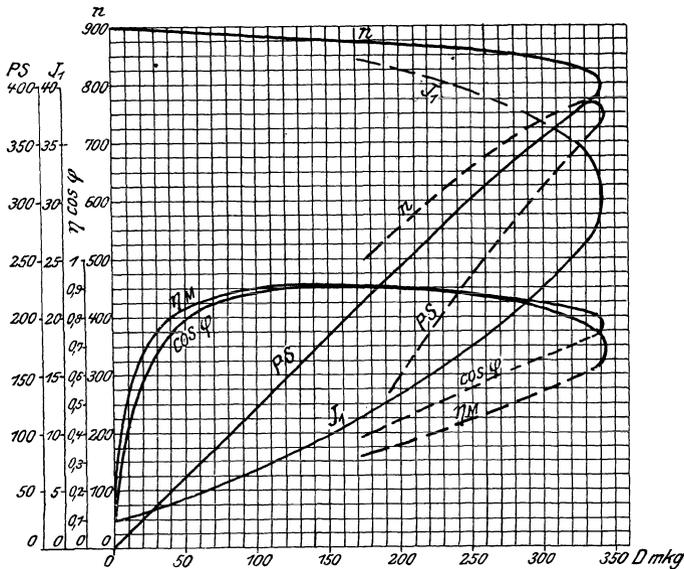


Fig. 44. Vollständiges Motordiagramm für den Drehstrom-Asynchronmotor.

dem der Läufer zustrebt, ohne ihn je zu erreichen. Da s im Höchste-falle bei kleinen Motoren bis zu 5% und bei großen bis zu 3% bei voller Belastung beträgt, wird also ein Drehstrommotor so lange mit annähernd gleichbleibender Umdrehungszahl bei allen Belastungen laufen, solange die Frequenz des zugeführten Stromes unverändert bleibt, denn die Drehzahlzunahme infolge der Verringerung der Schlüpfung bei abnehmender Belastung ist in den häufigsten Fällen praktisch belanglos, sofern s nicht künstlich vergrößert wird (Schlupf-widerstand). Der Motor gleicht also nach dieser Richtung ganz einem Gleichstrom-Nebenschluß-motor. Aus dem Motordiagramm Fig. 44 ist der Verlauf der Drehzahlkurve (n) ersichtlich.

Das Drehmoment D des Läufers kann sich von demjenigen des vom Ständer ausgeübten nur um so viel unterscheiden, als die dem Ständer zugeführte Energie von der vom Läufer nutzbar abgegebenen Leistung, also durch den Verlust:

$$V = m \cdot J_2^2 \cdot W_2, \quad (49a)$$

wenn mit m die Anzahl der Phasen und mit dem Index 2 der Strom bzw. Widerstand der Läuferwicklung bezeichnet wird. Da nun die aufgenommene Energie $L_{M_1} = \omega_1 \cdot D$ und die abgegebene Arbeit $L_{M_2} = \omega_2 \cdot D$ ist, so folgt aus:

$$V = L_{M_1} - L_{M_2} = D \cdot (\omega_1 - \omega_2) = m \cdot J_2^2 \cdot W_2 \text{ Watt}, \quad (49b)$$

$$D = \frac{m \cdot J_2^2 \cdot W_2}{s \cdot \omega_1},$$

bzw. durch Umformung und in mkg/sec ausgedrückt:

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{75 \cdot m \cdot J_2^2 \cdot W_2 \cdot p}{736 \cdot s \cdot 2 \pi \cdot c} \\ &= 0,0162 \cdot \frac{m \cdot J_2^2 \cdot W_2 \cdot p}{s \cdot c} \text{ mkg.} \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

Ist r der Halbmesser des Läufers in Metern, so ist die Zugkraft:

$$Z = 0,0162 \cdot \frac{m \cdot J_2^2 \cdot W_2 \cdot p}{r \cdot s \cdot c} \text{ mkg.} \quad (51)$$

Wie aus Gl. (50) ersichtlich, ist das Drehmoment bei vollem Lauf des Motors, wenn der Läufer kurzgeschlossen ist, eine Funktion der sekundären Stromstärke, denn für diesen Fall kann die Gl. (50) auch in der Form geschrieben werden:

$$D = \text{const.} \cdot \frac{J_2^2}{s},$$

und da die Schlüpfung eine Funktion der Belastung ist — zunächst immer bei kurzgeschlossenem Läufer —, so ändert sich das Drehmoment annähernd mit der Belastung. Andererseits ist das Drehmoment auch abhängig vom Widerstande des Läuferstromkreises, der Polzahl und der Frequenz des zugeführten Stromes.

In Fig. 45 ist der Verlauf des Drehmomentes in Abhängigkeit von der Schlüpfung s dargestellt und zwar bei verschiedenem sekundären Widerstande W_2 . Eine Änderung von W_2 kann, wie schon hier kurz bemerkt sein soll, durch Einschalten von besonderem Ohmschen Widerstande z. B. in Form eines regulierbaren Anlassers in den Läuferstromkreis erfolgen. Weil dieser Fall in der Praxis häufig vorkommt, sollen die entsprechenden Kurven für D näher betrachtet werden, soweit das für den projektierenden Ingenieur von Bedeutung ist.

Der Verlauf des Drehmomentes nach der Kurve A der Fig. 45 ist in der Regel der normale. Der Läufer ist kurzgeschlossen und demnach

$W_2 = \text{const.}$ Mit wachsender Belastung bzw. Überlastung, also zunehmender Schlüpfung bzw. sinkender Drehzahl, nimmt das Drehmoment dann zunächst noch weiter zu, bis es bei einer bestimmten Schlüpfung seinen Höchstwert erreicht. Wird der Motor weiter belastet, dann fällt das Drehmoment rasch ab, und der Motor kommt zum Stillstande. Das größte Drehmoment, was bei der üblichen Bauart vom Motor abgegeben werden kann, beträgt in der Regel das 1,5- bis 2fache des normalen. Der Motor kann demnach gewöhnlich bedeutend überlastet werden, bis er abfällt. Voraussetzung hierbei ist allerdings, daß die Klemmenspannung unverändert bleibt, worauf weiter unten noch besonders eingegangen werden wird. Ist der Motor bis zum Stillstande überlastet und nicht inzwischen durch das Ansprechen der Sicherungen oder des automatischen Schalters vom Netze getrennt, dann nimmt er einen so großen Strom auf, daß er in kurzer Zeit zerstört werden kann. Es ist also in der Bemessung der Sicherungen bzw. der Einstellung der Automaten Vorsicht zu üben.

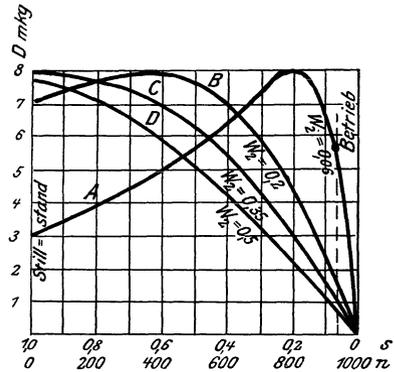


Fig. 45. Drehmomentkurven bei verschiedenem Läuferwiderstande.

Durch Änderung von W_2 kann nun D vergrößert werden, wie das die Kurven B, C und D der Fig. 45 erkennen lassen. Das geschieht allerdings auf Kosten des Wirkungsgrades, weil dabei selbstverständlich der Verlust V bedeutend steigt. Man verwendet daher Widerstände im Läuferstromkreise in der Mehrzahl der Fälle nur zum Anlassen und gibt der Läuferwicklung selbst nur einen so großen Widerstand, daß einerseits der Motor noch überlastet werden kann, ohne sofort abzufallen, andererseits η_M und die Drehzahl die größtmöglichen Werte erreichen.

Über den Verlauf des Anlaufdrehmomentes und die Größe derselben wird bei den verschiedenen Anlaßmethoden besonders gesprochen werden.

Schließlich interessiert noch die vom Motor aufgenommene elektrische Energie:

$$L_M^0 = E_k \cdot J_1 \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi_M = \frac{736 \cdot \text{PS}}{\eta_M} \text{ Watt}, \quad (52)$$

und daraus ergibt sich die primäre Stromstärke:

$$J_1 = \frac{736 \cdot \text{PS}}{E_k \cdot \sqrt{3} \cdot \eta_M \cdot \cos \varphi_M}. \quad (53)$$

Man nennt $\cos \varphi_M$ den Leistungsfaktor des Motors, der bei solchen kleiner und mittlerer Leistung zu etwa 0,75 bis 0,85 und bei großen Leistungen bis zu etwa 0,92 beträgt.

Im Motordiagramm (Fig. 44) sind wiederum die charakteristischen Kurven zusammengestellt, und zwar für die abgegebene Leistung, die Drehzahl, den primär aufgenommenen Strom, den Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor in Abhängigkeit vom Drehmomente. Man kann aus dem Verlaufe der Kurven das Verhalten der einzelnen Größen zueinander bei verschiedenem Drehmomente leicht erkennen. Aus dem Diagramm geht ferner hervor, daß der Motor wie oben bereits auseinandergesetzt über ein bestimmtes Drehmoment nicht überlastet werden darf, weil er dann rasch in seiner Drehzahl und damit auch in seiner Leistung abfällt. Das entspricht dem punktierten Verlauf der einzelnen Schaulinien.

10. Die Regelung des asynchronen Drehstrommotors.

a) Die Regelung der Drehzahl im allgemeinen. Eine Regelung der Drehzahl, wozu auch das Anlassen des Motors gerechnet werden soll, kann unter Hinweis auf das über die Drehzahl bisher Gesagte auf eine der folgenden Arten vorgenommen werden durch Änderung:

- 1.) der Schlüpfung, d. h. durch Änderung des Widerstandes des Läuferstromkreises W_2 ,
- 2.) der Klemmenspannung, also der Spannung, an die der Motor angeschlossen ist,
- 3.) der Frequenz (Periodenzahl) des zugeführten Stromes,
- 4.) der Polzahl.

Auch hier sollen nur die in der Praxis gebräuchlicheren Regelungsarten besprochen und das Anlassen vorangestellt werden.

b) Das Anlaufdrehmoment. Bei der Wahl einer dieser Regelungsmöglichkeiten zum Zwecke des Anlassens kommt es in erster Linie darauf an, welches Drehmoment zu entwickeln ist; ferner spielen aber auch die Leistung, die Drehzahl selbst und die Spannung, mit der der Motor betrieben werden soll, eine bedeutsame Rolle, und zwar weil die Formen für die Inbetriebsetzung von Drehstrom-Asynchronmotoren wesentlich zahlreicher sind als bei den Gleichstrommotoren.

Über das Anlaufdrehmoment ist zunächst noch einiges zu erwähnen. Im Augenblicke des Anlaufes ist $s = 1$, und die Gl. (50) geht über in die Form:

$$D_A = 0,0162 \cdot \frac{m \cdot J_2^2 \cdot W_2 \cdot p}{c}, \quad (54)$$

also ist das Anlaufdrehmoment abhängig vom sekundären Widerstande und von der Periodenzahl des zugeführten Stromes. Andererseits ist wie bereits angegeben der Motor bei Stillstand nichts anderes als ein Transformator, dessen Amperwindungen für den primären und sekundären Teil einander gleich und gleich:

$$J_1 \cdot N_1 = J_2 \cdot N_2$$

sind, wenn mit N_1 bzw. N_2 die Windungszahlen der Ständer- bzw. der Läuferwicklung pro Phase bezeichnet werden. Mit dieser Berücksichtigung geht die Gl. (54) über in:

$$D_A = 0,0162 \cdot \frac{m \cdot J_1^2 \cdot N_1^2 \cdot W_2 \cdot p}{N_2^2 \cdot c} . \quad (55)$$

Aus den Gl. (54) und (55) können bereits eine Reihe von Schlüssen auf das Verhalten und die Abhängigkeit des Anlaufdrehmomentes von den einzelnen Größen wie J_1 , J_2 , W_2 , c usw. gezogen werden, so z. B. daß das Anlaufdrehmoment proportional ist dem Quadrate der primären Stromstärke und dem sekundären Widerstande. Um aber mit Rücksicht auf die verschiedenen Anlaßmöglichkeiten einen vollständigen Überblick über das Anlaufdrehmoment zu gewinnen, soll noch eine dritte Gleichung für D_A und zwar in Abhängigkeit von der primären EMK. E_1 eingeschaltet werden, deren Ableitung hier weniger von Interesse ist. Es ist angenähert auch¹⁾:

$$D_A = \frac{m \cdot p \cdot N_2^2 \cdot E_1^2}{2 \pi \cdot N_1^2 \cdot \gamma^2} \cdot \frac{W_2}{c \cdot [W_2^2 + (2 \pi \cdot c \cdot L_2)^2]} . \quad (56)$$

Das Drehmoment ist also auch proportional dem Quadrate der primären EMK. und um so größer, je kleiner die Periodenzahl des zugeführten Stromes ist. E_1 ist annähernd auch gleich der Klemmenspannung E_k zu setzen.

Unter Benutzung dieser Gl. (55) und (56) wird nun die Größe des Anlaufdrehmomentes bei den einzelnen Anlaßmethoden jedesmal besonders beleuchtet werden.

Wird ein großes Anlaufdrehmoment verlangt, so ist ganz besonders darauf zu achten, daß der Spannungsabfall in der Zuleitung nicht zu groß wird, denn nach Gl. (56) ist D_A proportional dem Quadrate der Klemmenspannung E_k . Man kann, um nicht zu starke Leitungsquerschnitte zu erhalten, in solchem Falle derart verfahren, daß man den Motor für eine

¹⁾ Die Ableitung der Gl. (55) ist kurz folgende (Näheres siehe Dr. G. Benischke: Die asynchronen Drehstrommotoren, Bd. V der Elektrotechnik in Einzeldarstellungen):

Das gemeinsame Feld Φ , das von dem Ständer in den Läufer übertritt, und das nicht gleich ist dem von der Ständerwicklung erzeugten Φ_1 , sondern infolge der Streuung nur:

$$\Phi = \frac{\Phi_1}{\gamma} , \quad \gamma > 1 ,$$

erzeugt in der Läuferwicklung die EMK.:

$$E_{2i} = \frac{2 \pi}{\sqrt{2}} c_2 \cdot N_2 \cdot \Phi .$$

Weiter ist die Stromstärke J_2 , wenn L_2 die dem sekundären Streufelde entsprechende Selbstinduktion bezeichnet:

$$J_2^2 = \frac{E_{2i}^2}{W_2^2 + (2 \pi \cdot c_2 \cdot L_2)^2} .$$

Setzt man diese Werte in die Gleichung für das Drehmoment ein, so erhält man:

$$D_A = \frac{m \cdot p \cdot N_2^2 \cdot E_1^2}{2 \pi \cdot N_1^2 \cdot \gamma^2} \cdot \frac{W_2}{c \cdot [W_2^2 + (2 \pi \cdot c \cdot L_2)^2]} .$$

geringere als die konstant zu haltende Netzspannung wickelt, also z. B. bei 500 Volt Sammelschienenspannung für 450 oder 480 Volt, doch darf man hierbei nicht zu weit gehen, weil sonst der Magnetisierungsstrom in der Ständerwicklung zu groß wird. Die Folge davon ist eine zu starke Erwärmung des Ständers und dadurch eine Gefährdung der Wicklung.

e) **Das Anlassen des Schleifringankermotors.** Um ein großes Anlaufdrehmoment zu erzielen, muß nach Gl. (54) der sekundäre Wider-

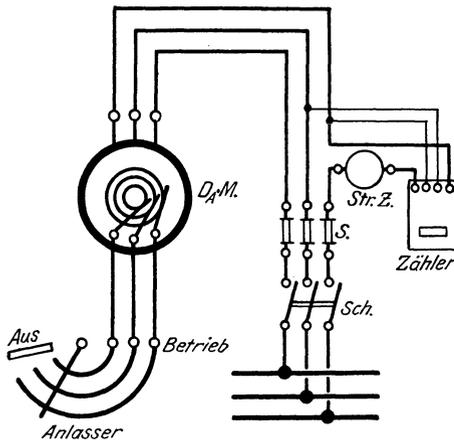


Fig. 46. Drehstrom-Asynchronmotor mit Schleifringanker und Anlasser.

geschlossener wird (Fig. 46). Das ist statthaft, denn W_2 bedeutet den gesamten sekundären Widerstand, und auf welche Weise dieser gebildet wird, ob nur durch die Läuferwicklung oder durch diese und einen besonderen Widerstand, ist gleichgültig.

Dieser gesamte Widerstand, also der Läuferwiderstand W_2 zusammen mit dem Vorschaltwiderstand W_v :

$$W_2 + W_v = W'_2$$

wird nun so groß gemacht, daß das Drehmoment beim Anlauf seinen größten Wert erreicht (Kurve *C* in Fig. 45).

Der für diese Art des Anlassens gebaute Motor wird mit Schleifringankermotor bezeichnet. Er wird für die größten Leistungen und die dabei vorkommenden Drehzahlen ausgeführt. Solche Motoren werden demnach überall dort zur Verwendung kommen müssen, wo es sich um die Entwicklung einer hohen Anzugskraft handelt (Hebezeuge, Verladebrücken, Werkzeugmaschinen usw.). Sie besitzen ferner den Vorteil, daß der Stromstoß beim Anlassen nur gering ist, denn für diesen Fall kann in der Gl. (56) das Glied $(2\pi \cdot c \cdot L_2)^2$ gegenüber W_2^2 vernachlässigt werden, und man erhält:

$$D_A = \frac{m \cdot p \cdot N_2^2 \cdot E_1^2}{2\pi \cdot N_1^2 \cdot \gamma^2 \cdot c \cdot W_2} \quad (57)$$

Das Anlassen derartiger Motoren erfolgt also nur durch Einschalten eines veränderlichen Widerstandes in den Läuferstromkreis (Fig. 46). Um die Bürsten und Schleifringe beim vollen Lauf zu schonen und auch die durch diese erzeugten Reibungsverluste zu beseitigen, empfiehlt es sich, erstere von Hand oder automatisch abzuheben. Dabei muß dann aber gleichzeitig die Läuferwicklung kurzgeschlossen werden, da durch das Abheben der Bürsten von den Schleifringen der bisher durch den Anlasser erfolgte Kurzschluß aufgehoben wird. Selbsttätig wirkende sog. Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtungen, die in der Weise arbeiten, daß bei Überschreitung einer höchsten Drehzahl der Kurzschluß erfolgt und beim Unterschreiten einer gewissen geringsten Umdrehungszahl die Bürsten wieder aufgelegt werden, sind den von Hand zu bedienenden stets vorzuziehen, denn wenn nach Ausschalten des Motors dieser beim erneuten Inbetriebsetzen durch ein Versehen mit kurzgeschlossenem Läufer anlaufen würde, können Betriebsstörungen der mannigfachsten Art durch den dann auftretenden Stromstoß und die schnelle Geschwindigkeitszunahme sowohl am Motor selbst wie auch an der angetriebenen Maschine und schließlich an den Stromerzeugern die Folge sein. In Fig. 64 ist gezeigt, wie die Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung noch mit den Schaltern durch Hilfsstromkreise elektrisch in Verbindung gebracht werden kann, um sicher zu erreichen, daß auch tatsächlich nach Einstellen des Betriebes beim erneuten Inbetriebsetzen der Kurzschluß der Läuferwicklung aufgehoben ist und die Bürsten auf den Schleifringen liegen. Die Erläuterungen sind auf S. 73 gegeben.

Besitzt der Läufer keine Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung, dann müssen die Verbindungsleitungen zwischen Schleifringen und Anlasser möglichst starken Querschnitt erhalten, weil anderenfalls durch den Widerstand dieser der sekundäre Widerstand vergrößert und damit die Drehzahl und die Nutzleistung des Motors herabgesetzt werden. Es ist in solchem Falle also nicht ohne weiteres zulässig, den Anlasser in beliebiger Entfernung vom Motor z. B. in der Nähe der Schaltanlage aufzustellen.

Wie stark der Querschnitt dieser Verbindungsleitungen sein muß, hängt von der zuzulassenden Verminderung der Drehzahl ab. Bezeichnet n_z einen angenommenen Drehzahlverlust, n_s die synchrone Drehzahl in der Minute, E_B die Spannung zwischen zwei Schleifringbürsten des Läufers bei Stillstand, l die einfache Länge der Verbindungsleitung in m, q den Querschnitt derselben in qmm und ρ den spezifischen Widerstand des Leitungsmaterials (für Kupfer $\rho = 0,0175$), dann ist:

$$q = \frac{l \cdot J_2 \cdot \sqrt{3} \cdot n_s}{n_z \cdot E_B} \rho, \quad (58)$$

worin:

$$J_2 = \frac{736 \cdot \text{PS}}{\sqrt{3} \cdot E_B \cdot \cos \varphi_M}.$$

Da das Anlassen sehr großer Motoren, die mit Schwungmassen gekuppelt sind, mittels Widerständen im Läuferstromkreise mit Rück-

sicht auf die den Massen zu erteilende Beschleunigung und die Erwärmung des Motors in der Anlaufperiode viel Geschick und Aufmerksamkeit erfordert, ist man neuerdings dazu übergegangen, das Abschalten der einzelnen Widerstandsstufen selbsttätig besorgen zu lassen. Man verwendet hierfür eine Anzahl von Relais, sog. „Schützen“ und bezeichnet dann die ganze Anordnung als Schützensteuerung. Das Ansprechen der Schützen kann auf drei verschiedene Arten hervorgerufen werden und zwar einmal in Abhängigkeit von der Zeit (Zeitrelais), ferner in Abhängigkeit von der Gegen-EMK. des Läufers und schließlich in Abhängigkeit vom Strome. Die Zeitrelais sind abhängig

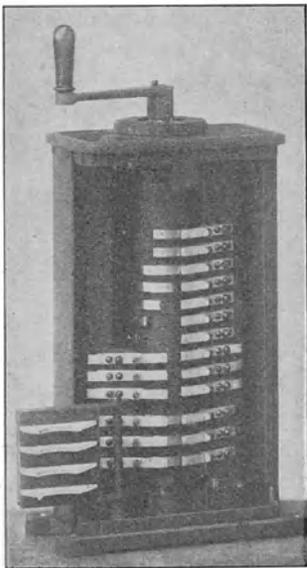


Fig. 47. Drehstrom-Anlaßwalze (geöffnet).

von der Belastung und schalten einmal eingestellt bei größerer als der zugelassenen Belastung zu schnell, sind demnach hier unbrauchbar. Die Betätigung der Schützen durch die Gegen-EMK. beruht auf dem Grundgedanken, daß mit wachsender Drehzahl auch die induzierte EMK. des Läufers steigt. Diese Schaltung ist die einfachste, welche in Abhängigkeit von der Motorbelastung wirkt, besitzt aber den Nachteil, daß sie bei Spannungsschwankungen im Netze versagt.

Man benutzt infolgedessen am vorteilhaftesten die vom Strome beeinflussten Schützen, die bei einem bestimmten, von vornherein festgesetzten und eingestellten Strome anspringen und dabei das Ein- bzw. Ausschalten der einzelnen Widerstandsstufen regeln. Solche Strombegrenzkontroller sind von der General Electric Comp. für die 2000 und 6000 PS, 6600 Volt Drehstrom-Asynchronmotoren der Walzwerke der Indiana Comp. in Gary gebaut worden¹⁾. Auf eine nähere Beschreibung und die Wieder-

gabe eines Schaltungsschemas muß jedoch verzichtet werden, weil solche Steuerungen nur ganz vereinzelt und für besondere Fälle angewendet werden. Erwähnt sei nur, daß das Einleiten des selbsttätig verlaufenden Anlassens und der Wechsel der Drehrichtung durch eine besondere kleine Steuerwalze vorgenommen wird, und die Schützen mit Gleichstrom als Hilfsstrom arbeiten.

Um Motoren so großer Leistung beim Stillsetzen zu bremsen, wird bei der obengenannten Anlage in der Weise verfahren, daß dem Ständer Gleichstrom zugeführt wird. Der Motor läuft dann als Generator, und die erzeugte Energie wird in den Anlaßwiderständen vernichtet.

¹⁾ Schützensteuerung beim elektrischen Betrieb in Stahlwerken: H. E. White: General Electr. Review Bd. 12, 1909 und E. T. Z., Heft 39, 1909.

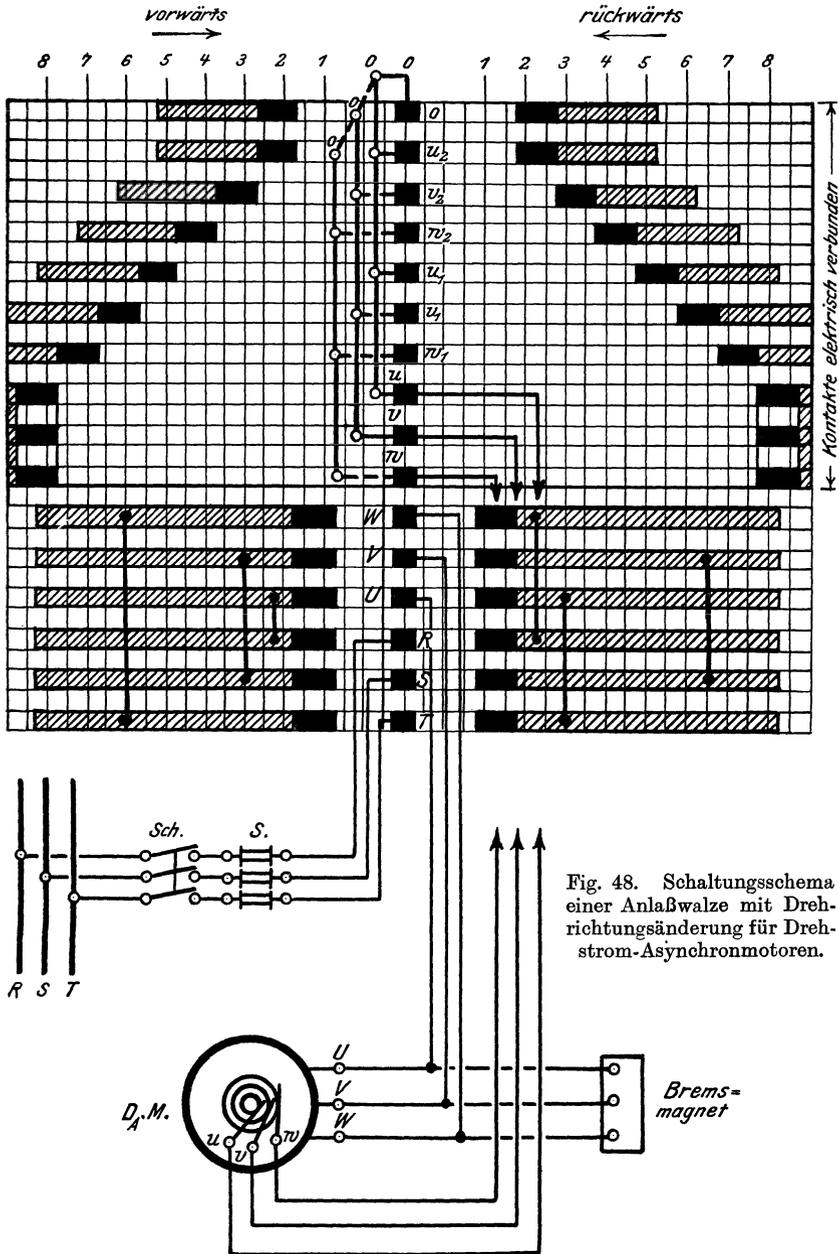


Fig. 48. Schaltungsschema einer Anlaßwalze mit Drehrichtungsänderung für Drehstrom-Asynchronmotoren.

Für schwere Betriebe, die ein häufiges Anlassen und auch Umsteuern notwendig machen, kommen wie bei den Gleichstrommotoren Steuerwalzen als Anlasser zur Verwendung. In Fig. 47 ist die praktische Ausführung einer solchen und in Fig. 48 das Schaltungsschema

für dieselbe dargestellt; der Motor wird hier sowohl vorwärts wie rückwärts gesteuert. Die feststehenden Kontakte sind in Fig. 47 zwischen die Walzenkontakte gezeichnet im Gegensatz zu den Fig. 15 und 30, wo die ersteren auf der rechten Seite liegen. Einer besonderen Erklärung bedarf Fig. 48 nicht mehr.

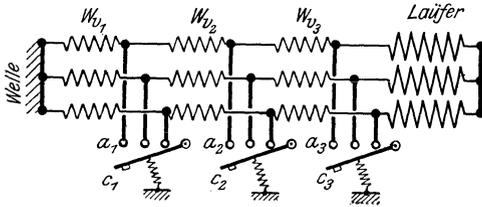


Fig. 49. Anlassen eines Drehstrom-Asynchronmotors durch Läuferwiderstand mit Fliehkraftregler.

aber größer — im Maximum wie bereits erwähnt etwa bis zum 2,5fachen des normalen —, dann steigt die Anlaufstromstärke ebenfalls

und zwar annähernd proportional mit der Zunahme des Drehmomentes. Hier ist bezüglich des Spannungsabfalles das auf S. 55 Gesagte ebenfalls zu berücksichtigen.

Eine besondere Ausführung von Motor und Anlasser der Siemens-Schuckert-Werke, auf die noch kurz hingewiesen sein mag, besteht darin, daß die Anlaßvorrichtung (der Anlaßwiderstand) auf die Welle des Motors fliegend aufgesetzt ist. Das Abschalten der einzelnen Widerstandsstufen erfolgt durch einen Fliehkraftregler. Die Widerstände sind zwei- oder dreistufig. Sie werden von zwei oder drei

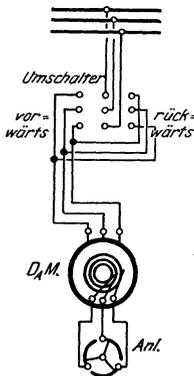


Fig. 50. Drehrichtungsänderung beim Drehstrom-Asynchronmotor (dreipoliger Umschalter).

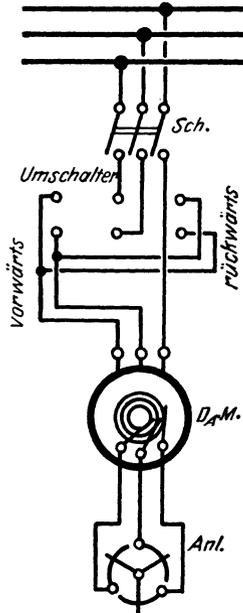


Fig. 51. Drehrichtungsänderung beim Drehstrom-Asynchronmotor (zweipoliger Umschalter).

Schaltern des Fliehkraftreglers mit steigender Umdrehungszahl selbsttätig kurzgeschlossen (Fig. 49). Die Verbindungsleitungen zwischen Läufer und Widerstand sind in der hohlen Welle untergebracht. Im Augenblicke des Einschaltens entwickeln diese Motoren, die bis zu 100 PS in solcher

Form gebaut werden, etwa das 1,7fache Drehmoment bei etwa der doppelten der normalen Betriebsstromstärke. Beim Anlaufe sinkt mit zunehmender Drehzahl das Drehmoment bis auf den normalen Wert; wird dann die zweite Widerstandsstufe durch den Fliehkraftregler eingeschaltet, dann steigt D wieder bis zum 1,7fachen und nimmt ab, wenn die Drehzahl weiter steigt, und so fort, bis der Anlasser kurzgeschlossen ist.

d) Für die Umkehr der Drehrichtung genügt das Vertauschen von nur zwei Phasen der Ständerwicklung (Fig. 50 und 51). In Fig. 50 wird das durch einen dreipoligen Umschalter erreicht, während in Fig. 51 nur ein zweipoliger Umschalter benutzt wird, wobei dann aber noch ein besonderer Hauptschalter *Sch.* nötig ist, um den Motor vollständig vom Netze abtrennen zu können (vgl. S. 44).

e) Das Anlassen des Kurzschlußankermotors. Es gibt nun ferner eine ganze Anzahl von Maschinen, für die der Motor in der Anlaufperiode nur verhältnismäßig geringes Drehmoment zu entwickeln hat, z. B. Antrieb von Zentrifugalpumpen, Ventilatoren usw. Hier können dann vorteilhaft sog. Kurzschlußankermotoren verwendet werden, bei denen der Läufer dauernd — auch während des Anlassens — kurzgeschlossen bleibt. Diese Motoren besitzen den Vorzug der größten Einfachheit in der Bauart und der größten Betriebssicherheit, weil sie keinerlei stromführende Schleifkontakte wie Kollektor, Schleifringe und Bürsten besitzen. Bei Motoren mit hohen Umdrehungszahlen kommt noch hinzu, daß der Läufer der geringen Polzahl und der hohen Umfangsgeschwindigkeit wegen sich besser mit Kurzschluß- als mit Schleifringwicklung ausführen läßt.

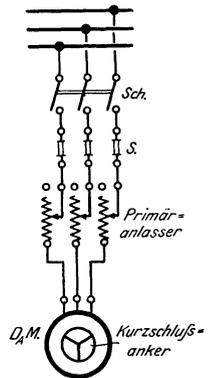


Fig. 52. Anlassen des Drehstrom-Asynchronmotors durch Primär-anlasser.

Dadurch, daß die Läuferwicklung kurzgeschlossen ist, können Anlaßwiderstände nur in den Primärstromkreis (Primäranlasser) eingeschaltet werden. Für diesen Fall ist demnach eine Beeinflussung der Drehzahl nur auf die auf S. 54 unter 2.) genannte Art durch allmähliche Steigerung der Klemmenspannung E_k möglich. Es wird also beim Anlassen die wiederum als konstant vorausgesetzte Netzspannung durch den Widerstand teilweise vernichtet (Fig. 52), wodurch naturgemäß ganz bedeutende Energieverluste entstehen. Trotz der großen, dem Netze entnommenen Energie ist dabei das Anlaufdrehmoment des Motors gering, da durch das Abdrosseln der Spannung E_1 das primäre Feld, das mit dem sekundären Strome das Drehmoment ergibt, eine geringe Größe hat.

Die Gl. (56) geht, da der Läuferwiderstand nur klein ist, über in die Form:

$$D_A = \frac{m \cdot p \cdot N_2^2 \cdot E_1^2 \cdot W_2}{8 \cdot \pi^3 \cdot N_1^2 \cdot \gamma^2 \cdot c^3 \cdot L_2^3} = \text{const.} \cdot \frac{E_1^2}{c^3}, \quad (59)$$

denn jetzt kann W_2^2 gegenüber $(2\pi \cdot c \cdot L_2)^2$ vernachlässigt werden; das Anlaufdrehmoment ist also direkt proportional dem Quadrate der Klemmenspannung und umgekehrt proportional der dritten Potenz der Periodenzahl, wenn von dem Einflusse von W_2 auf D_A abgesehen wird. Letzteres kann hier geschehen, weil W_2 bereits bei der Konstruktion des Motors dem günstigsten Werte entsprechend gewählt wird.

Schließlich sei von vornherein noch darauf hingewiesen, daß die Verwendung von Primäranlaufwiderständen bei Hochspannungsmotoren mit Kurzschlußanker der konstruktiven Schwierigkeiten wegen in vielen Fällen nicht möglich ist.

Alle Anlaufmethoden für Kurzschlußankermotoren, die in der Praxis verwendet werden, beruhen auf einer Veränderung der Klemmenspannung, und es kommt für die Wahl der nachfolgend angegebenen Anlaufmöglichkeiten in erster Linie auf die Leistung und die Spannung, mit der der Motor betrieben werden soll, an.

Wird der Motor durch einfaches Schließen eines dreipoligen Schalters unmittelbar auf das Netz geschaltet, so läuft er sofort an und ist bestrebt, seine höchste Drehzahl zu erreichen. Es tritt im Augenblicke des Anlaufes dadurch ein sehr großer Stromstoß, hervorgerufen durch die Beschleunigung, auf, der zu Spannungsschwankungen im

Netze und bei hohen Spannungen und Leistungen zu der Erzeugung gefährlicher Überspannungen Veranlassung geben kann.

Diese allerdings einfachste Form der Inbetriebsetzung wird nur bei Motoren mit einer Leistung bis etwa zu 3 PS angewendet. Die Anlaufstromstärke erreicht hierbei etwa den 4- bis 8fachen Wert der normalen Betriebsstromstärke. Aus diesem Grunde gestatten eine ganze Reihe von Elektrizitätswerken den Anschluß der auf solche Art anzulassenden Motoren nur bei Einzelleistungen bis etwa 1 PS im Maximum. Um nicht beim Einschalten jedesmal die Sicherungen S . infolge der großen Anlaufstromstärke zum Schmelzen zu bringen, kann man die Schaltung so

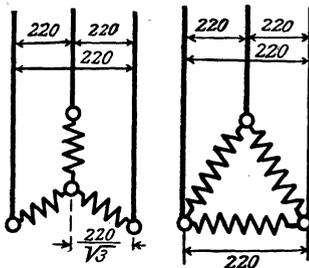


Fig. 54. Stern-Dreieckumschaltung der Ständerwicklung beim Drehstrom-Asynchronmotor.

treffen, daß dieselben erst wenn der Motor im vollen Betriebe ist, eingeschaltet werden (Fig. 53), und zwar mittels eines Umschalters. Selbstverständlich ist dann aber besonders darauf zu achten, daß der Umschalter nicht etwa in der ersten Stellung belassen wird, da dort

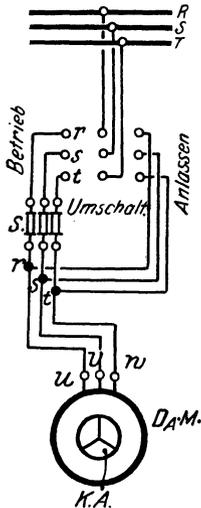


Fig. 53. Sicherungsumschaltung beim Anlassen des Drehstrom-Kurzschlußankermotors.

der Motor ungesichert ist und das Gegenteil der Vorrichtung erreicht werden würde.

Bei Motoren bis etwa 20 PS und Spannungen bis 500 Volt ist eine bedeutende Verminderung der Anlaufstromstärke dadurch erreichbar, daß man die Ständerwicklung einmal in Stern und dann in Dreieck schaltet (Fig. 54). Wird ein Motor, dessen Ständerwicklung normal in Dreieck geschaltet ist, auf Stern umgeschaltet, so ist das, wenn sein elektrisches Verhalten ungeändert bleiben soll, gleichbedeutend mit einer Spannungsänderung im Verhältnis von $1:\sqrt{3}$. Die Stern-Dreieckumschaltung ist demnach gleichwertig einem einstufigen Anlaßtransformator, dessen Anlaßstufe das

$$\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58\text{fache}$$

der Netzspannung beträgt.

Die Schaltung ist in Fig. 55 dargestellt. Die sechs Enden der Statorwicklung werden mit einem Umschalter verbunden. Der Motor, der normal mit dreieckgeschalteter Wicklung läuft, erhält auf der ersten Stufe (Sternstufe) nur 58% der Netzspannung und läuft ohne besonders großen Stromstoß an. Hat sich der Motor auf seine bei dieser verminderten Spannung höchst erreichbare Drehzahl beschleunigt, dann wird umgeschaltet, so daß nunmehr der normale Betriebszustand hergestellt ist. Es ist durch diese Schaltung möglich, den Stromstoß beim Anlassen bis etwa auf das 1,5fache der Betriebsstromstärke zu beschränken.

Diese Art des Anlassens ist indessen nur dort anwendbar, wo der Motor ohne oder nur mit etwa $\frac{1}{3}$ der Belastung anläuft. Gegebenenfalls muß der Anlauf, wenn die anzutreibende Maschine eine große Anzugskraft erfordert, zunächst mit Zwischenschaltung einer Leerscheibe (leerlaufenden Riemscheibe) vor sich gehen, denn da die Spannung um den $\sqrt{3}$ fachen Betrag sinkt, kann der Motor nach Gl. (59) nur $\frac{1}{3}$ des normalen Drehmomentes entwickeln.

Es empfiehlt sich noch, statt eines gewöhnlichen Umschalters (Fig. 56) einen besonders konstruierten Stern-Dreieckumschalter (Fig. 57) zu benutzen, um jeden Fehler in der Bedienung beim Anlassen zu vermeiden. Ein Schalter nach Fig. 57 ist so gebaut, daß die einzelnen Schaltbewegungen zwangsläufig in der richtigen Reihenfolge ausgeführt werden müssen. Ein dreipoliger Hauptauschalter *Sch.* (Fig. 55) darf indessen nicht vergessen werden, weil andernfalls der Ständer bei Stillstand des Motors dauernd unter Spannung steht, und infolgedessen

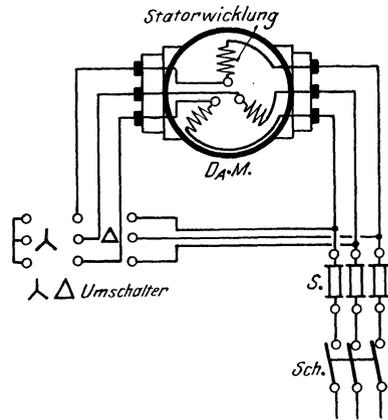


Fig. 55. Anlassen des Drehstrom-Asynchronmotors durch Stern-Dreieckumschaltung.

die Wicklung von einem der Größe des Widerstandes derselben entsprechenden Strome durchflossen wird. Da dann aber die im Betriebe durch den sich drehenden Läufer hervorgerufene Kühlung fehlt, kann die Ständerwicklung mit der Zeit infolge zu hoher Erwärmung gefährdet werden. Hier sei noch eingeflochten, daß die Stern-Dreieck-

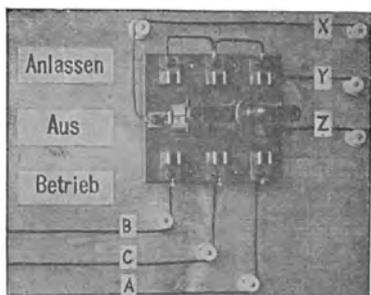


Fig. 56. Gewöhnlicher Umschalter, hergerichtet für Stern-Dreieckumschaltung.

umschaltung mit Vorteil auch dort angewendet wird, wo es sich um eine dauernde Leistungsherabsetzung bzw. -steigerung handelt, wie z. B. bei Pumpen, in Wasserhaltungen und ähnlichen Betrieben. Sind bei der Aufstellung der Pumpe die vorerst zu fördernden Wassermengen gering, soll die Pumpe jedoch von vornherein für die volle später zu erwartende Leistung gewählt werden, dann läßt man sie für die erste Betriebszeit mit dem in Stern geschalteten Motor laufen und schaltet bei Leistungssteigerung auf Dreieck um. Für die Leistungen gilt wiederum das Verhältnis $1:\sqrt{3}$, wobei die Phasenverschiebung $\cos\varphi_M$ nicht wesentlich ungünstiger wird¹⁾ und andere Verluste nicht eintreten.

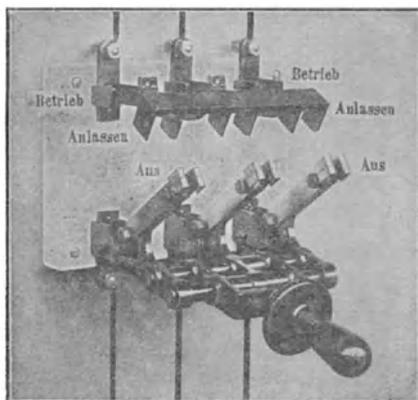


Fig. 57. Stern-Dreieckumschalter.

Der umgekehrte Weg zum Anlassen, also Dreieck-Sternumschaltung, wird eingeschlagen, wenn es auf ein möglichst hohes Anlaufmoment ankommt und der dabei auftretende Stromstoß keine Rolle spielt. Hierbei erhält jede Phase eine um $\sqrt{3} = 1,73$ fach höhere Spannung, J_1 nimmt in demselben Verhältnisse zu, während das Drehmoment wiederum im quadratischen Verhältnisse steigt.

Eine andere Methode, die hohen Stromstöße beim Anlaufen zu vermeiden, und dadurch dem Kurzschlußanker motor für kleinere und mittlere Leistungen ein größeres Anwendungsgebiet zu geben, benutzen z. B. die Siemens-Schuckert-Werke durch die ihnen patentierte selbsttätige Gegenschaltung. Diese besteht darin, daß die

¹⁾ 500 PS Drehstrommotor mit Stern-Dreieckschaltung zum Antriebe einer Kolben-Wasserhaltung: Glückauf: 1909, 14. VIII., S. 1185.

Wicklung des Läufers unterteilt und die einzelnen Stufen während der Anlauffperiode anders geschaltet werden, als im vollen Betriebe, wodurch ein zu starkes Anwachsen des Stromes bei der Inbetriebsetzung verhindert wird. Z. B. bei einem zweipoligen Motor, der mit zwei Drehstromwicklungen in Sternschaltung versehen ist (Fig. 58), liegen beide Wicklungen genau in gleicher Weise auf dem Läufer und die drei Anfänge an genau derselben Stelle. Beide Wicklungen haben aber verschiedene Windungszahlen. Verbindet man A mit a , B mit b und C mit c , so arbeiten die EMKe. gegeneinander, sind also „gegengeschaltet“, aber sie heben sich nicht völlig auf, weil die Amperewindungszahlen beider Wicklungsteile nicht einander gleich sind; es kommt vielmehr die Differenz beider als wirksame EMK. zur Geltung. Dadurch entsteht ein Drehfeld indessen mit bedeutend verringertem Läuferstrom.

Wird nun a , b und c und andererseits A , B und C miteinander verbunden (Fig. 59), so erzeugen die EMKe. in jeder Spule für sich jetzt die volle Stromstärke, und der Motor arbeitet als normaler Kurzschlußankeromotor. An den elektrischen Verhältnissen ändert sich nichts, wenn die Verbindungen aA , bB und cC bestehen bleiben (Fig. 60). Sie werden daher fest miteinander hergestellt, und nur die Verbindung der Punkte A , B und C wird während des Anlaufens im richtigen Augenblicke geschaltet. Dieses besorgt selbsttätig ein Fliehkraftschalter, der, wenn die Drehzahl des Läufers auf etwa zwei Drittel der normalen gestiegen ist, die Punkte A , B und C verbindet (kurzschließt).

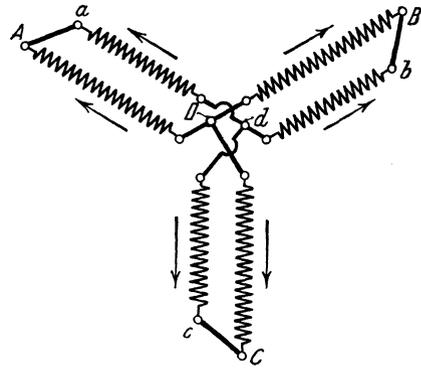


Fig. 58.

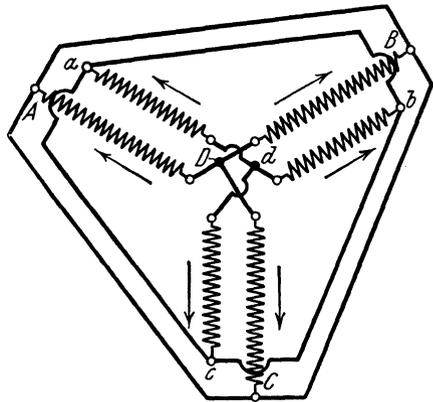


Fig. 59.

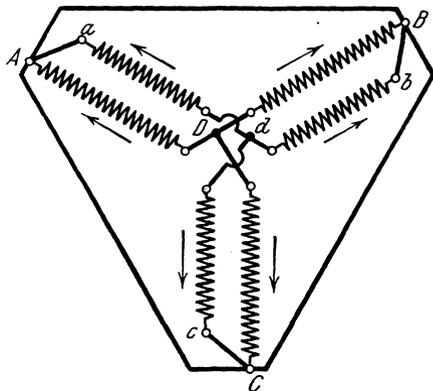


Fig. 60.

Fig. 58 bis 60. Anlassen des Drehstrom-Asynchronmotors durch selbsttätige Gegenschaltung.

Beim Ausschalten des Motors oder beim Ausbleiben der Spannung wird der Fliehkraftschalter selbsttätig wieder geöffnet und zwar erst dann, wenn die Umdrehungszahl einen bestimmten Wert unterschreitet.

Mit einer derartigen selbsttätigen Gegenschaltung werden Kurzschlußankermotoren normal bis zu Leistungen von 80 PS gebaut, wenn sie ohne Last, also leer anlaufen. Bei Anlauf unter Last wird diese Schaltung im allgemeinen nur für Motoren bis 15 PS Leistung ausgeführt. Der Stromstoß beim Anlaufen erreicht etwa die zwei- bis dreifache Größe des normalen Betriebsstromes, ist demnach beim Anlauf mit voller Last kleiner als bei reinen Kurzschlußankermotoren mit unmittelbarer Schaltung auf das Netz.

Besonders zu erwähnen ist noch, daß es die selbsttätige Gegenschaltung erlaubt, die Motoren in größerer Entfernung von ihren Schaltapparaten aufzustellen. Die Inbetriebsetzung erfolgt ohne jede besonderen Fernschaltapparate also z. B. von der Maschinenstation dadurch, daß man einfach den Hauptschalter des Motorstromkreises schließt. Ferner eignen sich derartige Motoren für feuer- und explosionsgefährliche Räume, Mühlen, chemische Fabriken u. dgl., weil sich die Gegenschaltungsvorrichtung absolut luftdicht einbauen läßt, und andere Stellen, an denen Funken auftreten können, wie z. B. bei den Schleifringen, zwischen den Anlasserkontakten beim Übergange von einer zur nächsten Stufe usw., nicht vorhanden sind.

Die Gegenschaltung ist schließlich noch dort zu empfehlen, wo geschultes Bedienungspersonal nicht zur Verfügung steht.

Eine auf ähnlichem Grundsatz beruhende Ausführung baut auch die A. E. G. Der Läufer, ein sog. Stufenläufer, besitzt unterhalb der Phasenwicklung noch eine zweite Wicklung mit solchem Widerstande, daß ein guter Anlauf bei mäßiger Stromaufnahme gerade erzielt wird. Durch einen Fliehkraftregler wird auch hier bei Überschreiten einer gewissen Drehzahl die zweite Wicklung außer Wirksamkeit gesetzt und die eigentliche Phasenwicklung kurzgeschlossen, wobei der Läufer dann auf seine normale Umdrehungszahl kommt.

Bei sehr großen Leistungen und hohen Spannungen kann man die bisher beschriebenen Anlaßmethoden nicht mehr verwenden; es muß vielmehr dazu übergegangen werden, Anlaßtransformatoren zu benutzen, um die für das Anlassen notwendige veränderliche Spannung zu erhalten. Man vermindert hierdurch nach dem bereits bei der Stern-Dreieckumschaltung Gesagten gleichfalls die starken Stromstöße beim Anlauf. Eine Vernichtung von Spannung und damit von Energie in Widerständen wie z. B. bei dem Primäranlasser (S. 61) ist dabei vermieden, weil dem Motor jeweils nur so viel Energie zugeführt wird, als derselbe gerade benötigt. Der Anlaufstrom kann bis etwa auf das 1,5fache des Normalstromes tiefgehalten werden.

Die Anlaßtransformatoren für Drehstrommotoren bestehen in der Regel aus zwei zusammengebauten Einphasentransformatoren, die für Spannungen bis etwa 5000 Volt und bei Aufstellung in trockenen Räumen trockene Isolierung, für höhere Spannungen und bei Verwendung in

feuchten Räumen Ölisolierung erhalten (siehe III. Abschnitt). Sie werden nach der Sparschaltung und in der sog. offenen Dreieckschaltung (V-Schaltung) miteinander, dem Netz, dem Motor und dem Anlaßschalter verbunden. Die Primär- und die Sekundärwicklung des Transformators sind vereinigt (Fig. 61); als Sekundärwicklung ist dann der durch den Anlaßschalter abgegrenzte Teil der Wicklung zu betrachten, und der dem Motor zugeführte Strom wird teils dem Netze unmittelbar entnommen, teils in der Sekundärwicklung induziert. Diese Sparschaltung hat den Vorteil, daß nicht die gesamte vom Motor benötigte Energie zu transformieren ist, wodurch man einen besseren Wirkungsgrad erzielt und auch einen kleineren Transformator verwenden kann. Über die Sparschaltung wird im III. Abschnitte S. 259 noch ausführlicher gesprochen werden.

Für die Abnahme der Anlaßspannungen vom Transformator und die Zuführung derselben zum Motor dienen besondere Anlaßstufenschalter. Dieselben bestehen aus einem System von Kontaktmessern, welche isoliert voneinander auf einer Walze angeordnet sind. In Fig. 210 ist noch ein ausführlicheres Schema eines solchen Stufentransformators mit Funkenentzieher beim Ausschalten der Kontaktbürsten und in Fig. 211 ein Stufenschalter der Siemens-Schuckert-Werke abgebildet. Die Erklärung des Schemas findet sich auf S. 268. Die Fig. 62 zeigt ferner einen mit dem Stufenschalter zusammengebauten Anlaßtransformator der Maschinenfabrik Oerlikon. Hier ist der Transformator in einem Gußgehäuse untergebracht, auf dessen Deckel der Stufenschalter angeordnet ist. Der Gußkasten ist mit Öl gefüllt und gasdicht geschlossen, so daß ein solcher Apparat auch in Räumen mit explosiblen Gasen (Schlagwettergruben) verwendet werden kann. Die kleine Drosselspule — eine besondere Bauart eines Transformators — dient dazu, die beim Schalten zwischen den Kontakten der Anlaßwalze auftretenden Lichtbögen unschädlich zu machen; sie ist also eine Vorrichtung zur Schonung der Kontakte (siehe ebenfalls S. 268 u. f.).

Die Arbeitsweise des Anlaßschalters in Fig. 61 ist kurz folgende: Steht die Walze auf „aus“, so ist sowohl der Motor, als auch der Transformator vollständig vom Leitungsnetze getrennt. Wird die Walze nun auf die Stellung „1“ gebracht, so liegt der Transformator am Netz und der Motor an der ersten Stufe des Transformators; der Motor läuft hier etwa mit der halben Netzspannung an. Bei der Stellung „2“ ist der Motor an die zweite Abzweigstelle des Transformators geschaltet. Der Motor erhält jetzt etwa drei Viertel der normalen Netzspannung. Nachdem der Motor nahezu seine volle Drehzahl erreicht hat, wird die Schaltwalze in die Stellung „3“ gebracht, wobei der Motor dann

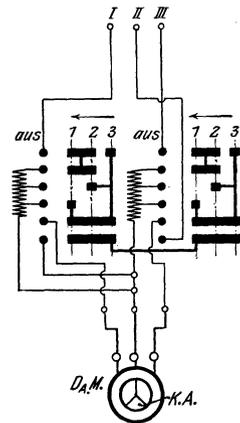
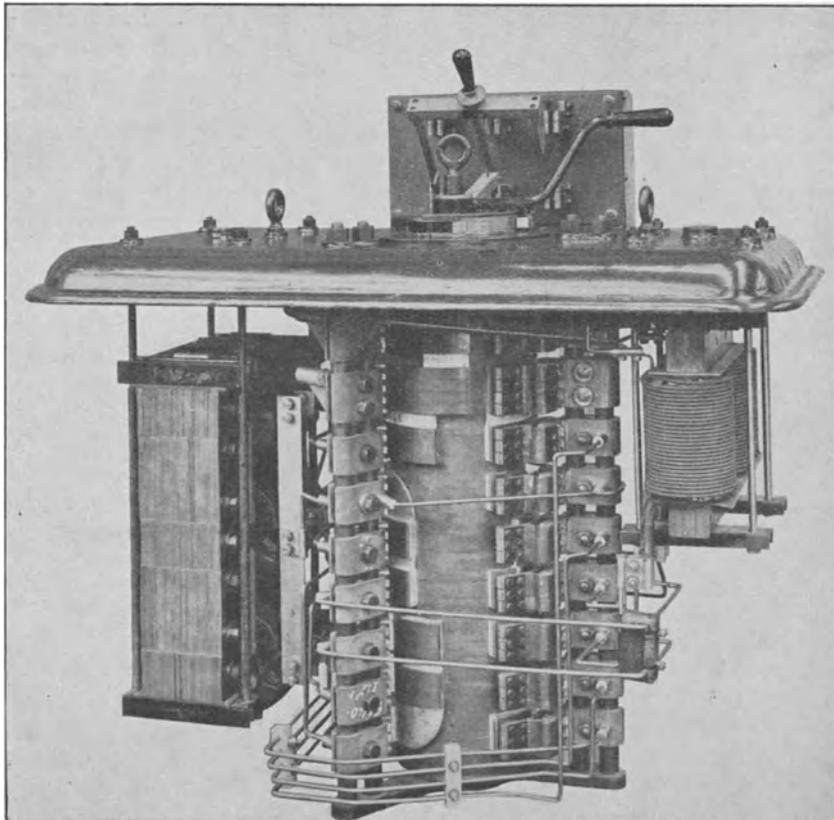


Fig. 61. Anlassen des Drehstrom-Asynchronmotors durch Anlaßtransformator.

mit der vollen Netzspannung arbeitet; der Anlaßtransformator ist in dieser Stellung „3“ vollständig vom Netze abgeschaltet. Auf die Schaltung besonders in dieser letzten Lage ist zu achten, denn die Anlaßtransformatoren dürfen nur in der Zeit des Anlassens benutzt werden, müssen aber während des Betriebes vom Netz abgetrennt sein, denn ihre Größe ist zumeist diesen Bedingungen entsprechend bemessen;



Transformator

Stufenschalter

Drossel-
spule

Fig. 62. Oerlikon-Anlaßtransformator mit Stufenschalter für einen 480 PS, 200 Volt, 1200 Amp. Drehstrom-Asynchronmotor (Gußgehäuse abgenommen).

außerdem wird so der Energieverbrauch durch die Leerlaufenergie des Transformators (siehe S. 199 u. f.) gespart.

Das über das Anlaufdrehmoment bei der Stern-Dreieckumschaltung und überhaupt im allgemeinen für den Kurzschlußankermotor Gesagte gilt selbstverständlich auch für diese Art des Anlassens.

f) Das Anlassen durch Änderung der Frequenz. Die auf S. 54 unter 3.) genannte Form der Drehzahlregelung durch Änderung

der Frequenz des zugeführten Stromes ist für das Anlassen nur dann anwendbar, wenn der Stromerzeuger in seiner Drehzahl geändert werden kann, denn es ist:

$$c = \frac{p \cdot n}{60} = \text{const. } n$$

selbstverständlich auch für den Stromerzeuger zutreffend. Veränderliche bzw. von Null ansteigende Frequenz ist vorhanden, wenn der Motor zugleich mit seinem Generator in Betrieb gesetzt wird. Der Läufer des Motors ist dabei mit einem Kurzschlußanker auszurüsten. In der Praxis kommt dieser Fall aus leicht erklärlichen Gründen nur äußerst selten vor.

Da beim Kurzschlußanker W_2 klein ist, so ist das Anlaufdrehmoment nach Gl. (59) umgekehrt proportional der dritten Potenz der Periodenzahl; dasselbe kann infolgedessen eine recht bedeutende Größe erreichen.

Eine weitere Möglichkeit, große Kurzschlußankermotoren anzulassen, wird im II. Abschnitt bei den asynchronen Motorgeneratoren Erwähnung finden (siehe S. 137).

Es soll nunmehr zur Besprechung der dauernden Drehzahlregelung eines asynchronen Drehstrommotors im Betriebe übergegangen werden. Sie läßt sich in gleich einfacher Weise, wie das beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor der Fall ist, nicht vornehmen, und darin liegt ein recht unangenehmer Nachteil des Drehstrommotors. Da die Drehzahl n des Läufers nur abhängig ist von der Periodenzahl des zugeführten Stromes, der Polzahl und der Schlüpfung, so sind durch diese drei Größen c , p und s die Möglichkeiten für die Regelung von n gegeben und begrenzt. Die Form, die Drehzahl durch Änderung der Klemmenspannung etwa durch einen unterteilten Transformator zu regulieren, wird in der Praxis, außer für das Anlassen, nicht angewendet. Widerstände in der Ständerwicklung sind aus den bereits auf S. 61 erwähnten Gründen unwirtschaftlich und bei Hochspannung unzulässig.

g) Die Regelung der Drehzahl durch Änderung der Schlüpfung.

Die bisher gebräuchlichste Art, eine Änderung der Drehzahl und zwar eine Verminderung derselben zu erzielen, ist diejenige durch Einschalten von Widerständen in den Läuferstromkreis. Hierdurch wird die Schlüpfung für eine gewisse Belastung vergrößert. Diese Form der Regulierung besitzt aber zwei große Nachteile, und man benutzt sie daher neuerdings nur äußerst selten, wählt vielmehr vorteilhafter eine der weiter unten angegebenen Methoden, wenn es die Betriebsverhältnisse nur irgend zulassen.

Der erste Nachteil besteht darin, daß die im Regulierwiderstande verbrauchte Energie nutzlos in Wärme umgesetzt und damit der Wirkungsgrad des ganzen motorischen Antriebes bedeutend verschlechtert wird. Außerdem muß der Widerstand reichliche Abmessungen erhalten, um die Wärmemengen abführen zu können; die Anlaßwiderstände können in der Regel für eine gleichzeitige Abwärtsregelung der Umdrehungszahl nicht benutzt werden, weil sie zu klein sind und bald

verbrannt sein würden. Wie beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor (vgl. S. 33) entnimmt also auch der Drehstrom-Asynchronmotor dem Netze die volle Energie, von der bei geringerer Drehzahl nur ein Teil nutzbar verwendet wird.

Der zweite Nachteil liegt darin, daß die Umdrehungszahl von der Belastung abhängig ist, und zwar weil der Läufer stets das Bestreben hat, in Synchronismus mit dem Ständerdrehfelde zu kommen, und von letzterem nur um den Betrag der Schlüpfung abweicht. Wird z. B. ein Motor, der mit 1000 synchronen bzw. ca. 975 tatsächlichen Umdrehungen läuft, durch den Regulierwiderstand bei einem bestimmten zu leistenden Drehmomente auf 500 Umdrehungen gebracht, so steigt bei unverändertem vorgeschalteten Widerstande, wenn das zu entwickelnde Drehmoment sinkt, die Drehzahl auf etwa 750, weil der Betrag der Schlüpfung infolge der abnehmenden Belastung auf die Hälfte herabgeht. Wird der Motor vollkommen entlastet, so ist die Drehzahl des Läufers annähernd die höchst erreichbare asynchrone immer noch unter der Voraussetzung, daß die Größe des Regulierwiderstandes unverändert dieselbe geblieben ist. Man sieht also daraus, daß eine derartige Regulierung bei schwankender Belastung bzw. wechselndem Drehmomente wenig brauchbar ist, und bei den meisten Arbeitsmaschinen nicht verwendet werden kann, wenn nicht bei jeder Änderung in der Belastung der Widerstand nachgestellt wird, was natürlich zeitraubend, wenn nicht oft sogar undurchführbar ist.

h) Die Kaskadenschaltung. Um den Verlust an Energie, der im Regulierwiderstande entsteht, nutzbar zu machen, sind in

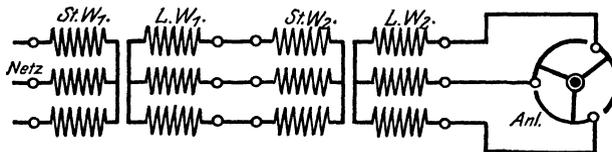


Fig. 63. Drehzahlregelung beim Drehstrom-Asynchronmotor durch Kaskadenschaltung.

neuester Zeit eine ganze Reihe von Schaltungen entwickelt und zum Teil auch in die Praxis eingeführt worden, die alle mehr oder weniger den Grundgedanken haben, die Energie des Läufers einem zweiten Motor zuzuführen, der dann seinerseits auch wiederum Leistung abgeben kann.

Eine der häufiger benutzten Schaltungen dieser Art ist die Kaskadenschaltung. Sie wird, abgesehen von der Benutzung für elektrische Bahnen, für Rollgangs- und ähnliche Antriebe, Ventilatoren u. dgl. angewendet.

Die Schaltung, die in Fig. 63 dargestellt ist, ist die, daß von zwei miteinander verbundenen asynchronen Motoren nur der eine an das vorhandene Netz angeschlossen wird, während der zweite seinen Strom aus dem Läufer des ersten erhält.

Bezeichnet:

p_1 die Polpaarzahl des Motors I,

p_2 die Polpaarzahl des Motors II,

dann ist die Drehzahl des Aggregates:

$$n = \frac{60 \cdot c}{p_1 + p_2}. \quad (60)$$

Besitzen beide Motoren je die gleiche Anzahl von Polen, so sind also mit Hilfe der Kaskadenschaltung zwei Umdrehungszahlen einstellbar, mit denen dauernd und vor allen Dingen wirtschaftlich gearbeitet werden kann.

Der zwischen den Leistungen der beiden Motoren bestehende Zusammenhang ergibt sich mit hinreichender Genauigkeit aus folgendem:
Ist:

L_1 die dem Motor I zugeführte elektrische Energie,

L'_1 die vom Motor I abgegebene mechanische Leistung,

L_2 die dem Motor II zugeführte elektrische Energie,

L'_2 die vom Motor II abgegebene mechanische Leistung,

so ist angenähert der Stromwärmeverlust im Läufer des Motors I gleich der dem Motor II zugeführten elektrischen Energie, also:

$$V_1 = L_2.$$

Aus Früherem ging hervor, daß:

$$V_1 = s_1 \cdot L_1;$$

in gleicher Weise ist also auch hier:

$$V_2 = s_2 \cdot L_2,$$

wenn V_2 den Verlust im Läufer des Motors II und s_2 die entsprechende Schlüpfung bezeichnet.

Durch Umrechnung findet man:

$$\frac{L'_2}{L'_1} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{n_2}{n_1}, \quad (61)$$

d. h. die ganze von beiden Motoren abgegebene Leistung $L'_1 + L'_2$ verteilt sich so, wie die Produkte aus Polzahl und Drehzahl, und wenn die Polzahlen einander gleich sind, wie die Drehzahlen. Wird die Forderung gestellt, daß beide Motoren gleiche Leistungen hergeben sollen, so müssen sich nach Gl. (61) die Drehzahlen umgekehrt verhalten wie die Polzahlen, also:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{p_1}{p_2},$$

oder wenn die Polzahlen gleich sind, müssen, um diese Bedingung zu erfüllen, die Drehzahlen gleich sein. Das ist erreicht, wenn beide Mo-

toren fest miteinander gekuppelt sind. Die Schlüpfungen für diesen Fall sind:

$$\left. \begin{aligned} s_2 &= 2 - \frac{1}{s_1}, \\ \text{bzw.} \quad s_1 &= \frac{1}{2 - s_2}. \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

Sind die Motoren auf ein Übersetzungsverhältnis $\frac{n_2}{n_1}$ gekuppelt z. B. durch Riemenscheiben von verschiedenem Durchmesser, so ist unter der Voraussetzung gleicher Polzahlen die Schlüpfung:

$$s_1 = \frac{1}{1 + \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{p_1}{p_2} (1 - s_2)}, \quad (63)$$

und man erhält somit einen Einblick in den Verlauf des Drehmomentes, der Stromaufnahme und der mechanischen Leistung bei der Kaskadenschaltung, wenn man sie auf die Schlüpfung s_1 des ersten Motors bezieht.

Das Anlassen des in Kaskade geschalteten Aggregates erfolgt durch Widerstände im Läuferstromkreise des zweiten Motors.

Diese Form der Drehzahländerung ist naturgemäß eine durchaus günstige. Sie hat aber den Nachteil der kostspieligen Anlage durch die Verwendung von zwei Motoren, und außerdem erfordert das Aggregat recht viel Platz zu seiner Aufstellung, der bei unmittelbarem Zusammenbau des antreibenden Motors mit der Arbeitsmaschine oftmals nicht zur Verfügung steht. Die Kaskadenschaltung ist daher nur für besondere Zwecke und zwar dort, wo nur zwei von vornherein fest bestimmte Drehzahlen in Frage kommen, brauchbar.

Die Notwendigkeit, zwei Drehzahlen für dauernde Einschaltung zur Verfügung zu haben, mit denen vor allen Dingen auch wirtschaftlich gearbeitet werden kann, findet sich häufiger beim Antriebe großer Ventilatoren zur Bewetterung von Grubenanlagen. Während der Schichtzeiten hat der Ventilator die volle Luftmenge zu fördern; dagegen sind am Wochenschluß und Feiertags geringere Luftmengen erforderlich; der Ventilator kann also in letzterem Falle langsamer laufen. Da nun in Bergwerken wegen der großen Energiemengen für Fördermaschinen, Lokomotiven, Wasserhaltungen usw. und der bedeutenden Entfernungen zwischen Stromerzeuger und Verbraucher fast nur hochgespannter Drehstrom zur Anwendung kommt, und die Ventilatoren ebenfalls oft mehr als hundert PS zum Antriebe brauchen, kann für die Ventilatormotoren auch nur Drehstrom als Stromart benutzt werden, und dann ist die Kaskadenschaltung brauchbar.

In Fig. 64 ist das vollständige Schaltungsschema¹⁾ zweier in Kaskade geschalteter Motoren abgebildet. Dasselbe zeigt einige besondere Einzel-

¹⁾ Siehe Dr. H. Hoffmann: Maschinenwirtschaft in Bergwerken. Z. Ver. deutsch. Ing. Nr. 3 vom 16. Januar 1909.

heiten, die von Interesse sind, und infolgedessen ausführlicher beschrieben werden sollen.

Es handelt sich um den Antrieb eines Ventilators zur Bergwerksbewetterung. Der Ventilator hat zeitweise die doppelte Wettermenge zu fördern, wozu der vierfache Unterdruck notwendig ist, weil die Strömungswiderstände mit dem Quadrate der Geschwindigkeit wachsen¹⁾. Diesen Unterdruck erzeugt der Ventilator, wenn er mit der doppelten seiner normalen Umdrehungszahl läuft. Der zweifachen Luftmenge bei vierfachem Unterdruck entspricht die achtfache Leistung des Antriebsmotors, weil die Wettermenge proportional mit der Umlaufzahl, der Kraftbedarf aber mit der dritten Potenz der Drehzahl zunimmt. Es sind nun ein 500 PS-Motor mit 12 Polpaaren und ein 220 PS-Motor mit 4 Polpaaren der Siemens-Schuckert-Werke in einem Gehäuse zusammengebaut zur Aufstellung gekommen. Die Grunddrehzahlen betragen 245 bzw. 182 i. d. Min. bei einer Netzfrequenz = 50. Es kann einmal der Motor I allein arbeiten oder mit dem Motor II in Kaskade geschaltet in Betrieb genommen werden, und die Schaltung der Apparate im

äußeren Stromkreise ist deshalb derart durchgeführt, daß Fehler in der Bedienung des Anlassers, des Umschalters usw. nicht vorkommen

1) Über Ventilatoren befinden sich auf Seite 236 u. f. einige Bemerkungen.

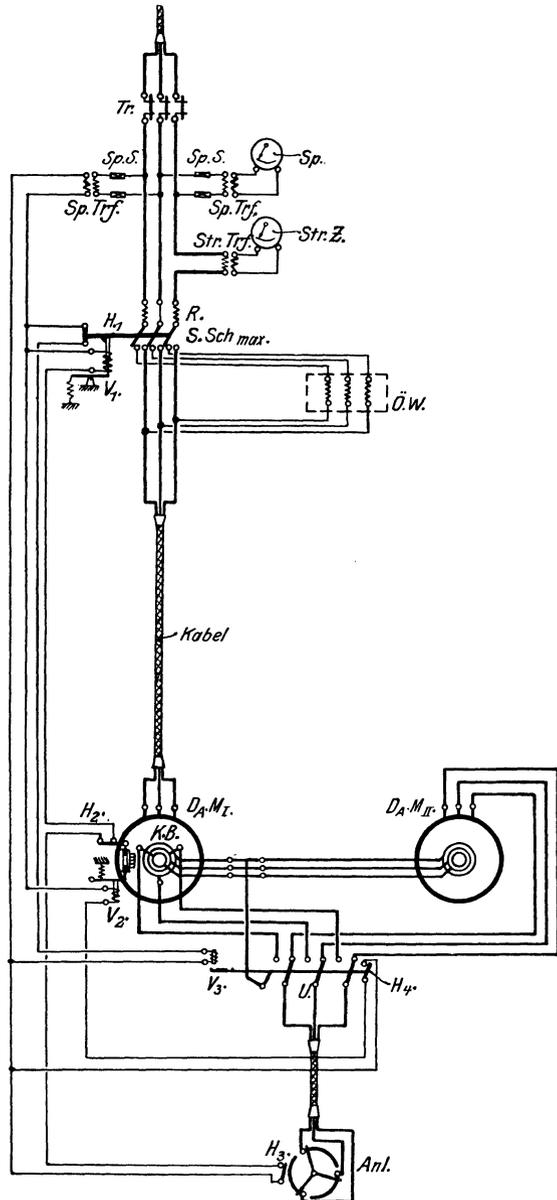


Fig. 64. Schaltungsschema eines Ventilatorantriebes mit Drehstrom-Asynchronmotoren in Kaskade.

können. Zu diesem Zwecke sind elektrische Verriegelungen für die Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung (*K.B.*) des Hauptmotors und für den Umschalter (*U.*) des Anlassers (*Anl.*) — letzterer ist für beide Motoren gemeinsam — mit dem Hauptschalter *S.Sch.*_{max} eingerichtet worden.

Das Schaltungsschema Fig. 64 ist nun folgendermaßen zu lesen: Der hochgespannte Strom, der durch ein dreifach verseiltes Kabel der Motorschaltanlage zugeführt wird, passiert zunächst Trennschalter¹⁾ (*Tr.*), dann Meßinstrumente mit zugehörigen Meßtransformatoren (Spannungszeiger *Sp.Z.* und Stromzeiger *Str.Z.*) und gelangt zum Hauptausschalter (Öl-Schutzschalter *S.Sch.*_{max} mit Maximalrelais *R.* und Ölwidernständen *Ö.W.*). Von dort aus wird er durch Kabel dem Motor I (*D_A.M_I*) zugeführt. Der Läufer dieses Motors ist mit dem Ständer des Motors II (*D_A.M_{II}*) unter Zwischenschaltung des Umschalters *U.* verbunden. Dieser Umschalter ist mit einem Hebel-schalter derart zwangläufig mittels Gestänge in Verbindung gebracht, daß er, da mit ihm der Anlasser entweder zum ersten oder zum zweiten Motor geschaltet wird, den Läuferstromkreis von *D_A.M_I* nach *D_A.M_{II}* öffnet, wenn nur *D_A.M_I* alleine arbeiten soll, bzw. den Stromkreis schließt, wenn das Aggregat in Kaskade in Betrieb zu nehmen ist.

Die Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung *K.B.* sowohl, wie der Umschalter *U.* und der Hauptschalter *S.Sch.*_{max} sind nun folgendermaßen elektrisch miteinander verriegelt. Der Strom hierfür wird der Hauptleitung vor dem Maximalschalter über einen allpolig gesicherten Spannungstransformator *Sp.Trf.* entnommen. Der Hauptschalter kann erst dann geschlossen werden, wenn *K.B.* außer Tätigkeit ist (s. S. 57), die Bürsten also aufliegen, und der Anlasser sich in Nullstellung befindet. In diesem Falle sind *H₂* und *H₃* (Hilfsschalter) geschlossen, *V₁* (Verriegelung) erhält Strom, und die magnetische Sperrung des Schalterhebels wird frei, weil die Spule den Eisenkern bzw. die Klinkvorrichtung anzieht.

Ferner kann eine Betätigung des Umschalters *U.* erst dann erfolgen, wenn der Hauptschalter ausgeschaltet ist. Zu diesem Zwecke hat der Schalthebel noch einen Hilfsschalter, der den Stromkreis nach *V₃* schließt. Damit endlich auch beim Kaskaden-Betriebe die Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung im Augenblicke des Anlassens in richtiger Stellung steht, ist die letztere auch noch mit dem Umschalter durch den Hilfsschalter *H₄* in elektrische Verbindung gebracht.

Schließlich sei schon hier kurz erwähnt, daß durch die Schaltung der Motoren in Kaskade eine elektrische Bremsung und zwar eine Nutzbremmung möglich ist. Auf S. 82 ist hierüber weiteres gesagt.

i) Die Regelung der Drehzahl durch Änderung der Polzahl.
Für eine ganze Reihe von Fällen ist es indessen nicht mehr ausreichend,

¹⁾ Die Apparate im äußeren Stromkreise sind auf Seite 280 u. f. ausführlicher behandelt. Es empfiehlt sich, schon hier diese Seiten nachzulesen, damit das Schaltungsschema auch nach dieser Richtung leichter verstanden wird.

nur zwei Drehzahlen zur Verfügung zu haben, die den Betrieb mit gutem Wirkungsgrade zulassen. Da nun nach Gl. (48) die Umdrehungszahl bei gegebener Frequenz angenähert umgekehrt proportional der Polzahl ist, so hat dieser Umstand dazu geführt, die Polzahl zum Zwecke der Regelung veränderlich zu machen. Solche Motoren werden als polumschaltbare Motoren bezeichnet. Sie sind derart gebaut, daß man während des Betriebes, also ohne den Motor stillsetzen zu müssen, von einer Polzahl auf eine andere umschalten kann, und dadurch eine Änderung der Umdrehungszahl erreicht. Die Nachteile der Widerstandsregelung also die Abhängigkeit der Drehzahl von der Belastung, die nutzlose Aufwendung von Energie, der schlechte Wirkungsgrad bei der Regelung und der schlechtere Leistungsfaktor werden bei der Polumschaltung vermieden. Der Motor läuft vielmehr mit der der Polzahl entsprechenden Drehzahl ohne besondere Widerstände im Läuferstromkreise, hat also nach den Angaben auf S. 52 bei veränderlichem Drehmomente fast gleichbleibende Drehzahl, und der Wirkungsgrad sowie der Leistungsfaktor haben wesentlich günstigere Werte, als das bei der Widerstandsregulierung zu erreichen ist.

Eine gebräuchliche Ausführung solcher Motoren ist die mit zwei, drei oder vier verschiedenen Polzahlen und damit ebenso vielen verschiedenen Drehzahlen. Dabei sei darauf hingewiesen, daß die asynchronen Drehstrom- und auch Ein- bzw. Zweiphasenmotoren bekanntlich nicht mit ausgeprägten Polen wie die Gleichstrommotoren gebaut werden, sondern auch im Ständer aus einem geschlossenen Eisenkörper bestehen, der mit Nuten versehen ist und in diesen Nuten die Wicklung aufnimmt. Letztere ist natürlich so angeordnet, daß sie, im Bilde gesprochen, ebenfalls Pole zur Ausprägung bringt. Für die Zwecke der Polumschaltung wird diese Wicklung mehrfach unterteilt und dann entsprechend geschaltet.

Für die richtige Bemessung des Motors ist stets notwendig, zu wissen, ob das Drehmoment bei allen Umdrehungszahlen konstant bleiben soll, d. h. ob die Leistung mit abnehmender Drehzahl abnimmt, oder ob dauernd die gleiche Leistung verlangt wird, d. h. also mit abnehmender Drehzahl steigendes Drehmoment. Je nach diesen Bedingungen wird die Wicklung des Ständers ausgeführt.

Die Schaltung der unterteilten Ständerwicklungen erfolgt z. B. bei nur zwei Drehzahlen im Verhältnis 1 : 2 in der Weise, daß bei konstantem Drehmoment bei der höheren Umdrehungszahl die Wicklungshälften in Reihe und bei der niederen Drehzahl parallel liegen (Fig. 65). Bei konstanter Leistung sind die Wicklungshälften stets parallel geschaltet, und es wird hier die Änderung der Polzahl durch Umkehr der Stromrichtung in einer Wicklungshälfte bewirkt (Fig. 66).

Sollen die Drehzahlen in einem anderen Verhältnisse als 1 : 2 stehen, so erhält der Motor zwei getrennte Wicklungen auf dem Ständer mit den entsprechenden Polzahlen. Die Umschaltung erfolgt durch einen einfachen Umschalter im Netzstromkreise, der sich in seiner Ausführung naturgemäß nach der Spannung zu richten hat. Bei Span-

nungen bis 250 Volt genügt ein einfacher Momenthebelumschalter, bis 500 Volt wird man fast stets einen Schalter in Form einer Steuerwalze benutzen und über diese Spannung hinaus Umschalter mit Kontakten unter Öl.

Wenn eine Regelung in drei Stufen gefordert wird, so erhält der Motor in der Regel eine umschaltbare Wicklung und außerdem eine zweite Wicklung, deren Polzahl der dritten Drehzahl angepaßt ist. In ähnlicher Weise wird verfahren, wenn vier Umdrehungszahlen gefordert werden.

In den Fig. 67 und 68 sind die Betriebskurven eines Drehstromstufenmotors sowohl für gleiches Drehmoment als auch für gleiche

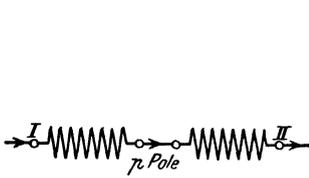


Fig. 65 a.

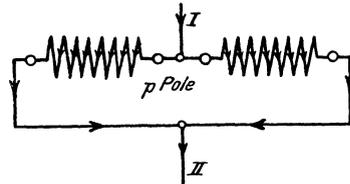
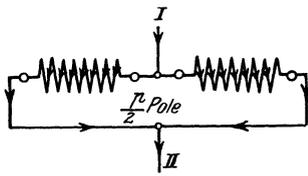
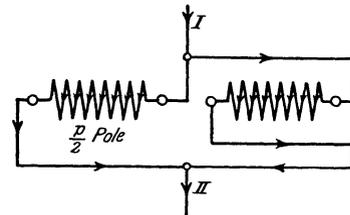


Fig. 66 a.

Fig. 65 b.
DrehmomentFig. 66 b.
Leistung

gleichbleibend.

Drehzahlregelung durch Polumschaltung beim Drehstrom-Asynchronmotor.

Leistung abgebildet. Man erkennt aus denselben ohne besondere Erklärung, wie sich Drehzahl und Wirkungsgrad zueinander verhalten. Diese Kurven sind von der Maschinenfabrik Oerlikon veröffentlicht¹⁾ worden und beziehen sich auf einen ihrer Stufenmotoren zum Antriebe von Stoffdruckmaschinen mit zwei getrennten Wicklungen im Ständer, von denen jede von der einfachen auf die doppelte Polzahl umgeschaltet werden kann. Die Umschaltung erfolgt nach dem Schema der Fig. 69.

Wird bei allen Geschwindigkeiten ungefähr gleichbleibendes Drehmoment verlangt, so kommen aus den Schaltmöglichkeiten

¹⁾ Schweizerische Bauzeitung 54, Nr. 12 vom 18. Sept. 1909 und E. K. B. 1909, Heft 4 u. 5. — O. Knöpfli: Neuer sechsstufiger Motor und die Verwendung der Stufenmotoren zum Antriebe von Stoffdruckmaschinen.

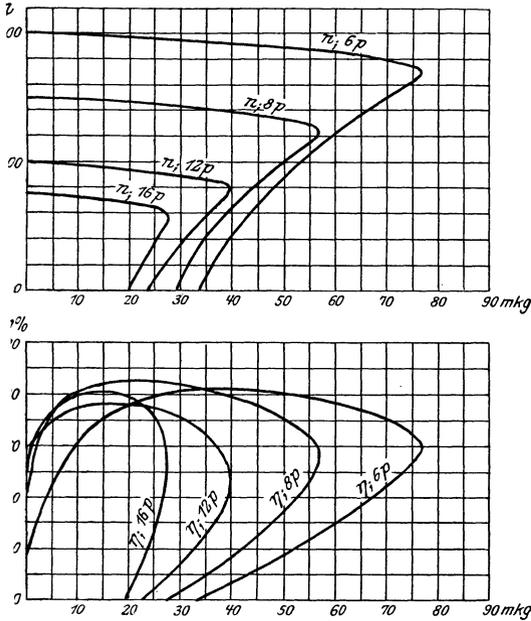


Fig. 67.

Drehmoment

Drehzahlen und Wirkungsgrade bei einem polumschaltbaren Drehstrom-Asynchronmotor (4 Drehzahlen).

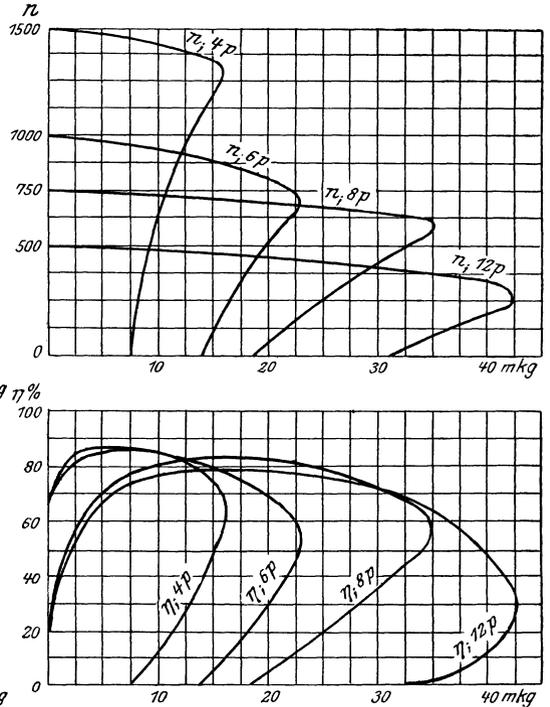


Fig. 68.

Leistung

gleichbleibend.

nach Fig. 69 von oben gezählt nur die erste (12 Pole), zweite (8 Pole), vierte (6 Pole parallel) und sechste (4 Pole parallel) zur Anwendung. Soll die Leistung bei der Drehzahlregelung gleichbleiben (Werkzeugmaschinenantrieb), so sind von oben gezählt die erste, zweite, dritte und fünfte Stellung zu wählen entsprechend 12, 8, 6 Polen in Reihe und 4 Pole in Reihe.

An einem Oerlikonmotor mit zwei Statorwicklungen und sechs Drehzahlen ergaben sich bei annähernd gleichem Drehmomente die folgenden Werte:

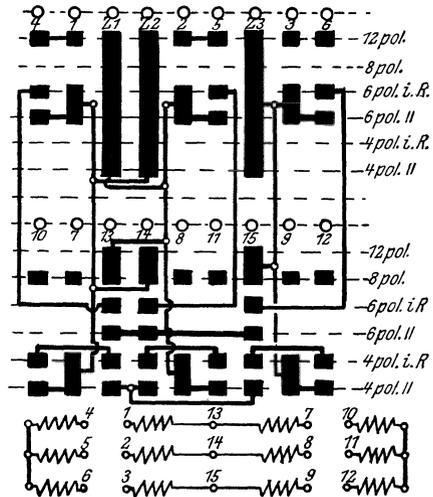


Fig. 69. Schema für die Polumschaltung eines Drehstrom-Asynchronmotors bei 4 Drehzahlen.

Tabelle I.

Polzahl	Leistung in PS	Wirkungs- grad η	Leistungs- faktor $\cos \varphi$	Drehzahl synchron
24	6	56%	0,52	250
16	8,5	62%	0,60	375
12	12	73%	0,68	500
8	13	79%	0,79	750
6	16	78%	0,80	1000
4	23	85%	0,87	1500

Einen mit Rücksicht auf die sonstigen Vorzüge der Polumschaltung nicht übermäßig ins Gewicht fallenden Nachteil hat aber auch diese

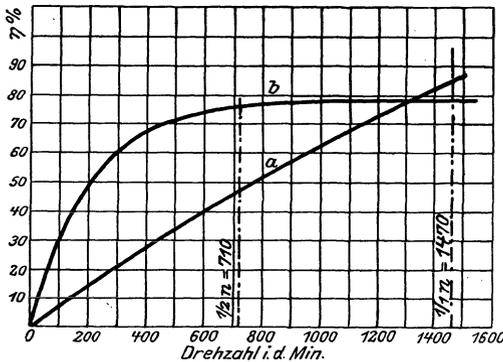


Fig. 70. Wirkungsgradkurven bei Regelung
a) durch Läuferwiderstand, b) durch Pol-
umschaltung.

dieser Regulierung gegenüber derjenigen mittels Widerständen im Läuferstromkreise ist, zeigt das in Fig. 70 gezeichnete Diagramm. Die Kurven gelten für konstantes Drehmoment.

Das Anlassen erfolgt beim polumschaltbaren Motor in der Regel im Ständerstromkreise durch eine der vorher erwähnten Formen und zwar, weil die Ausführung des Läufers mit Schleifringen konstruktive Schwierigkeiten bereitet. Der Läufer ist infolgedessen stets kurzgeschlossen.

Das über das Anlauf- und normale Drehmoment beim Kurzschlußankeromotor Gesagte gilt für den polumschaltbaren Motor indessen nicht mehr.

Auch über diese Verhältnisse zwischen Anlauf- und Normalstrom bei Normalspannung und zwischen normalem Drehmoment und Anzugsdrehmoment hat Oerlikon interessante Versuche angestellt, die für den obenbeschriebenen Stufenmotor hier eingeschaltet werden sollen.

Regelungsart in bezug auf den Motor selbst, denn er muß bei drei und vier Umdrehungszahlen infolge der doppelten Wicklung größer, als er der Leistung entsprechend bei nur einer Drehzahl ausfallen würde, gewählt werden. Dadurch wird die Ausnutzung desselben unvollkommener und der Wirkungsgrad etwas geringer als beim normalen Motor. Wie stark aber zugunsten des polumschaltbaren Motors der Wirkungsgradunterschied bei

Tabelle II.

Polzahl	Verhältnis der normalen zur Anlaufstromstärke	Verhältnis des normalen zum Anlaufdrehmoment
24	1 : 2	1 : 1,87
16	1 : 2,31	1 : 1,51
12	1 : 3	1 : 1,46
8	1 : 4,3	1 : 1,45
6	1 : 5,5	1 : 1,83
4	1 : 8,88	1 : 1,455

In Tabelle II sind die einzelnen Werte für die verschiedenen Polzahlen zusammengestellt. Bei der 24 poligen Schaltung beträgt die Anlaufstromstärke das Doppelte der normalen Betriebsstromstärke, und das Anzugsmoment ist etwa das 1,87fache des normalen Drehmomentes. Beim Umschalten auf eine geringere Polzahl somit auf eine höhere Drehzahl wächst die Stromstärke an. Wenn also der Motor im Stillstande von vornherein in vierpoliger Schaltung angelassen wird, so steigt die Anlaufstromstärke auf etwa den 8,88fachen Wert der normalen, während das entwickelte Drehmoment nur das 1,455fache des dem Vollbetriebe entsprechenden wäre. Es empfiehlt sich demnach, den Motor mit der größten Polzahl anzulassen, und die Drehzahl allmählich zu steigern; man erhält dann wesentlich günstigere Verhältnisse hinsichtlich der Stromstöße als beim gewöhnlichen Kurzschlußankermotor ohne besondere Anlaßvorrichtungen.

Ganz allgemein sei noch erwähnt, daß der Anlasser für den polumschaltbaren Motor naturgemäß möglichst in unmittelbarer Nähe des Motors aufgestellt werden muß, einmal um an Leitungsmaterial zu sparen und ferner, um den Wirkungsgrad durch die Verluste in den Leitungen nicht zu verschlechtern. Am vorteilhaftesten ist es daher, den Anlasser unmittelbar an den Motor anzubauen. Die Spannung, mit der der Motor zu betreiben ist, muß möglichst niedrig (nicht über 500 Volt) gewählt werden, damit der Anlasser infolge der Isolierung der einzelnen Stufen voneinander nicht unverhältnismäßig große Abmessungen erhält.

Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß der Motor beim Abstellen oder beim Übergange zu einer geringeren Drehzahl eine elektrische Bremsung und zwar eine Nutzbremse gestattet; auf S. 83 wird dieses ebenfalls noch besonders behandelt werden.

Der Kaskadenschaltung sowohl wie der Polumschaltung haftet nun der allgemeine Nachteil an, daß die Drehzahl nur sprungweise geändert werden kann und nicht allmählich, wie das durch die Widerstandsregelung im Läufer oder z. B. auch beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor der Fall ist. Um dieses zu erreichen, ist man bei sehr großen Motoren dazu übergegangen, die Regelung durch Änderung des Schlupfes vorzunehmen in der Weise, daß man die Läuferenergie in einem besonderen Maschinensatze nutzbringend verwertet.

k) Die Regelung der Drehzahl durch besondere Regelmaschinen.

Für diese Regelungsmethode sind besonders in neuester Zeit eine ganze Reihe von Patenten angemeldet worden, auf die alle näher einzugehen hier nicht der Raum zur Verfügung steht. Der Grundgedanke für alle diese Vorschläge ist der, wiederum den bei der Drehzahländerung freiwerdenden Teil des Arbeitsvermögens des Läufers nicht zu vernichten, sondern in elektrische Energie umzusetzen, die einem besonderen sog. Hintermotor zugeführt wird. In Fig. 71 ist eine derartige Schaltung dargestellt, wie sie von den Siemens-Schuckert-Werken angewendet wird.

An das Drehstromnetz ist der sog. „Hauptmotor“, ein asynchroner Drehstrommotor, angeschlossen, der in der Hauptsache die zum An-

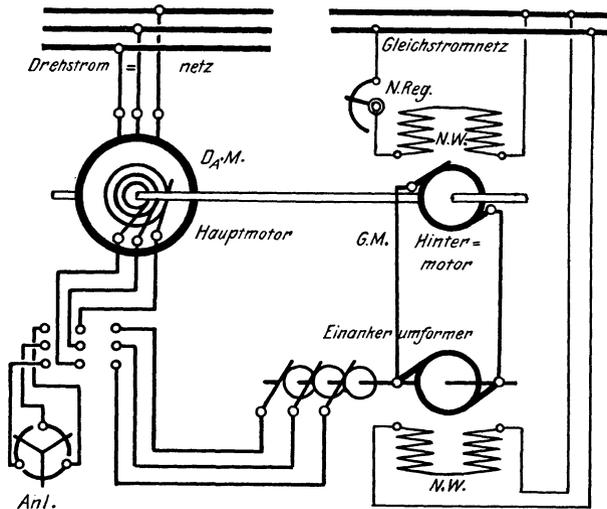


Fig. 71. Drehzahlregelung beim Drehstrom-Asynchronmotor durch einen Regelmaschinensatz.

triebe der Arbeitsmaschine notwendige Leistung liefert. Die drei Schleifringe dieses Motors sind zu einem Umschalter geführt und können über diesen einmal mit einem Anlasser oder mit den Drehzahlregelmaschinen verbunden werden. Diese Regelmaschinen bestehen aus einem Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformer oder auch Motorgenerator, dem die dem Läufer des Hauptmotors entnommene und sonst im Widerstande vernichtete Energie zugeführt und dort in Gleichstrom umgeformt wird. Der so gewonnene Gleichstrom wird an einen Nebenschlußmotor den sog. „Hintermotor“ weitergegeben, der mit dem Hauptmotor unmittelbar gekuppelt ist und seinerseits nun die dem Läufer des Hauptmotors entnommene Energie unter geringen Verlusten im Einankerumformer und Hintermotor auch nutzbar an die Welle der Arbeitsmaschine abgibt. Einankerumformer und Hintermotor erhalten Fremderrregung von einem vorhandenen Gleichstromnetze. Der Hintermotor

kann auch fortgelassen und die erzeugte Gleichstromenergie an ein Gleichstromnetz abgegeben werden.

Die Regelung der Drehzahl mittels eines solchen Regelsatzes ist nach praktischen Erfahrungen aber nur dann wirtschaftlich, wenn während längerer Zeit mit einer größeren Schlüpfung als etwa 8% gearbeitet wird. Bei geringerer Drehzahlverminderung ist die einfache Widerstandsregelung im Läuferstromkreise vorzuziehen, sobald es sich um eine möglichst kontinuierliche Drehzahlabnahme handelt.

Die Regelung des Hauptmotors erfolgt durch die Widerstandsregelung der Fremderregung des Hintermotors. Bei starkem Felde fordert der Hintermotor ein Maximum an elektrischer Energie von dem Einankerumformer, und letzterer wiederum entnimmt diese Energie aus dem Läufer des Drehstrommotors. Dadurch wird die Schlüpfung des Hauptmotors vergrößert und die Drehzahl also herabgesetzt.

Die Phasenverschiebung des Maschinensatzes kann bei allen Belastungen durch die Regelung der Fremderregung so eingestellt werden, daß der Leistungsfaktor $\cos \varphi_M \cong 1$ wird.

Der Wirkungsgrad der Gesamtanordnung ist von dem Regelbereiche abhängig. Bei einem größeren Regulierbereich ist der Einankerumformer und der Hintermotor größer zu wählen, wobei dann aber auch die Verluste zunehmen. Im allgemeinen kann man jedoch den Wirkungsgrad einer derartigen Maschinenzusammensetzung für die Regelung von Drehstrommotoren als günstig bezeichnen, da derselbe etwa bei 30% Schlüpfung noch ca. 85% beträgt gegenüber etwa 65% bei reiner Widerstandsregelung.

Als besonderer Vorteil ist die Regulierung der Phasenverschiebung zu bezeichnen, wodurch es möglich ist, den Stromerzeuger besser auszunutzen, während das bei Verwendung eines Läuferwiderstandes nicht zu erreichen ist; im Gegenteil wird der Leistungsfaktor $\cos \varphi_M$ bei Verminderung der Drehzahl im letzteren Falle ungünstiger, das Kraftwerk also in seiner Ausnutzungsfähigkeit beschränkt.

Regelsätze dieser Art kommen indessen nur bei sehr großen Leistungen etwa bei Umkehrwalzenstraßen und großen Pumpen (Zentrifugalpumpen) zur Anwendung, weil die Anschaffungskosten und der Raumbedarf ganz bedeutende sind.

Brown, Boveri & Cie. benutzen an Stelle des Einankerumformers und Gleichstromhintermotors einen Drehstromkollektormotor, der einen Drehstrom-Synchrongenerator antreibt. Auf diese Weise wird also Drehstromenergie bei der Regelung nicht nur nicht vernichtet, sondern wieder an das Netz zurückgeliefert.

Die Benutzung von besonderen Regelsätzen bei Drehstrom-Asynchronmotoren gestattet demnach eine so gut wie verlustlose Änderung der Umdrehungszahl, und sie findet daher heute in großen Walzwerksbetrieben häufig Verwendung.

1) Die elektrische Bremsung. Auch bei dem asynchronen Drehstrommotor ist eine elektrische Bremsung, abgesehen von der Bremswirkung durch Umkehrung der Drehrichtung, möglich, jedoch sind die Betriebs-

bedingungen für diese Arbeitsweise des Motors grundverschieden von denjenigen für den Gleichstrom-Hauptstrom- und -Nebenschlußmotor. Während bei letzteren, wenn dieselben vom Netze abgeschaltet sind, das Arbeitsvermögen der auslaufenden Maschine genügt, um dem Motor generatorische Wirkung zu geben, ist das beim asynchronen Drehstrommotor nicht der Fall und zwar deswegen, weil das Arbeiten als Generator nur dann erzielbar ist, wenn der Motor durch eine äußere Kraft im gleichen Drehsinne über seine synchrone Drehzahl angetrieben wird. Erst dann überwiegt die elektromotorische Gegenkraft, die vom Läufer in der Ständerwicklung erzeugt wird, gegen die dem Motor vom Netz aufgedrückte Spannung, und es kann Strom ins Netz abgegeben werden.

Die Gl. (45) für die Schlüpfung geht bei diesem sog. übersynchronen Betriebe über in:

$$s' = \frac{n_2 - n_1}{n_2} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2}, \quad (64)$$

$$s' \cdot n_2 = n_2 - n_1,$$

$$s' \cdot \omega_2 = \omega_2 - \omega_1,$$

und Gl. (49b) erhält die Form:

$$V = D(\omega_1 - \omega_2) = -s' \cdot \omega_2 \cdot D, \quad (65)$$

oder da:

$$\omega_2 \cdot D = L_2,$$

so wird:

$$V = -s' \cdot L_2. \quad (66)$$

Der Verlust wird negativ, d. h. die mechanische Leistung L_2 muß dem Motor zugeführt werden. Der Motor wird also angetrieben und läuft als Generator. Die Schlüpfung wird dabei ebenfalls negativ, und da auch das Drehmoment negativ wird, muß auch die elektrische Leistung negativ werden.

Die elektrische Leistung ist dann:

$$L_1 = \omega_1 \cdot D = \omega_2(1 - s') D, \quad (67)$$

und die mechanische Leistung:

$$L_2 = \omega_2 \cdot D. \quad (68)$$

Ist die treibende Kraft für den Motor entsprechend den hier zu behandelnden Fällen sowohl nach Stärke als auch nach Dauer beschränkt, dann kann der Motor durch die generatorische Arbeitsweise also durch die Stromlieferung gebremst werden (Nutzbremsung).

Andererseits wird der asynchrone Drehstrommotor auch unmittelbar als Stromerzeuger in ausgedehnten Kraftwerken benutzt, worauf jedoch erst im II. Bande näher eingegangen werden wird.

Bei der Kaskadenschaltung ist diese Nutzbremsung folgendermaßen zu erzielen. Arbeiten die beiden Motoren nicht in Hintereinanderschaltung, sondern parallel also mit der normalen Drehzahl, und werden

dieselben dann plötzlich in Kaskade geschaltet, so haben sie sofort das Bestreben, z. B. bei gleicher Polzahl nur mit halber Drehzahl zu laufen. Sie werden dann so lange übersynchron angetrieben und wirken demnach gleichzeitig bremsend und stromerzeugend, bis die halbe Drehzahl erreicht ist. Eine solche Arbeitsweise ist indessen in maschinellen Betrieben wohl kaum anzutreffen, weil ein Umschalten aus dem Parallel- in die Kaskadenschaltung so schnell und ohne Unterbrechung beim Arbeitsmaschinenantriebe äußerst selten vorkommt. Die Drehzahlübergänge vollziehen sich vielmehr allmählich. Bei der Schaltung nach Fig. 64 wäre die Nutzbremung auf diese Art ebenfalls nicht möglich. Nur bei Drehstrombahnen mit zwei oder vier Triebmotoren hat diese Bremswirkung und Stromrückgewinnungs-Möglichkeit praktische Bedeutung erlangt, weil hierzu auch die Nutzbremung im Gefälle hinzukommt¹⁾.

Das gleiche gilt auch für den polumschaltbaren Motor beim Übergange von einer höheren zu einer geringeren Drehzahl, und die Nutzbremung ist naturgemäß um so stärker, je größer die Drehzahldifferenz ist.

Neben diesem übersynchronen Betriebe, wobei der Drehsinn des Motors unverändert ist, soll schließlich noch derjenige erwähnt werden, bei welchem der Motor durch eine äußere Kraft entgegen dem durch das primäre Drehfeld bedingten Drehsinne angetrieben wird. Das ist z. B. dann der Fall, wenn bei einem Krane der Motor nicht mehr imstande ist, die Last weiter zu heben, diese vielmehr zu sinken beginnt, ohne daß der Motor abgeschaltet wird. Dann wird die Schlüpfung $s = 1$ und größer, also in Gl. (45):

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

ist n_2 negativ.

Damit wird ferner in Gl. (49b) der Verlust V größer als die zugeführte Leistung L_1 und d. h., daß dem Motor jetzt sowohl elektrische wie auch mechanische Leistung zugeführt werden muß, und beide im Läuferstromkreise in Wärme umgesetzt werden. Das folgt ferner auch aus $L_2 = \omega_2 \cdot D$, wobei jetzt ω_2 negativ also deshalb auch die mechanische Leistung L_2 negativ ist. Der Motor wirkt demnach vollständig als Bremse.

In Fig. 72 ist die Arbeitsweise des asynchronen Drehstrommotors für alle vorkommenden Schlüpfungen s in den Grenzen von 0 bis +1 (Motor), +1 bis $+\infty$ (Bremse) und 0 bis $-\infty$ (Generator) durch Schau-
linien für L_1 , L_2 , $\cos \varphi$, J_1 und D dargestellt und wohl ohne weitere Erklärung verständlich.

m) Die Apparate im äußeren Stromkreise. Der asynchrone Drehstrommotor wie überhaupt die Wechselstrom-Induktionsmotoren haben wie auf S. 48 bereits erwähnt den großen Vorteil, un mittel-

¹⁾ Siehe Kyser: Die elektrischen Bahnen und ihre Betriebsmittel.

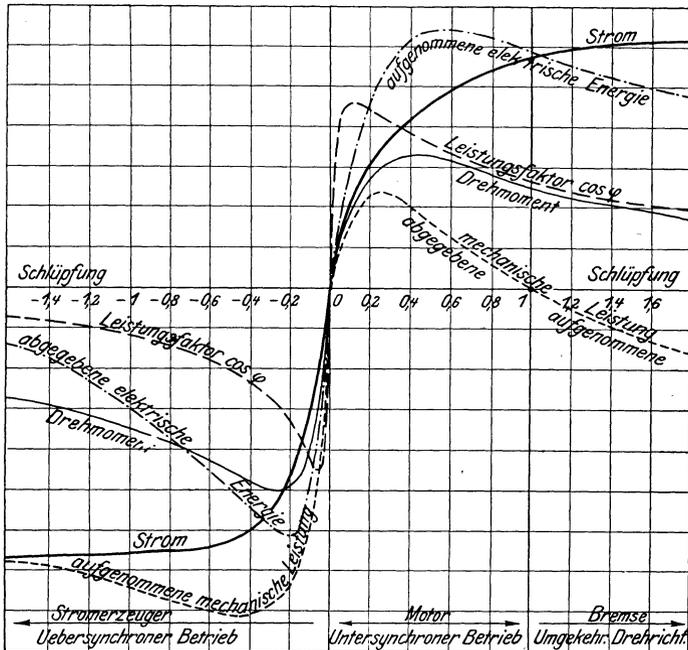


Fig. 72. Motordiagramm für alle Arbeitsweisen des Drehstrom-Asynchronmotors in Abhängigkeit von der Schlüpfung.

bar mit Hochspannung betrieben werden zu können. Bei der In- und Außerbetriebsetzung solcher Hochspannungsmotoren treten nun aber elektrische Erscheinungen unerwünschter Natur, vor allem sog. Überspannungen¹⁾ d. h. Spannungen auf, die um ein Mehr- oder Vielfaches höher liegen als die Betriebsspannung. Diese Überspannungen können unter Umständen für den Motor oder auch für die Zuleitungen (Kabel, Isolatoren) gefährlich werden und Durchschläge oder Verletzungen der Wicklungsisolation zur Folge haben. Es müssen daher im Motorstromkreise besondere Schutzapparate vorgesehen bzw. die Leitungsanlagen (Kabelisolation) so ausgeführt sein, daß die Überspannungen bei Schaltvorgängen entweder soweit irgend möglich vermieden oder wenigstens für die Isolation von Motor und Leitungen auf ein ungefährliches Maß herabgedrückt werden.

Der einfachste und am häufigsten angewendete Schutz bei Hochspannungsmotoren wird dadurch erzielt, daß man beim Ein- und Ausschalten vor der vollständigen Schließung bzw. Öffnung des Schalters induktionsfreie Widerstände in den Statorstromkreis einschaltet (Fig. 73). Der Schalter muß zu diesem Zwecke als Umschalter ausgebildet sein derart, daß die Umschaltung von der Widerstands-

¹⁾ Über die „Überspannungen“ wird der II. Band Ausführlicheres bringen. Einige kurze Bemerkungen sind indessen bereits im III. Kapitel „Die Transformatoren“ enthalten (S. 294).

auf die Betriebsstellung bzw. umgekehrt stets zwangläufig in richtiger Reihenfolge geschieht. Der Motor erhält durch diesen Schutz beim Einschalten auf der ersten Stufe eine wesentlich verminderte Klemmenspannung. Ist der Läufer auf Touren gekommen, dann geht man auf die zweite — die Betriebsstellung des Schalters — über, wobei der Schutzwiderstand kurzgeschlossen oder abgeschaltet wird.

Die zum Anlassen und zur Sicherung des Motors gegen Überlastungen notwendigen Apparate werden selbstverständlich durch einen solchen Schutzschalter nicht überflüssig.

Bei Spannungen unter etwa 3000 Volt und bei Leistungen unter 100 PS sind derartige Schutzschalter im allgemeinen nicht erforderlich.

An Stelle der einfachen Momenthebelschalter mit offenen Kontakten, wie sie zum Einschalten des Stromkreises bei Gleichstrommotoren üblich sind, bei denen also die Stromunterbrechung in der freien Luft erfolgt, und der üblichen Schmelzsicherungen sind ferner bei Spannungen über etwa 750 Volt stets Ölschalter zu empfehlen. Bei diesen liegen die Kontakte in einem Ölkessel unter Öl, und die Unterbrechung des Stromes erfolgt ebenfalls unter Öl. Der Vorteil solcher Ölschalter liegt darin, daß bei der Stromunterbrechung keine gefährlichen Spannungen auftreten können, was bei den Luftschaltern infolge des bei der Unterbrechung auftretenden Lichtbogens möglich ist. Ähnliches gilt auch von dem Ansprechen der Schmelzsicherungen, die dabei noch den weiteren Nachteil haben, daß sie wie in der Praxis häufig beobachtet bei Überlastungen nicht stets gleichzeitig in allen drei Phasen abschmelzen, sondern zumeist nur in einer Phase. Ist das aber der Fall, dann läuft der Motor, sofern diese einphasige Stromunterbrechung nicht sofort bemerkt und der Motor außer Betrieb gesetzt wird, Gefahr, als Einphasenmotor mit entsprechend höherer Belastung der einen noch betriebsfähigen Phase weiter zu arbeiten; dadurch kann die Statorwicklung zerstört oder wenigstens in ihrer Isolation derart durch zu starke Erwärmung angegriffen werden, daß bei einer im normalen Betriebe dann vorkommenden nur geringfügigen Überlastung ein vollständiger Defekt eintritt. Zur Vermeidung der Sicherungen gibt man den Ölschaltern Relais, die vom Strome abhängig wirken und den Schalter zur Auslösung bringen, wenn die Belastung eine am Relais eingestellte Grenze überschreitet. Weiteres über diese selbsttätigen Schalter ist im III. Abschnitte auf S. 285 angegeben.

Man sollte aus den erwähnten Gründen über 1000 Volt vorteilhafter nur die Ölschalter mit selbsttätig wirkender Ausschaltvorrichtung bei Überlastungen (Zeitrelais) wählen. Es genügen im allgemeinen für den Drehstrommotor Relais in zwei Phasen, weil die Ständerwicklung verkettet ist und die Störung in einer Phase dann auch auf die anderen übertragen wird. Ist dagegen beim

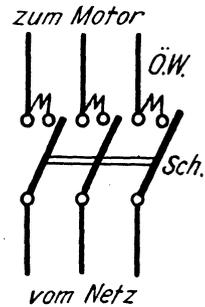


Fig. 73. Schematische Darstellung eines dreipoligen Hochspannungs-Ölschalters.

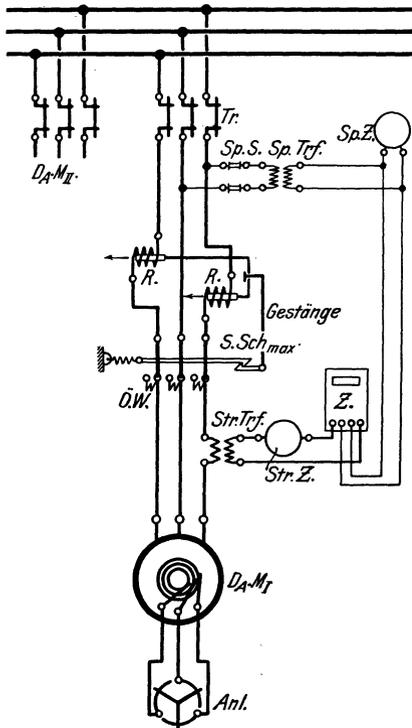


Fig. 74. Schaltungsschema für eine Hochspannungs-Motoranlage mit 2 Drehstrom-Asynchronmotoren.

Transformator oder an den Sammelschienen der Anlage der Nullpunkt geerdet, dann müssen Relais stets in allen drei Phasen vorhanden sein (siehe S. 286).

In Fig. 74 ist nun noch das vollständige Schaltbild für eine Hochspannungsmotoranlage wiedergegeben. Sind wie in Fig. 74 mehrere Motoren an eine Hauptsammelschiene angeschlossen, dann sind zweckmäßig noch Trennmesser *Tr.* (siehe S. 280) in jeden Motorstromkreis zu legen, um dadurch einen ganzen Motorstromkreis bei Untersuchung vollständig spannungslos machen zu können, ohne den anderen Betrieb zu stören. An Meßinstrumenten sind vorhanden: Spannungs- und Stromzeiger, die wie in Fig. 64 an Meßtransformatoren angeschlossen sind sowie ein Zähler *Z.* Der Spannungszeiger *Sp.Z.* liegt vor dem Hauptschalter *S.Sch.-max*, damit die Bedienung, noch bevor der Hauptschalter geschlossen wird, jederzeit darüber unterrichtet ist, ob die Sammelschienen unter Spannung stehen.

11. Der asynchrone Einphasen-Induktionsmotor.

Der Einphasen-Induktionsmotor ist in seinem Aufbau und in seiner Arbeitsweise dem Dreiphasen-Induktionsmotor ähnlich, und es kann daher davon abgesehen werden, die Betriebsverhältnisse dieses Motors eingehender zu betrachten, zumal der Einphasenmotor dieser Gattung nur selten und in der Regel nur für kleinere Leistungen Anwendung findet.

Die Drehzahl ist ebenfalls nur um den Betrag der Schlüpfung abweichend von der synchronen und hat den gleichen Verlauf wie diejenige eines Drehstrommotors. Dasselbe gilt vom Drehmomente, dessen Kurve vollkommen derjenigen des Drehstrommotors entspricht.

Eine Überlastung des Motors kann bis etwa zum 1,5fachen des normalen Drehmomentes stattfinden, ohne daß derselbe abfällt unter der Voraussetzung konstanter Klemmenspannung.

Der Stromverbrauch des Motors ist:

$$J = \frac{736 \cdot L_M}{E_k \cdot \cos \varphi_M \cdot \eta_M} \quad (69)$$

12. Das Anlassen und die Regelung des asynchronen Einphasenmotors.

Hinsichtlich des Anlassens unterscheidet sich der Einphasenmotor aber grundsätzlich vom Drehstrommotor. Da die Ständerwicklung naturgemäß einphasig gewickelt ist, kann sie kein Drehfeld erzeugen, durch das der Läufer in Umdrehungen versetzt wird. Für das Anlassen sind daher besondere Schaltungen und Hilfseinrichtungen anzuwenden.

Um zunächst ein primäres Drehfeld hervorzurufen, das den Motor zum Anlaufen bringt, ist es notwendig, durch besondere Mittel eine zweite Phase herzustellen. Das geschieht durch eine besondere Hilfswicklung auf dem Ständer, die parallel zur Hauptphase liegt, und deren Strom durch Einschalten einer Drosselspule oder einer Kapazität eine Phasenverschiebung von annähernd 90° gegenüber demjenigen in der Hauptwicklung erhält. In den weitaus meisten Fällen verwendet man Drosselspulen, weil sich die bislang hergestellten Kapazitäten im praktischen Betriebe auf die Dauer nicht bewährt haben. Nach Beendigung des Anlassens wird die Hilfswicklung abgeschaltet, weil sie dann überflüssig ist und bei dauernder Einschaltung nur unnötigen Strom aufnehmen, also Energie verzehren und nutzlos in Wärme umsetzen würde.

Das durch die Hilfswicklung erzeugte Drehfeld ist jedoch schwach und unvollkommen, und ein Einphasen - Induktionsmotor kann infolgedessen nicht mit voller Belastung anlaufen, sondern nur mit etwa $\frac{1}{3}$ Last oder eventuell nur sogar leerlaufend. Das hängt von der Größe des Motors und der Ausführung des Läufers ab, denn auch bei diesem Motor kann der Läufer mit einer Kurzschlußwicklung oder mit Schleifringen versehen sein.

Bei Motoren kleiner Leistung mit Kurzschlußanker erfolgt das Anlassen in der Regel durch einfaches Schließen des Hauptschalters, der in diesem Falle aber besonders ausgebildet ist (Anlaßschalter), und zwar mit eingebautem Widerstande oder Drosselspule für die Hilfsphase. Solch ein Anlaßschalter schaltet den Motor gewöhnlich in der Ruhestellung zweipolig vom Netz ab, und es ist dann ein besonderer zweiter Schalter im äußeren Stromkreise nicht mehr notwendig. Bei dieser Art der Inbetriebsetzung muß der Anlauf des Motors stets unbelastet erfolgen. Um das ohne Zwischenschaltung von Leerscheiben bei Riemenübertragung oder von sonstigen umständlichen Kupplungsgetrieben zu erreichen, wird die Motorriemenscheibe bzw. die Motorkupplung mit einer Fliehkraftkupplung ausgerüstet, durch welche die Riemenscheibe oder die Welle der Arbeitsmaschine erst mitgenommen wird, wenn der Motor eine genügende Drehzahl erreicht hat, um bei Belastung nicht mehr abzufallen. Die Anlaufstromstärke erreicht hierbei etwa den 2- bis 2,5fachen Betrag der normalen Betriebsstromstärke bei voller Belastung, und aus diesem Grunde werden auch Ein-

phasen-Induktionsmotoren größerer Leistung (siehe S. 62) nicht mehr auf eine solche einfache Art in Betrieb gesetzt werden dürfen.

Um die großen Stromstöße beim Anlauf zu vermeiden, verwendet man daher auch beim Einphasenmotor den Schleifringanker mit Anlaßwiderstand.

Zwei gebräuchliche Schaltungen sind in Fig. 75 und 76 abgebildet. Während in Fig. 75 die Hilfsphase mit Drosselspule nach Beendigung des Anlassens durch Öffnen des Schalters Sch_2 abgeschaltet wird, geschieht dieses in Fig. 76 durch einen Anlaßschalter besonderer Ausführung, der beim Anlassen auf Kontakt 1 und, bevor die volle Betriebsdrehzahl erreicht ist, auf Kontakt 2 umgeschaltet wird. Im

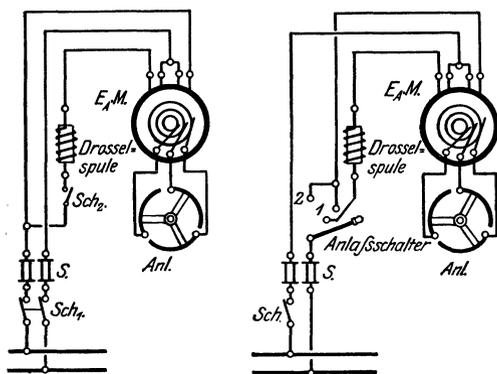


Fig. 75.

Fig. 76.

Anlassen des Einphasen-Induktionsmotors durch Hilfsschalter und Drosselspule.

ersten Falle ist noch ein besonderer zweipoliger Schalter Sch_1 notwendig, während man im zweiten Falle mit nur einem einpoligen Schalter auskommt, um den Motor allpolig vom Netze zu trennen.

Das Anlaufdrehmoment D_A beträgt beim Schleifringankermotoretwa die Hälfte des normalen, und der Anlaufstrom steigt bis zum doppelten des Vollaststromes. Beträgt $D_A = \frac{1}{3}$ des normalen Drehmomentes, dann kann

die Anlaufstromstärke J_A etwa auf der Höhe der normalen Betriebsstromstärke gehalten werden.

Bei Betriebsspannungen über 500 Volt und größeren Leistungen ist es ebenfalls zweckmäßiger, an Stelle des einfachen Anlaßschalters einen Ölschalter zu verwenden.

Auch der Einphasen-Induktionsmotor kann übersynchron angetrieben Strom abgeben, gestattet also eine Nutzbremmung, doch wird hiervon kaum Gebrauch gemacht, zumal diese Motorgattung infolge der Wechselstrom-Kollektormotoren immer seltener verwendet wird.

Der asynchrone Zweiphasen-Induktionsmotor soll übergangen werden, weil derselbe heute dadurch, daß man die alten noch bestehenden Zweiphasenstromanlagen auf Drehstrom umgebaut hat, oder Dreiphasenstrom aus Zweiphasenstrom mit Hilfe besonderer Transformatorschaltungen (siehe S. 256) herstellt, so gut wie keine Verwendung mehr findet.

C. Die Ein- und Mehrphasen-Wechselstrom-Kollektormotoren.

13. Der Einphasen-Kollektormotor im allgemeinen.

Dieser Motor, dessen praktischer Durchbildung in den letzten Jahren ganz besondere Aufmerksamkeit geschenkt worden ist, kommt in erster Linie für die Zwecke des elektrischen Bahnbetriebes in Frage. Für die hier zu behandelnden Verhältnisse ist derselbe mit Ausnahme von Spezialantrieben in Spinnereien und Webereien bisher wenig im Gebrauch. Das hat seinen Grund vornehmlich darin, daß der Gleichstrom- und Drehstrommotor allen durch die anzutreibenden Maschinen gestellten Forderungen vollkommen gerecht wird, und es demnach nicht so großes Bedürfnis ist, etwa die Anlagelkosten durch die fortfallende dritte Stromzuführungsleitung zu verringern, was beim Bahnbetriebe in der Hauptsache zur Durchbildung des Einphasen-Kollektormotors Veranlassung war. Dazu kommt noch, daß der Einphasengenerator einen schlechteren Wirkungsgrad hat als der Dreiphasengenerator, und daß er sich in seiner Arbeitsweise auch nachteilig von der Drehstrommaschine unterscheidet.

Im Aufbau ist der Wechselstrom-Kollektormotor im allgemeinen dem Gleichstrommotor ähnlich; er besitzt, wie schon die Benennung sagt, einen Kollektor mit Bürsten und unterscheidet sich konstruktiv vom Gleichstrommotor im wesentlichen nur dadurch, daß das Magnet-system lamelliert wird, d. h. daß letzteres aus dünnen, einseitig mit Papier beklebten Blechen zusammengesetzt ist, um die Hysteresis- und Wirbelstromverluste, die bei Wechselstrom naturgemäß beträchtlich höher sind als bei Gleichstrom, nach Möglichkeit herabzumindern. In dem elektrischen Aufbau und in den Betriebsverhältnissen sind dagegen ganz bedeutende Verschiedenheiten vorhanden. Der Unterschied zwischen den Einphasen-Wechselstrom-Kollektormotoren und den Einphasen-Induktionsmotoren liegt darin, daß erstere mit hohem Drehmomente anlaufen und eine sehr einfache, gute Drehzahlregelung zulassen.

Man unterscheidet, wenn von einer rein wissenschaftlichen Einteilung der einzelnen Motorgattungen abgesehen wird, heute in der Praxis folgende Typen:

- den Reihenschlußmotor,
- den Repulsionsmotor,
- den Repulsions-Induktionsmotor und
- den kompensierten Repulsionsmotor.

Besonders sei hervorgehoben, daß bei allen diesen Motortypen der Leistungsfaktor und der Wirkungsgrad etwas schlechter sind als beim asynchronen Drehstrommotor, und daß sie im Gewichte schwerer ausfallen als Drehstrom- oder Gleichstrommotoren gleicher Leistung.

Da aber auch der Einphasen-Kollektormotor immer mehr für den Arbeitsmaschinenantrieb an Bedeutung gewinnt, sollen die charakteristischen Eigenschaften der obengenannten Motortypen, das Anlassen, Regeln und die Schaltungen ebenfalls besprochen werden.

14. Der Wechselstrom-Reihenschlußmotor.

Derselbe ist sowohl in seiner Schaltung von Magnetwicklung und Anker, sowie in seinen Betriebsverhältnissen hinsichtlich Drehzahl und Drehmoment dem Gleichstrom-Hauptstrommotor ähnlich. Auch hier liegt die Ständerwicklung *St.W.* (Fig. 77) in Reihe mit dem Anker *A.*, und die Erregung ist also abhängig vom Strom $J \equiv J_a$ d. h. von der Belastung. Allerdings kann man einen Gleichstrom-Hauptstrommotor, auch wenn derselbe ein lamelliertes Feldsystem erhält, nicht ohne weiteres praktisch zufriedenstellend und wirtschaftlich mit Wechselstrom betreiben, denn infolge der Stromart an sich treten in diesem Falle eine Reihe von Übelständen auf, die in einem bedeutenden Effektivverluste im Anker, starkem Bürstenfeuer und einem schlechten Leistungsfaktor ($\cos \varphi_M$) liegen. Diese Nachteile hat man aber heute in befriedigender

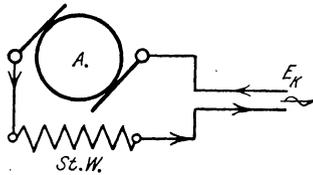


Fig. 77. Stromlaufscha des Wechselstrom-Reihenschlußmotors.

Wechselstrom betreiben, denn infolge der Stromart an sich treten in diesem Falle eine Reihe von Übelständen auf, die in einem bedeutenden Effektivverluste im Anker, starkem Bürstenfeuer und einem schlechten Leistungsfaktor ($\cos \varphi_M$) liegen. Diese Nachteile hat man aber heute in befriedigender

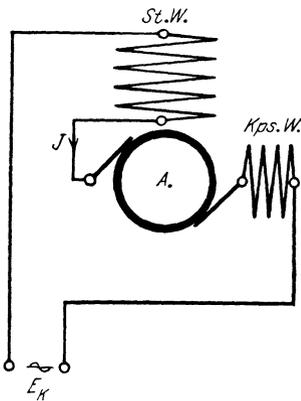


Fig. 78.

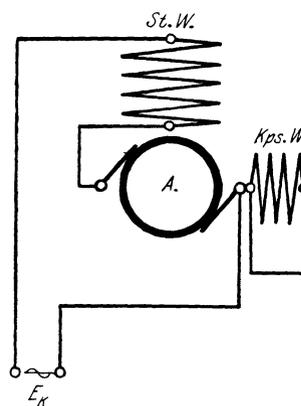


Fig. 79.

Stromlaufscha des Wechselstrom-Reihenschlußmotors mit Kompensationswicklung.

Weise überwunden und zwar dadurch, daß man z. B. die Magnete noch mit einer besonderen Kompensationswicklung *Kps.W.* versieht, die entweder in Reihe mit dem Anker (Fig. 78) liegt oder in sich kurzgeschlossen ist (Fig. 79). Im letzteren Falle tritt eine transformatorische Wirkung zwischen Anker und Kompensationswicklung ein.

In der in der Wechselstromtechnik gebräuchlichen vektoriellen Darstellung der einzelnen Größen wie Strom, Spannung, Kraftfluß usw.,

machen d. h. zu kompensieren, erhält der Ständer die bereits erwähnte Kompensationswicklung.

Den EMKen. E_a und E_s müssen zwei gleich große EMKe. in der Ständerwicklung das Gleichgewicht halten (E_2 und E'_s), die demnach in der Phase um 180° gegen E_a und E_s verschoben sind. Die Klemmenspannung E_k ist die Resultante von E_a und E_s und bildet mit dem Strome J den Phasenverschiebungswinkel φ_M .

Es soll nun unter Zugrundelegung der Fig. 80 mit Benutzung des von Heubach¹⁾ angegebenen Verfahrens die gegenseitige Abhängigkeit von Leistung, Drehmoment und Drehzahl etwas eingehender behandelt werden.

Man zerlegt die Klemmenspannung E_k in ihre zwei Komponenten E_w (Wattkomponente) und E_{wl} (wattlose Komponente), indem man über E_k als Durchmesser einen Kreis schlägt und E_w und den Phasenwinkel φ_M einträgt.

$$\text{Es ist:} \quad E_w = E_a = E_k \cdot \cos \varphi_M = \overline{Ob}, \quad (72)$$

$$E_{wl} \equiv J \equiv \Phi = E_k \cdot \sin \varphi_M = \overline{ab} \quad (73)$$

(≡ identisch).

Die EMK. der Selbstinduktion ist direkt proportional dem Strome J , also auch dem Kraftflusse Φ .

Die dem Motor zugeführte elektrische Energie ist:

$$L_M^0 = E_k \cdot J \cdot \cos \varphi_M = E_w \cdot J = \overline{Ob} \cdot \overline{ab}, \quad (74)$$

also gleich dem doppelten Flächeninhalte des rechtwinkligen Dreiecks Oab unter der Voraussetzung, daß die Klemmenspannung konstant ist, und es ist somit die Höhe \overline{bc} dieses Dreiecks in einem bestimmten Maßstabe gemessen die zugeführte Energie L_M^0 .

Die vom Motor abgegebene Leistung ist:

$$L_M = \left. \begin{aligned} & \frac{E_k \cdot J \cdot \cos \varphi_M - J^2 (W_a + W_h)}{736} \\ & = \text{const.} [E_w \cdot J - J^2 (W_a + W_h)]. \end{aligned} \right\} \quad (75)$$

Im Diagramm Fig. 80 wird L_M folgendermaßen gefunden: Da die Dreiecke Oab und bac ähnlich sind, ist:

$$\overline{Oa} \cdot \overline{ac} = ab^2 = J^2,$$

bzw. wenn der Voraussetzung nach $E_k = \text{const.}$:

$$\overline{ac} \equiv \overline{ab}^2 \equiv J^2.$$

Wählt man nun auf der Strecke \overline{bc} einen Punkt d so, daß $\overline{cd} =$ Wattverlust im Motor, so ist:

$$\text{tg } \widehat{cad} = \frac{\overline{cd}}{\overline{ac}} \equiv \frac{J^2 (W_a + W_h)}{J^2} = W_g,$$

und die Strecke \overline{bd} gibt die Nutzleistung des Motors an:

$$\overline{bd} \equiv L_M = \text{const.} [E_w \cdot J - J^2 \cdot W_g].$$

¹⁾ Vergl. J. Heubach: Der Wechselstrom-Serienmotor.

Mit Benutzung der Gl. (70) ist das Drehmoment:

$$D = \frac{4,44 k \cdot g_m \cdot \frac{p \cdot n}{60} N}{2\pi \cdot 9,81 \frac{n}{60} 10^8} \cdot \Phi \cdot J = \text{const.} \cdot \Phi \cdot J, \quad (76)$$

also wie beim Gleichstrom-Hauptstrommotor proportional Φ und J . Das Anlaufdrehmoment ist infolgedessen gleichfalls ein kräftiges. Im Diagramm ist das Drehmoment:

$$D \equiv \overline{a b^2} \equiv \overline{a c},$$

bzw. die Zugkraft:

$$Z \equiv \text{const.} \cdot \overline{a c}.$$

Schließlich findet man die Drehzahl n aus den Gl. (71) und (73) zu:

$$n = \frac{E_a}{\Phi} = \frac{E_k \cdot \cos \varphi_M}{E_k \cdot \sin \varphi_M} = \cotg \varphi.$$

Zieht man daher in einem beliebigen Abstände eine Parallele zu Oa , dann ist:

$$\sphericalangle Olm = \varphi, \quad \cotg \varphi = \frac{\overline{lm}}{\overline{Om}},$$

oder da:

$$\overline{Om} = \text{const.},$$

die Drehzahl

$$n \equiv \overline{ml}.$$

Der Gesamtwiderstand W_g kann gleichfalls aus dem Diagramm gefunden werden. Zu diesem Zwecke wählt man auf der Strecke $\overline{Ob} = E_a = E_w$ einen Punkt e so, daß \overline{be} dem Spannungsabfall im Motor proportional ist. Dadurch wird E_w in zwei Teile zerlegt und zwar in einen \overline{Oe} gleich der EMK. des Ankers E_a und einen zweiten \overline{eb} gleich dem Spannungsabfall im Motor. Da der Punkt b sich auf dem Halbkreise Oa bewegt, muß sich auch Punkt e auf einem Halbkreise bewegen, dessen Mittelpunkt gefunden wird aus der Beziehung:

$$\widehat{\text{tgga}} f = \frac{\overline{gf}}{\overline{ga}} \equiv W_g.$$

In Fig. 81 sind nun die charakteristischen Kurven eines Wechselstrom-Reihenschlußmotors zusammengestellt, und man kann ohne besondere Erklärung die gegenseitige Abhängigkeit, sowie den ähnlichen Verlauf dieser Schaulinien mit denjenigen des Gleichstrom-Hauptstrommotors (Fig. 4) leicht erkennen. Die Drehzahl steigt auch hier mit abnehmendem Drehmomente. Bei Entlastung z. B. beim Abfallen des Riemens geht der Motor ebenfalls durch, und er muß daher gleichfalls mit einem Fliehkraftschalter od. dgl. versehen werden, der den Hauptausschalter gegebenenfalls zur Auslösung bringt.

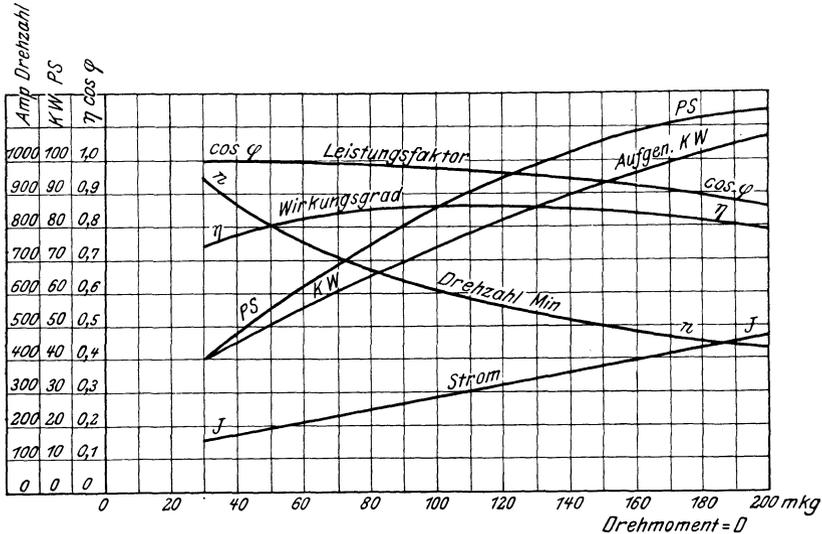


Fig. 81. Vollständiges Motordiagramm für den Wechselstrom-Reihenschlußmotor.

15. Die Regelung des Wechselstrom-Reihenschlußmotors.

Das Anlassen des Reihenschlußmotors kann gleichfalls durch einen dem Anker vorgeschalteten, veränderlichen Widerstand erfolgen. Da dieses aber, wie bereits des öfteren erwähnt, unwirtschaftlich ist, andererseits der Wechselstrom die Möglichkeit gibt, ihn in beliebiger Weise und mit geringen Verlusten transformieren zu können, so wird im allgemeinen das letztere vorgezogen. Dazu kommt noch der Umstand, daß sich der Reihenschlußmotor nicht für alle Spannungen in betriebssicherer Weise ausführen läßt, insbesondere nicht für Hochspannung, weswegen in den häufigeren Fällen von vornherein ein Transformator zwischen Sammelschiene und Motor eingeschaltet werden muß. Man benutzt deshalb diesen Transformator gleichzeitig zum Anlassen, indem man die Sekundärwicklung in mehrere Stufen unterteilt und letztere mit einem Stufenschalter verbindet. In Fig. 82 ist die vollständige Schaltung eines auf diese Weise anzulassenden Reihenschlußmotors, wie sie von den Siemens-Schuckert-

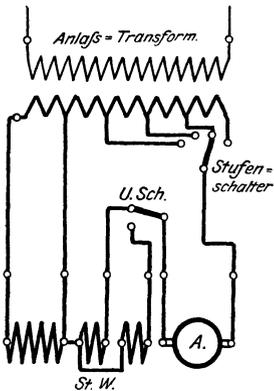


Fig. 82. Anlassen, Drehzahlregelung und Drehrichtungsänderung beim Wechselstrom-Reihenschlußmotor.

Mit Hilfe des Anlaßtransformators kann aber der Motor nicht nur in Betrieb gesetzt, sondern durch Änderung von E_k (Gl. 71 u. 72) auch auf jede beliebige Drehzahl unterhalb der normalen ein-

gestellt werden, sofern die Abstufung des Transformators entsprechend bemessen ist. Neben dem in Fig. 82 abgebildeten normalen Transformator kann auch ein Autotransformator benutzt werden, wenn die Spannung in der Zuleitung im entsprechenden Verhältnisse zur Motorspannung steht (vgl. S. 260).

Zur Änderung der Drehrichtung erhält der Motor noch eine zweite Wicklung, die durch einen einpoligen Umschalter *U.Sch.* eingeschaltet wird (Fig. 82).

Auch beim Reihenschlußmotor besteht die Möglichkeit, ihn, wenn er durch eine äußere Kraft im gleichen Drehsinne angetrieben wird, als Stromerzeuger auf einen Widerstand arbeiten zu lassen, d. h. also sicher zu bremsen, wie das ebenso beim Gleichstrom-Hauptstrommotor der Fall war. Das ist ganz besonders bei Hebezeugen von Vorteil.

16. Der Repulsionsmotor.

Der Repulsionsmotor, der zuerst von Elihu Thomson 1899 angegeben worden ist, unterscheidet sich vom Reihenschlußmotor dadurch, daß nur die Ständerwicklung *St.W.* vom Wechselstrom durchfließen, während im Anker *A.* nach der Wirkung eines Transformators Strom induziert wird. Das Stromlaufschema ist in Fig. 83 abgebildet.

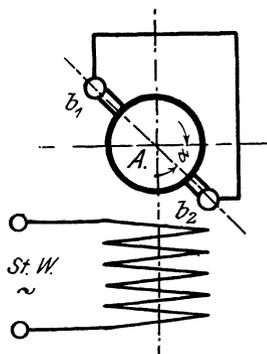


Fig. 83. Stromlaufschema des Repulsionsmotors.

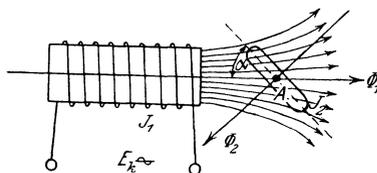


Fig. 84.

Die auf dem Kollektor schleifenden Bürsten b_1 , b_2 sind miteinander verbunden und also kurzgeschlossen. Dadurch, daß Ständer und Anker unabhängig voneinander sind, weil dem letzteren kein Strom von außen zugeführt wird, kann der Motor unmittelbar mit Hochspannung betrieben werden, und die Bedienung der Bürsten ist während des Betriebes ohne Gefahr möglich.

Der Grundgedanke für diesen Motor beruht darauf, daß eine kurzgeschlossene, auf einer Achse befestigte Spule *A.* (Fig. 84) in ein Wechselfeld gebracht sich zu drehen beginnt, bis sie parallel zur Richtung der Kraftlinien steht. In dieser Stellung wird in der Spule kein Strom mehr induziert, und die Drehbewegung hört auf. Verwendet man nun statt einer Spule einen Anker mit einer ganzen Reihe solcher Spulen (Fig. 85), so erreicht man eine fortdauernde Drehung des Ankers. Der

Kurzschluß der Spulen wird durch die bereits erwähnten, miteinander verbundenen Bürsten erzielt.

Der in der Spule induzierte Strom J_2 bzw. das von letzterem erzeugte Feld Φ_2 ist gegenüber J_1 bzw. Φ_1 der Ständerwicklung um nahezu 180° in der Phase verschoben (Fig. 86). Steht der Motor still, so wird durch den in der Magnetwicklung fließenden Magnetisierungsstrom J_m das primäre Feld Φ_1 erzeugt. Wie leicht einzusehen, verhält sich der

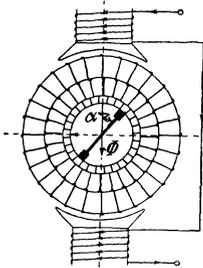


Fig. 85. Repulsionsmotor.

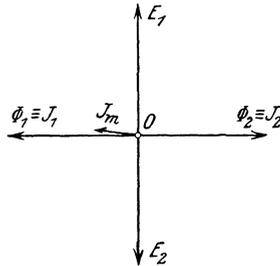


Fig. 86. Vektordiagramm des Repulsionsmotors.

Anker mit seiner durch die Bürsten kurzgeschlossenen Wicklung zur Ständerwicklung wie die sekundären Windungen eines Transformators zu den primären, und es durchfließt die Ankerwicklung infolgedessen ein Kurzschlußstrom J_k . Zerlegt man das Hauptfeld Φ_1 in seine zwei Komponenten, eine in der Richtung der Bürsten $\Phi_1 \cdot \cos \alpha$

und eine senkrecht hierzu $\Phi_1 \cdot \sin \alpha$ (Fig. 84, $\alpha =$ Winkel zwischen Φ_1 und Bürstenstellung), so wird $\Phi_1 \cdot \cos \alpha$ durch das von der Ankerwicklung erzeugte Feld kompensiert, während $\Phi_1 \cdot \sin \alpha$ das eigentliche Magnetfeld bildet. Dreht sich der Anker, so wird durch $\Phi_1 \cdot \sin \alpha$ in der Magnetwicklung eine EMK. E_1 induziert, die gegenüber dem Felde und dem Strome J_1 , der phasengleich ist mit dem Felde, um 90° in der Phase nachhilt, ferner eine EMK. in der Ankerwicklung E_2 . Infolge der Bewegung des Ankers im Felde $\Phi_1 \cdot \sin \alpha$ wird weiter in der Ankerwicklung eine EMK. E_a induziert ähnlich wie bei einem Gleichstrommotor. E_a ist in der Größe abhängig von der Drehzahl, ändert sich aber mit dem Felde also mit J_1 , und ist somit in Phase mit J_1 . Die EMK. E_a hat einen Strom J_2 zur Folge, der mit zunehmender Drehzahl abnimmt und proportional der Belastung ist. Dieser Ankerstrom erzeugt ein Feld in der Bürstenrichtung, das seiner Größe nach der Belastung des Motors proportional ist.

Die Gl. (70) nimmt für den Repulsionsmotor die Form an:

$$\left. \begin{aligned} E_a &= 4,44 \cdot k \frac{p \cdot n}{60} N_2 \cdot \Phi_1 \cdot \sin \alpha \cdot 10^{-8} \text{ Volt,} \\ &= \text{const. } n \cdot \Phi_1 \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (77)$$

und daraus folgt die Drehzahl:

$$n = \frac{E_a}{\text{const. } \Phi_1 \cdot \sin \alpha} \quad (78)$$

Da Φ_1 mit zunehmender Belastung zunimmt, fällt nach Gl. (78) die Drehzahl. Ferner ist die Drehzahl abhängig von dem Winkel α , den die Bürsten mit der Richtung des Feldes

bilden. Im normalen Betriebe ist die Umdrehungszahl die synchrone, bei der die Läufergeschwindigkeit mit der Geschwindigkeit des Ständerdrehfeldes übereinstimmt.

Beim Anlauf stehen die Bürsten b_1, b_2 (Fig. 83) am weitesten aus der Polmitte entfernt; der Strom, der den durch die Verbindung der Bürsten geschaffenen Kurzschlußstromkreis durchfließt, und der, wie bereits gesagt, durch ruhende Induktion wie in der Sekundärwicklung eines Transformators erzeugt wird, ist um 180° in der Phase verschoben gegen den Wechselstrom, der in der induzierenden Wicklung fließt. Infolgedessen entsteht im Anker ein Drehmoment ähnlich wie bei einem Reihenschlußmotor, wenn bei letzterem die Bürsten aus der Polmitte verschoben sind. Dieses Drehmoment ist:

$$D = \text{const. } J_2 \cdot \Phi_1 \cdot \sin \alpha, \quad (79)$$

also ebenfalls abhängig von der Belastung, und es steigt mit abnehmender Drehzahl, weil dann J_2 zunimmt (Fig. 87). Da Ankerstrom und Feld in Phase miteinander sind, ist infolgedessen das Anzugsmoment ein kräftiges. Es beträgt ungefähr das 2,5fache des normalen Drehmomentes, wobei der Strom etwa auf das Doppelte des Vollaststromes ansteigt. Im Maximum kann D_A bis zum vierfachen Werte des Betriebsdrehmomentes gesteigert werden, wenn der dabei auftretende Stromstoß zulässig ist. Die charakteristischen Betriebsverhältnisse dieses Motors sind demnach die folgenden: Der Zusammenhang zwischen Drehzahl und Drehmoment ist ähnlich wie der beim Reihenschlußmotor, und der Verlauf der Drehzahlkurve gleicht ebenfalls demjenigen eines Gleichstrom-Hauptstrommotors. Die charakteristischen Kurven bei fester Bürstenstellung sind in Fig. 87 zusammengestellt und lassen alles Weitere erkennen. Der Wirkungsgrad und auch der Leistungsfaktor werden bei konstanter Bürstenstellung mit steigender Belastung besser. Auch dieser Motor geht bei vollständiger Entlastung durch, und er muß daher mittels Fliehkraftschalters oder -kurzschließers dagegen gesichert werden.

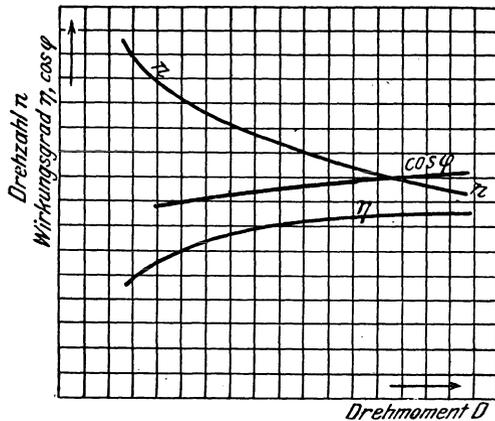


Fig. 87. Motordiagramm für den Repulsionsmotor.

17. Die Regelung des Repulsionsmotors.

a) Das Anlassen und die Regelung der Drehzahl erfolgt bei diesem Motor in einfachster Weise nach Gl. (78) durch Verstellen der

Bürsten, und zwar wird die Drehzahl kleiner, je mehr man die Bürsten aus der Polmitte verschiebt, je größer also der Winkel α in Fig. 83 wird.

Das Anlassen kann außerordentlich sanft und vollkommen stoßfrei geschehen, was z. B. bei den Ringspinnmaschinen, für deren Antrieb diese Motorgattung in erster Linie in Frage kommt, von ganz besonderer Bedeutung ist, weil beim gleichmäßigen Vorwärtsbewegen der Bürsten Stöße und Unregelmäßigkeiten im Drehmomente ausgeschlossen sind. Das Verschieben der Bürsten erfolgt in der Regel durch Verstellen eines Hebels oder eines Handrades am Motor (Fig. 91). Besondere Anlaß- und Regelapparate können hier also fortfallen, sofern ein bestimmter Regelbereich nicht überschritten wird. Die Anschaffungskosten sind infolgedessen außerordentlich gering, wengleich der Motor bei gleicher Leistung etwas schwerer ausfällt als der Reihenschlußmotor.

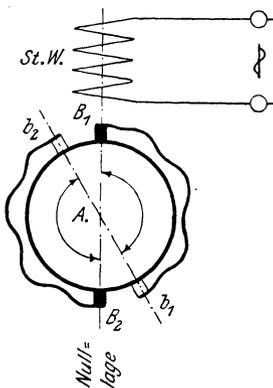


Fig. 88. Drehzahlregelung beim Repulsionsmotor durch zwei Bürstenpaare (Deri-schaltung).

Die Regelung der Drehzahl durch Bürstenverschiebung umfaßt bei konstant bleibendem Drehmomente eine Erhöhung von n um 10% und eine Verminderung um 50% gegenüber der synchronen Umdrehungszahl. Bei einem mit n abnehmenden Momente — also bei konstanter Leistung — ist der Regelbereich zumeist größer. Er liegt dann in den Grenzen zwischen 10% oberhalb und 75% unterhalb der synchronen Drehzahl. Soll die Änderung der Drehzahl in noch weiteren als diesen mittels der Bürstenverschiebung zu erreichenden Grenzen möglich sein, dann kann das wiederum durch Änderung der Klemmenspannung unter Benutzung eines Regeltransformators und Stufenschalters erfolgen. Die Umkehr der Drehrichtung geschieht durch Verstellen der Bürsten über die Polmitte hinaus in entgegengesetztem Sinne.

Eine besondere Ausführung des durch Bürstenverschiebung regelbaren Repulsionsmotors besteht darin, daß man den Bürstensenst in einen feststehenden und einen beweglichen unterteilt. Hierdurch kann eine sehr feine Einstellung einer gewünschten Umdrehungszahl erreicht werden. Diese Schaltung ist zuerst von Deri angegeben worden, und sie wird von der Brown, Boveri & Cie. A.-G. angewendet.

Die Fig. 88 zeigt das Stromlaufschema. Stehen die beweglichen Bürsten b_1, b_2 dicht bei den festen B_1, B_2 , so herrscht zwischen ihnen keine Spannung; es fließt also auch kein Strom im Anker. Das Feld, das vom Ständer her den Anker durchsetzt, dringt nicht in die unter den Bürsten kurzgeschlossenen Ankerwindungen, also sind auch diese spannungsfrei. Durch Verschieben der beweglichen Bürsten in die „Nullage“ wird der Motor demnach außer Betrieb gesetzt. Je weiter man die Bürsten nach der einen oder anderen Seite verschiebt, um so größerer Strom wird in der Ankerwicklung induziert. Das Drehmoment

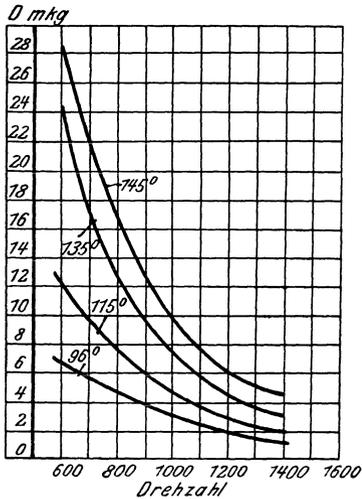


Fig. 89. Drehmoment beim Deri-Repulsionsmotor für verschiedene Bürstenstellungen.

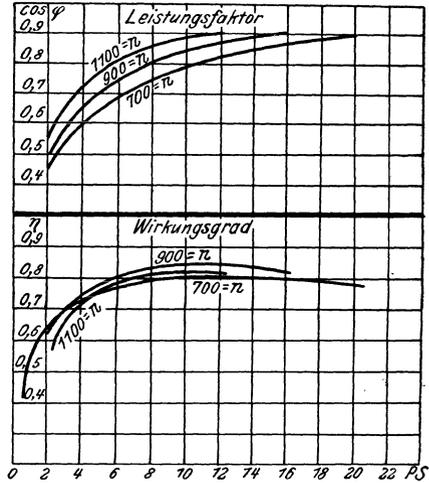


Fig. 90. Wirkungsgrad und Leistungsfaktor beim Deri-Repulsionsmotor für verschiedene Bürstenstellungen.

wächst mit der Bürstenverschiebung erst langsam, dann schnell, und erreicht seinen Höchstwert etwa bei einem Verschiebungswinkel von 160° , wenn eine Polteilung $= 180^\circ$ gesetzt wird. Den Verlauf des Drehmomentes für verschiedene

Bürstenstellungen zeigt die Fig. 89, und in Fig. 90 sind die Kurven für den Wirkungsgrad η_M und den Leistungsfaktor $\cos \varphi_M$ bei verschiedenen mit den Drehmomentkurven Fig. 89 übereinstimmenden Drehzahlen gezeichnet.

Im übrigen gleicht dieser Motor in den Betriebsverhältnissen dem einfachen Repulsionsmotor.

In Fig. 91 ist ein Brown, Boveri-Repulsionsmotor für Drehzahlregelung von Hand abgebildet.

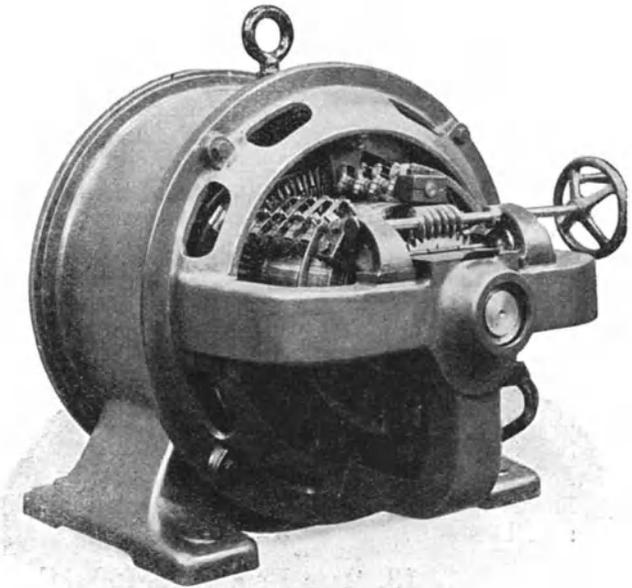


Fig. 91. Deri-Repulsionsmotor der Brown, Boveri & Cie. A.-G.

b) Der Doppel-Repulsionsmotor. Um den Repulsionsmotor auch im Anschluß an ein Drehstromnetz benutzen zu können, ohne daß nur eine Phase belastet und dadurch Unsymmetrie in das Dreiphasennetz gebracht wird, wenden Brown, Boveri & Cie. eine besondere Schaltung an. Sie kuppeln zwei Einphasen-Repulsionsmotoren und verbinden die beiden Ständer entweder unmittelbar oder über Einphasentransformatoren in der von Skott angegebenen Form (S. 256) mit dem Drehstromnetze. In Fig. 92 ist das Stromlaufschema mit

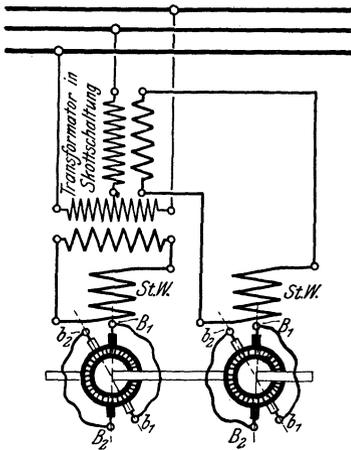


Fig. 92. Stromlaufschema des Doppel-Repulsionsmotors.

Benutzung von Transformatoren dargestellt. Wie im III. Abschnitte des näheren erläutert werden wird, kann nach der Skottschaltung ein Drehstromnetz dabei wohl symmetrisch belastet werden, und infolgedessen ist der Anschluß des Doppel-Repulsionsmotors an eine Dreiphasenanlage gleichbedeutend mit der Belastung durch einen Drehstrommotor.

Auf diese Weise ist gewissermaßen ein Drehstrom-Kollektormotor geschaffen, der nun gegenüber dem Asynchronmotor die Vorteile einfacher und verlustloser Drehzahlregelung, bequemer Umsteuerung, günstigeren Leistungsfaktors und Wirkungsgrades aufweist. Im Vergleich zu den reinen Drehstrom-Kommutatormotoren ist der Doppel-Repulsionsmotor insofern ungünstiger, als er etwas mehr Platz erfordert und sein Leistungsfaktor nicht über etwa 0,9 bis 0,92 beträgt, gegenüber $\cos \varphi_M = 1$ bzw. sogar Voreilung beim Drehstrommotor.

c) Die Apparate im äußeren Stromkreise sind unter den auf S. 83 bereits erwähnten Gesichtspunkten zu wählen. Obgleich der Repulsionsmotor durch die Bürstenverstellung zum Stillstande gebracht werden kann, ist dennoch ein Hauptausschalter zum Abtrennen vom Netze notwendig, da der Ständer im Stillstande einen großen Leerlaufstrom (bis ca. 40% des Vollaststromes) bei einer Phasenverschiebung von $\cos \varphi_M = 0,1$ bis 0,3 aufnimmt.

Das Anwendungsgebiet des Repulsionsmotors erstreckt sich auf den Antrieb von Zentrifugalpumpen, Ventilatoren, Hebezeugen, Schiebebühnen, Spinn- und Druckmaschinen und Aufzügen. Ist der Motor mit einem Zentrifugalkurzschließer ausgerüstet, dann kann man ihn auch zum Betriebe von Werkzeugmaschinen mit konstanter Drehzahl benutzen.

18. Der Repulsions-Induktionsmotor.

Die bisher besprochenen Einphasen-Kollektormotoren hatten alle einen dem Gleichstrom-Hauptstrommotor ähnlichen Verlauf der Dreh-

zahl bei Belastungsänderungen. Für eine ganze Reihe von Antrieben wird aber die Drehzahlcharakteristik des Gleichstrom - Nebenschlußmotors gefordert, und das läßt sich dieses beim Wechselstrommotor auf folgende Art erreichen: Vereinigt man den Repulsionsmotor mit einem Einphasen-Induktionsmotor, indem man drei um 120° voneinander getrennte Punkte der als Gleichstromwicklung ausgeführten Ankerwicklung zu Schleifringen führt, so vereinigt man in einer Maschine auch die Eigenschaften dieser beiden Motoren. Das bezieht sich sowohl auf das Drehmoment als auch auf die Drehzahl.

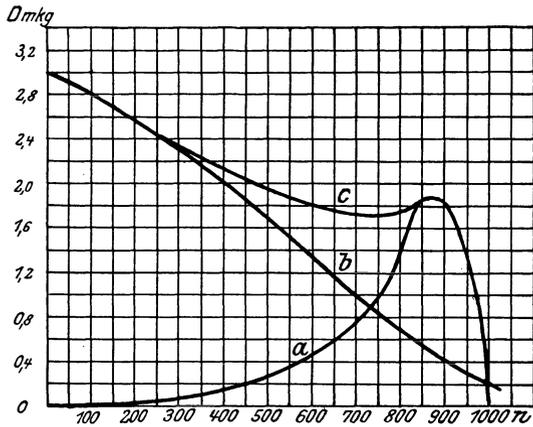


Fig. 93. Drehmomentkurve des Repulsions-Induktionsmotors (Kurve c).

Der Repulsionsmotor hat bei Stillstand das größte Drehmoment; dasselbe nimmt jedoch mit zunehmender Drehzahl ab (Kurve *b* in Fig. 93). Beim Induktionsmotor wächst mit der Drehzahl von Null bis zu einem Höchstwerte, um dann beim Synchronismus rasch abzufallen (Kurve *a* in Fig. 93). Man erhält also auf diese Weise während der ganzen Anlaufperiode ein sehr hohes Drehmoment, das etwa nach der Kurve *c* in Fig. 93 verläuft. Die Drehzahl bleibt nach Beendigung des Anlaufes bei allen Belastungen annähernd unverändert.

19. Die Regelung des Repulsions-Induktionsmotors.

Soll der Motor angelassen werden, so muß der mit den Schleifringen verbundene Anlasser *Anl.* im Schaltschema Fig. 94 zunächst geöffnet sein. Der durch das primäre Feld im Anker induzierte Strom J_2 nimmt seinen Verlauf durch den Kommutator und die kurzgeschlossenen Bürsten b_1, b_2 .

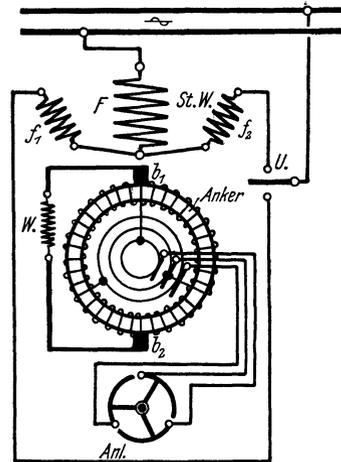


Fig. 94. Schaltungschema für den Repulsions-Induktionsmotor.

Mit ansteigender Drehzahl wird der Anlasser eingeschaltet und allmählich kurzgeschlossen. Dadurch wird J_2 durch die Schleifringe geleitet, und der

Kommutator also entlastet. Eine Funkenbildung während des Betriebes ist vollständig ausgeschlossen. Solange der Anlasser geöffnet ist, ist der Motor an keine feste Drehzahl gebunden, sondern er regelt sich selbsttätig nach der Drehzahlkurve Fig. 87 wie der Repulsionsmotor entsprechend der jeweiligen Belastung. Durch das Kurzschließen des Anlassers wird er jedoch auf eine bestimmte Drehzahl gebracht, die dann, wie bereits gesagt, unabhängig von der Belastung nahezu konstant bleibt.

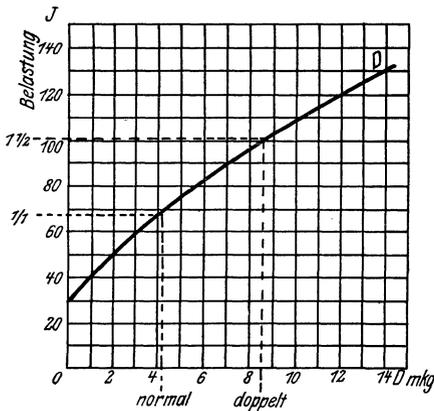


Fig. 95. Anlaufstromstärke des Repulsions-Induktionsmotors.

Die Umkehrung der Drehrichtung kann auch bei diesem Motor durch Änderung der gegenseitigen Stellung des Feldes und der Bürsten erfolgen. Diese Methode wird aber nur dann angewendet, wenn die Umsteuerung selten vorzunehmen ist. Soll der Motor betriebsmäßig in beiden Drehrichtungen laufen können, so erhält der Ständer wie beim Reihenschlußmotor eine Hauptwicklung F und außerdem zwei Hilfswicklungen f_1 und f_2 (Fig. 94), von denen mit Hilfe des Umschalters U immer nur eine mit der Hauptwicklung zusammen eingeschaltet wird. Jede dieser beiden Hilfswicklungen bestimmt auch hier eine Drehrichtung des Motors.

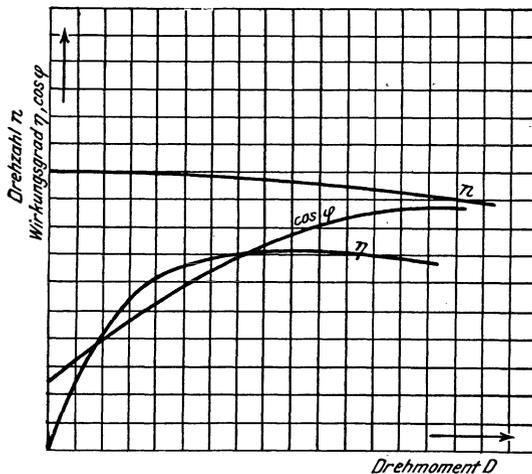


Fig. 96. Motordiagramm für den Repulsions-Induktionsmotor.

Wenn nur ein bestimmtes kleineres als das höchste Drehmoment zum Anfahren ausreicht, so verwendet man zur Verminderung des Stromstoßes beim Anlassen einen Widerstand W zwischen den Kollektorbürsten. Mit Hilfe dieses Widerstandes kann die Zugkraft geregelt bzw. so eingestellt werden, daß der Motor seine Belastung bei möglichst geringem Stromverbrauche durchzieht. In Fig. 95 ist die Beziehung zwischen Motorstrom und Drehmoment dargestellt. Man sieht, daß der Motor bereits das doppelte Drehmoment entwickelt bei einem

Strome, der etwa die 1,5fache Höhe des normalen erreicht. Man kann also solche Motoren auch an Beleuchtungsnetze anschließen, ohne befürchten zu müssen, daß das Anlassen unangenehme Spannungsschwankungen im Netze verursacht.

Es sei noch erwähnt, daß der Repulsionsmotor auch dadurch in einen Induktionsmotor umgeschaltet werden kann, daß die Ankerwicklung in drei Punkten durch einen Fliehkraftregler kurzgeschlossen wird, wenn der Motor sich seiner synchronen Drehzahl nähert.

Wenn für die Anlaufstromstärke besondere Bedingungen vorgeschrieben sind, kann auch der Repulsions-Induktionsmotor mittels eines Anlaßtransformators angelassen werden.

Eine Regelung der Umdrehungszahl ist beim Repulsions-Induktionsmotor allerdings nicht möglich, weil er betriebsmäßig d. h. nach dem Anlassen als Induktionsmotor arbeitet. Wird er durch eine äußere Kraft übersynchron angetrieben, so wirkt er als Stromerzeuger und kann auf diese Art gebremst werden.

Die charakteristischen Kurven sind in der Fig. 96 zusammengestellt und bedürfen keiner weiteren Erklärung.

20. Der kompensierte Wechselstrom-Reihenschlußmotor (Doppelschlußmotor).

Es soll schließlich noch der kompensierte Reihenschlußmotor oder auch Doppelschlußmotor behandelt werden, wie er zuerst von Latour und unabhängig davon von Winter und Eichberg angegeben worden ist und von der Allgemeinen Elektrizitäts-Ges. gebaut wird. Diese Motor-type ist im wesentlichen eine Vereinigung des Reihenschluß- und des Repulsionsmotors.

In Fig. 97 ist das Stromlaufschema nach Winter - Eichberg abgebildet.

Auf dem Kollektor sitzen zwei Bürstensätze b_1, b_2 und B_1, B_2 , deren Achsen (auf zwei Pole bezogen) aufeinander senkrecht stehen. Der erste Satz b_1, b_2 , dessen Achse mit der der Ständerwicklung $St.W.$ zusammenfällt, ist kurzgeschlossen und führt die eigentlichen Arbeitsströme, die durch das Hauptfeld Φ in der Richtung der Achse der Ständerwicklung induziert werden. Durch den zweiten Bürstensatz, der an der Sekundärwicklung eines in den Hauptstromkreis geschalteten Reihentransformators (Erreger- bzw. Regeltransformators) liegt,

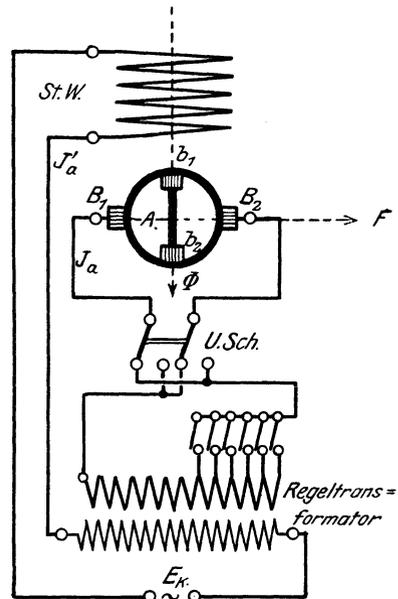


Fig. 97. Stromlaufschema des kompensierten Wechselstrom-Reihenschlußmotors (Winter-Eichberg Schaltung).

wird dem Anker A . Betriebsstrom zugeführt. Diese Ströme sind nur Magnetisierungsströme, die ein auf dem Hauptfelde Φ senkrecht stehendes Querfeld F — das eigentliche Erregerfeld — erzeugen. Durch den Kurzschluß von b_1, b_2 wird Φ kompensiert. Da F mit dem Ständerstrom J'_a in Phase ist, hat das Drehmoment seinen größten erreichbaren Wert.

Das Übersetzungsverhältnis des Erregertransformators ist z. B. durch Zu- oder Abschalten von Windungen regelbar.

Ist der Reihentransformator auf ein bestimmtes Übersetzungsverhältnis eingestellt, so verhält sich der Motor ganz ähnlich wie ein Gleichstrom-Hauptstrommotor, d. h. bei Stillstand haben Stromstärke und Drehmoment ihren größten Wert, und beide nehmen mit wachsender Umlaufzahl ab.

Dieses geht bei dem kompensierten Reihenschlußmotor auf folgende Weise vor sich: Einer bestimmten Gesamtstromstärke entspricht eine dem Übersetzungsverhältnisse $\frac{\text{primär}}{\text{sekundär}}$ proportionale Stromstärke im Erregerkreise und ein dieser Stromstärke annähernd proportionales Erregerfeld F . Durch die Drehung des Ankers in diesem Feld entsteht eine EMK. in dem durch die kurzgeschlossenen Bürsten b_1, b_2 hergestellten Stromkreise, welche der augenblicklichen Drehzahl proportional ist und der durch Induktion des Hauptfeldes Φ erzeugten EMK. entgegenwirkt. Die Differenz dieser beiden EMKe. bewirkt, daß im Kurzschlußkreise ein Strom fließt, dem ein dem Verhältnis der Windungszahlen des Reihentransformators angepaßter Strom im Stator entspricht. Dieser erzeugt, wie bereits erwähnt, in seinem Zusammenwirken mit dem Erregerfelde F das wirksame Drehmoment. Ist dieses Drehmoment größer als das verlangte Arbeitsdrehmoment, so tritt folgendes ein: Die Drehzahl des Motors nimmt zu, dadurch wächst auch die elektromotorische Gegenkraft. Der Strom im Kurzschlußkreise, der Gesamtstrom des Motors und dementsprechend auch Erregerstrom und Erregerfeld nehmen ab. Da Feld und Strom, die miteinander das Drehmoment erzeugen, beide abnehmen, wenn die Umlaufzahl wächst, so wird sich schließlich eine Umlaufzahl einstellen, bei der das erzeugte und das verlangte Drehmoment einander gleich sind. Unterstützt wird diese Wirkungsweise noch dadurch, daß durch die Drehung des Ankers im Hauptfelde eine EMK. erzeugt wird, welche der Selbstinduktion des Erregerstromkreises entgegenwirkt, d. h. die Impedanz des Erregerkreises sowie die zur Erzeugung des Erregerstromes notwendige EMK. nehmen mit wachsender Umlaufzahl ab. Es nimmt deshalb auch die scheinbare Impedanz des Reihentransformators ab, und von der Gesamtspannung entfällt mit wachsender Drehzahl ein größerer Teil auf den Ständer; deshalb steigt die im Kurzschlußkreise induzierte EMK., und die Umlaufzahl muß noch weiter steigen, um eine Gegenkraft zu erzeugen, die jener das Gleichgewicht hält.

Verringert man nun das Übersetzungsverhältnis des Reihentransformators, so hat dies in erster Linie zur Folge, daß die charakteristischen

Kurven des Motors verschoben werden und zwar in der Weise, daß dasselbe Drehmoment, welches früher bei einer bestimmten Umlaufzahl n_1 auftrat, jetzt erst bei einer Umlaufzahl n_2 (größer als n_1) auftritt. Der gleichen Drehzahl entspricht jetzt ein größeres Drehmoment als früher. Auch das Drehmoment bei Stillstand ist natürlich größer.

Der Grund dafür, daß bei größerer Sekundärwindungszahl des Reihentransformators die Charakteristik des Motors höher liegt, ist folgender: Der Erregerstrom ist, wie erwähnt, proportional dem Über-

setzungsverhältnisse $\frac{\text{primär}}{\text{sekundär}}$,

nimmt also bei gleicher Gesamtstromstärke mit wachsender Sekundärwindungszahl ab. Das Erregerfeld ist dementsprechend kleiner, und der Motor muß eine höhere Umlaufzahl annehmen, um die notwendige elektromotorische Gegenkraft zu erzeugen. Der gleichen Gesamtstromstärke entsprechen jetzt ein kleineres Drehmoment und eine größere Umlaufzahl als früher.

Die charakteristischen Kurven sind in Fig. 98 dargestellt und zwar für verschiedene Stufen des Erregertransformators.

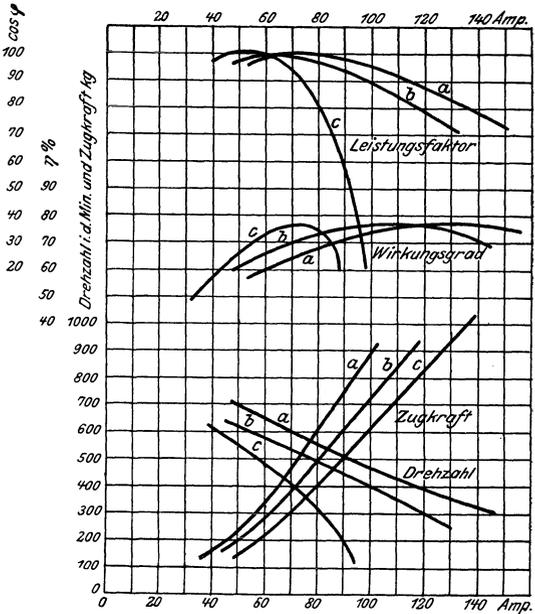


Fig. 98. Motordiagramm für den kompensierten Wechselstrom-Reihenschlußmotor (Winter-Eichberg-Schaltung).

21. Die Regelung des kompensierten Wechselstrom-Reihenschlußmotors.

Das Anlassen wird durch Änderung der Übersetzung des Regeltransformators bewirkt. Bei Stillstand ist der Stromkreis der Erregerbürsten B_1 , B_2 unterbrochen, und da die Primärwicklung des Reihentransformators als Drosselspule wirkt, wird der Motor nur von einem geringen Strom durchflossen. Es ist bei kurzzeitigen Betriebspausen also nicht notwendig, den Hauptschalter zu öffnen, wie das z. B. beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor der Fall sein muß (siehe S. 43). Das ist insbesondere dann angenehm, wenn der Motor über den Transformator mit Hochspannung betrieben wird.

Der Vorgang beim Anlauf gleicht demjenigen des Reihenschlußmotors. Zuerst wird der Ständer- und dann der Erregerkreis eingeschaltet. Der Motor beginnt, sich zu drehen, n nimmt zu und die Stromstärke ab. Nachdem die Umlaufzahl, die dem verlangten Drehmomente entspricht, überschritten ist, geht man auf die nächste Stufe des Regeltransformators über. Stromstärke und Drehmoment nehmen sofort zu, da, wie bereits gesagt, auf der zweiten Stufe derselben Umlaufzahl ein größeres Drehmoment entspricht als auf der ersten. Dann nimmt die Stromstärke wieder ab und die Drehzahl zu, und man geht auf die dritte Stufe über usf.

Verluste in Widerständen treten naturgemäß bei der Verwendung des Regeltransformators nicht auf.

Der Wechsel der Drehrichtung wird bei diesem Motor durch Umschalten der Stromrichtung des Erregerkreises mittels eines gewöhnlichen zweipoligen Niederspannungsumschalters *U.Sch.* vorgenommen (Fig. 97).

Die Regelung der Drehzahl kann, sofern sie notwendig wird, auf wirtschaftliche Art ebenfalls mittels des zu diesem Zwecke in der Wicklung zu unterteilenden Reihentransformators erfolgen. Anlassen, Regeln und Umsteuern geschieht bei dem kompensierten Reihenschlußmotor demnach nur im Niederspannungsstromkreise.

22. Der Drehstrom-Kollektormotor im allgemeinen.

Die vielen Regelungsarten des Drehstrom-Asynchronmotors weisen darauf hin, daß man besonders in neuerer Zeit bestrebt ist, diesen Motor auch in seiner möglichst verlustlosen Regelung der Drehzahl den Gleichstrommotoren gleichwertig zu gestalten und damit allen Wünschen des Betriebes völlig gerecht zu werden. Das hat seinen Grund darin, daß Drehstrom heute immer mehr den Gleichstrom verdrängt, weil die großen Stromerzeugungsanlagen vorwiegend Dreiphasen-Wechselstrom liefern. Die Furcht vor dem Kollektor, die viele Betriebsleiter bisher abgehalten hat, sei es Gleichstrom- oder auch Wechselstrom-Kollektormotoren zu verwenden, ist immer mehr geschwunden, seitdem man dahin gekommen ist, Kommutator und Bürsten nicht nur im Material, sondern auch in einem funkenfreien Arbeiten zu beherrschen. Aus diesem Grunde führen sich zurzeit die Kommutatormotoren auch mehr und mehr ein, da man ihre Vorzüge, insbesondere die verlustlose Regelung der Drehzahl, nunmehr erkannt und zu würdigen gelernt hat.

Schon kurz nach der Erfindung des asynchronen Drehstrommotors machte Görges¹⁾ darauf aufmerksam, daß eine Regelung der Umdrehungszahl dieses Motors durch Benutzung eines Kollektors in wirtschaftlicher Weise durchführbar wäre. Ende der neunziger Jahre wurden die ersten Patente auf einen solchen Drehstrom-Kollektormotor genommen, und man ist heute in der Ausbildung dieser Maschine so weit

¹⁾ E. T. Z. 1901, S. 699.

gekommen, daß ihrer brauchbaren und betriebssicheren Verwendung für den Arbeitsmaschinenantrieb nichts mehr im Wege steht. Der Strombezug aus großen, fremden Unternehmern gehörenden Drehstrom-Zentralstationen zwingt immer mehr dazu, die Verluste bei der Regelung der Drehstrommotoren besonders naturgemäß bei großen Leistungen zu vermeiden, da sie mit teurerem Gelde ohne Gewinn bezahlt werden müssen. Infolgedessen haben sich die großen Elektrizitätsfirmen gezwungen gesehen, den Drehstrom-Kollektormotor so durchzubilden, daß er seinem, dem Asynchronmotor gegenüber höheren Anschaffungspreise entsprechend mit voller Zuverlässigkeit arbeitet.

Es sind nun für diesen Kollektormotor ebenfalls zwei Ausführungsformen entstanden, deren Verschiedenheit in der Charakteristik für den normalen Drehzahlverlauf liegt; man unterscheidet daher wie bei den Gleichstrommotoren zwischen:

- 1) dem Drehstrom-Kommutatormotor mit Hauptstromcharakteristik;
- 2) dem Drehstrom-Kommutatormotor mit Nebenschlußcharakteristik.

Der erstere wird vornehmlich von den Siemens-Schuckert-Werken und der Maschinenfabrik Oerlikon und der zweite von der A. E. G. gebaut. Brown, Boveri & Cie. benutzen an Stelle eines besonderen Drehstrom-Kollektormotors den bereits auf S. 100 erwähnten Doppel-Repulsionsmotor.

Im allgemeinen besteht ein solcher Motor aus dem Gehäuse eines Asynchronmotors und einem dem Gleichstrommotor ähnlichen Anker, der mit einem Kollektor versehen ist. Je nach der Verbindung zwischen Ständer und Anker wird dem Motor die unter 1) oder 2) genannte Eigenschaft für den normalen Verlauf der Drehzahl und des Drehmomentes gegeben.

23. Der Drehstrom-Kollektormotor mit Hauptstromcharakteristik (Reihenschlußmotor) und seine Regelung.

Wie beim Gleichstrom-Hauptstrommotor liegen Ständer und Läufer in Reihe, sind also hintereinander geschaltet. Von einer theoretischen Erörterung der elektrischen Vorgänge muß leider abgesehen werden, da dieses zu weit führen würde. Es sei nur so viel erwähnt, daß bei normaler Drehzahl der Läufer mit dem Ständerdrehfelde synchron umläuft. Ferner besitzt der Motor einen sehr guten Leistungsfaktor bis $\cos \varphi_M = 1$, und er kann sogar für Phasenvoreilung gebaut werden.

Die Spannung, mit der der Motor betrieben werden kann, hängt zum Teile von seiner praktischen Ausführung, insbesondere von der Spannung für den Kommutator ab, die verhältnismäßig niedrig gewählt werden muß. Infolgedessen muß man einen Transformator dann verwenden, wenn ein Netz mit geringerer Spannung nicht zur Verfügung steht. Dieser Transformator kann nun in zweierlei Form mit dem Motor zusammengeschaltet werden. Entweder man legt ihn

vor den Ständer und transformiert dann die Motorspannung insgesamt, oder man legt ihn zwischen Ständer und Läufer und setzt dadurch nur die Läuferspannung herab. In den Fig. 99 und 100 sind diese beiden Schaltungen zur Darstellung gebracht. Da der Ständer ohne weiteres auch für Hochspannung

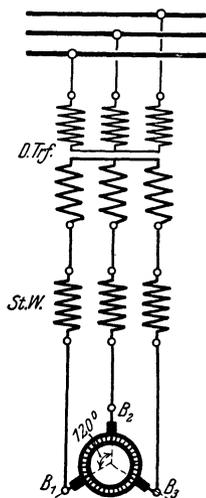


Fig. 99. Stromlaufschema des Drehstrom-Reihenschlußmotors (Transformator vor der Ständerwicklung).

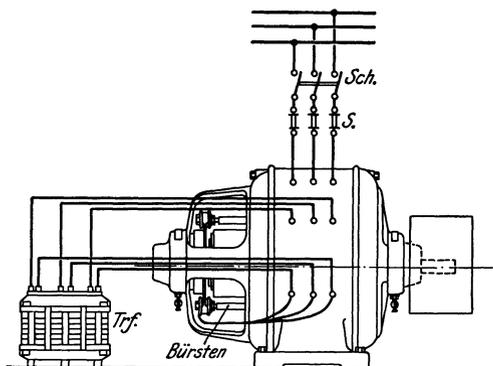


Fig. 100. Stromlaufschema des Drehstrom-Reihenschlußmotors (Transformator im Läuferstromkreise).

wie bei jedem Asynchronmotor gebaut werden kann, findet man die Schaltung des Transformators nach Fig. 100 häufiger. Die Maschinenfabrik Oerlikon verwendet als Reihentransformator bei Spannungen

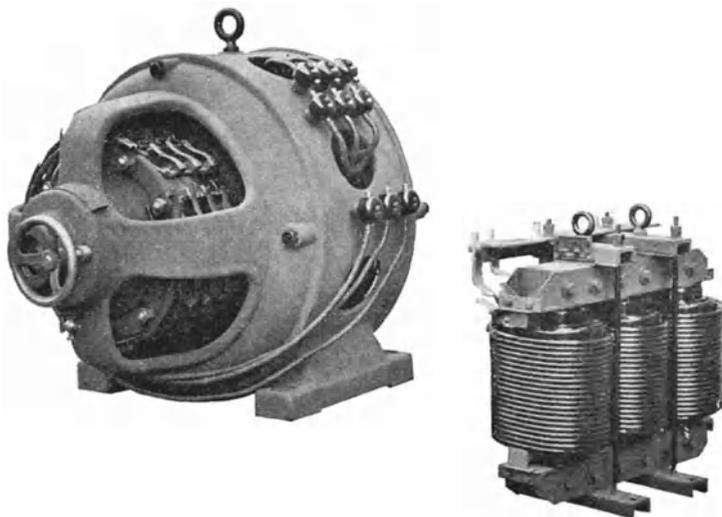


Fig. 101. Drehstrom-Reihenschlußmotor mit Transformator im Läuferstromkreise (Bauart Oerlikon).

unter 300 Volt Autotransformatoren (S. 260), bei höheren Spannungen normale Zweispulentransformatoren. Die Fig. 101 zeigt die praktische Ausführung eines Drehstromkollektormotors mit Transformator nach dem Stromlaufschema der Fig. 100. Die Verschlechterung des Wirkungsgrades durch die Benutzung des Transformators im allgemeinen ist so unbedeutend, daß sie praktisch kaum ins Gewicht fällt. Die Größe dieses Transformators hängt von der gewünschten Drehzahländerung ab, und sie beträgt ungefähr soviel Prozent der Motorleistung bei Synchronismus, als die maximale Abweichung der Geschwindigkeit von der synchronen Drehzahl in Prozenten dieser synchronen Geschwindigkeit beträgt. Als Autotransformator geschaltet wird dieser Transformator um so kleiner, je tiefer die Netzspannung ist, d. h. je mehr sich das Übersetzungsverhältnis dem Werte 1 nähert.

Die Drehzahlregelung des Drehstrom-Reihenschlußmotors erfolgt nun entweder durch Bürstenverstellung (Fig. 102) oder durch Änderung der Spannung (Fig. 103). Die erste dieser Formen ist die billigste und einfachste, weil man nur nötig hat, die Bürstenbrücke mit einem Hebel oder Handrade zu versehen, durch dessen Verstellung der Maschinist die Änderung von n herbeiführen kann. Es sind dann also keinerlei Regulierwiderstände notwendig. Da

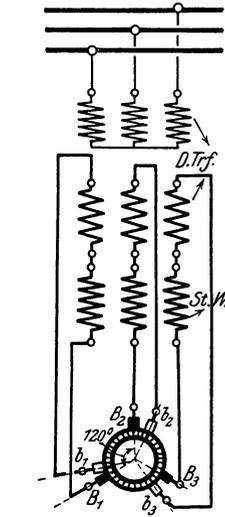


Fig. 102. Drehzahlregelung beim Drehstrom-Reihenschlußmotor durch Bürstenverstellung.

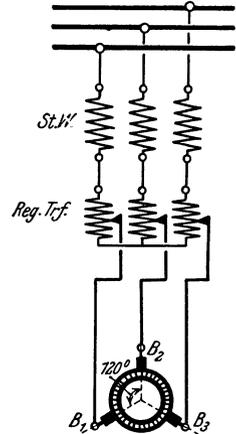


Fig. 103. Drehzahlregelung beim Drehstrom-Reihenschlußmotor durch Regeltransformator.

nun die Erregung der Felder beim Reihenschlußmotor dadurch erfolgt, daß eine Phasenverschiebung zwischen den Läufer- und Ständerströmen herbeigeführt und die Phasenverschiebung durch die Bürstenverstellung erreicht wird, so ändert sich bei dieser Regelungsart die Erregung, und aus diesem Grunde ist der Regelbereich beschränkt. Er beträgt im Maximum etwa 5%, und zwar sowohl nach unten als auch nach oben vom Synchronismus aus gerechnet. Um diesen Änderungsbereich der Drehzahl noch zu vergrößern, versehen die Siemens-Schuckert-Werke den Kollektor mit je zwei Bürstensätzen ähnlich dem Derimotor (Fig. 102), von denen der eine fest und der andere beweglich ist. Dadurch kann dann die Regelung zwischen Null und etwa 130% vorgenommen werden. Oerlikon benutzt für eine Regelung von 1 : 6 noch weiter die Polumschaltung (S. 76).

Die zweite Art der Drehzahländerung durch Änderung der Spannung erfordert einen besonderen Regeltransformator (*Reg.Trf.*) mit unterteilter Wicklung und einen Windungsschalter (Fig. 103). Dieser Transformator ist unter Umständen neben dem Haupttransformator noch besonders zu beschaffen und verteuert infolgedessen die Anlagekosten nicht unerheblich. Die Größe dieses Transformators richtet sich naturgemäß ebenfalls nach dem verlangten Regelbereich des Motors. In seiner Ausführung kann derselbe entweder als Stufentransformator (S. 266) oder als drehbarer Transformator (S. 271) gewählt werden. Die letztere Form gestattet eine allmähliche Regelung der Spannung und damit der Drehzahl.

Die Betriebseigenschaften des Drehstrom-Reihenschlußmotors gleichen denen des Gleichstrom-Hauptstrommotors vollkommen, d. h. die Drehzahl nimmt selbsttätig mit abnehmender Last zu, bis der Motor bei Entlastung durchgeht. Zur Verhütung dieses Durchgehens versieht man den Motor ebenfalls mit einem Zentrifugalschalter. Durch die Verwendung des Zwischentransformators zwischen Ständer und Läufer kann das Durchgehen des Motors verhindert werden, weil durch denselben die Höchstdrehzahl im Leerlauf begrenzt wird.

Das Anlassen erfolgt nur durch die Bürstenverstellung oder den Regeltransformator, so daß keine Anlaßwiderstände erforderlich sind. Dabei ist das Anzugsmoment bei normalem Strome groß.

Auch zur elektrischen Bremsung ist der Motor geeignet. Diese tritt ein, sobald die Bürsten beim laufenden Motor durch die Nullage hindurch verschoben werden. Sie nimmt an Stärke mit zunehmender Bürstenverschiebung zu. Der hierbei erzeugte elektrische Strom wird in das Netz zurückgeliefert. Da derselbe aber eine von der Netzfrequenz abweichende Periodenzahl hat, weil der Anker nicht synchron läuft, ist eine Nutzbremung nicht möglich, sondern es tritt durch den zurückgegebenen Strom nur eine Erwärmung der Zuführungsleitungen ein. Durch besondere Mittel läßt sich indessen auch eine Nutzbremung erreichen, doch wird von derselben infolge der verwickelten Schaltung, weil dabei die Selbsterregung des Motors vermieden werden muß, nur in den seltensten Fällen Gebrauch gemacht.

Die Änderung der Drehrichtung erfolgt wie beim Asynchronmotor durch den Wechsel zweier Anschlüsse z. B. mittels eines zweipoligen Umschalters (Fig. 50 u. 51) oder durch Änderung des Sinnes der Bürstenverschiebung.

Über die Verwendung des Drehstrom-Reihenschlußmotors ist noch folgendes zu sagen:

Dieser Motor wird an Stelle des gewöhnlichen Drehstrom-Asynchronmotors überall dort am Platze sein, wo eine verlustlose allmähliche und feinstufige Drehzahlregelung erforderlich ist, die nicht durch den Stufenmotor (S. 75) erfüllt werden kann. Der Motor ist am vorteilhaftesten ausgenutzt bei konstantem Drehmoment, wenn also die Leistung proportional mit der Drehzahl zunimmt. Die Hauptstrommotorcharakteristik wird in gewissen Fällen erwünscht sein. Wird auf

konstante Drehzahl ohne Nachregelung Wert gelegt, so eignet sich der Motor besonders dort, wo die Belastung selbst keine großen Schwankungen aufweist. Immerhin kann der Motor aber auch so gebaut werden, daß der Unterschied der Drehzahlen zwischen Vollast und Halb- last nicht sehr groß ist, und daß auch bei Leerlauf durch den bereits erwähnten Fliehkraftschalter keine für den Motor gefährliche Drehzahl auftritt. Wird aber eine konstante Umdrehungszahl bei veränderlichem Drehmomente gefordert, so kann die Regelung durch einen selbst- tätigen Regulator vorgenommen werden, der die Bürstenstellung be- einflußt. Als anzutreibende Maschinen kommen in Frage: Textil- maschinen, Papiermaschinen, Ventilatoren, Gebläse, Krane und Pumpen.

Der Wirkungsgrad des Drehstrom-Reihenschluß- motors ist im normalen Betriebe bei Vollast um ca. 3 bis 5% schlechter als der des Asyn- chronmotors. Da er ferner in der Anschaffung teurer aus- fällt, so ist er nur dort von vornherein am Platze, wo es im wesentlichen auf eine häu- fige und dauernde Drehzahl- regelung in weiten Grenzen ankommt, weil η_M bei geringe- ren Drehzahlen wesentlich besser ist als beim Asynchron- motor selbst dann, wenn letz- terer als Stufenmotor ausge- führt ist. Die Leistung, für die der Kollektormotor zur- zeit ausgeführt wird, ist be- schränkt und geht nicht über etwa 600 PS in einer Einheit.

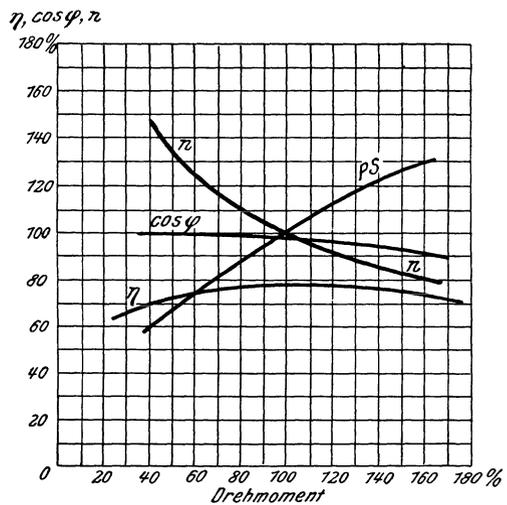


Fig. 104. Motordiagramm für den Drehstrom-Kollektormotor mit Hauptstromcharakteristik.

In Fig. 104 sind die charakteristischen Kurven eines Drehstrom-Kollektormotors der Siemens - Schuckert - Werke bei konstanter Spannung und normaler unveränderter Bürstenstellung abgebildet.

24. Der Drehstrom-Kollektormotor mit Nebenschlußcharakteristik (Nebenschlußmotor) und seine Regelung.

Dieser Kommutatormotor ist von Winter und Eichberg angegeben worden¹⁾ und besteht ebenfalls aus einem Ständer nach Art des Asynchronmotors, einem Läufer mit Gleichstromwicklung, Kommutator und Bürsten. Die Fig. 105 zeigt das allgemeine Stromlauf- schema. Der Ständer *St.W.* wird an das Netz angeschlossen. Im Anker

¹⁾ Siehe E. T. Z. 1910, und Z. Ver. deutsch. Ing. 1910, S. 1393; ferner E. K. B. 1911, Heft 10, S. 195.

wird ein Strom induziert, der durch die Kommutatorbürsten auf die Frequenz des vorhandenen Netzes und durch einen regelbaren Transformator *Reg.Trf.* auf die Spannung des Netzes umgeformt wird. Die bei der Regelung durch die Vergrößerung des Schlupfes freiwerdende Energie wird dann an das Netz wieder zurückgegeben. Die neueste Ausführung der A. E. G. ist gegenüber dem Schema Fig. 105 dahin geändert worden, daß der Regeltransformator in Form eines Autotransformators in die Statorwicklung verlegt ist, die Statorwicklung

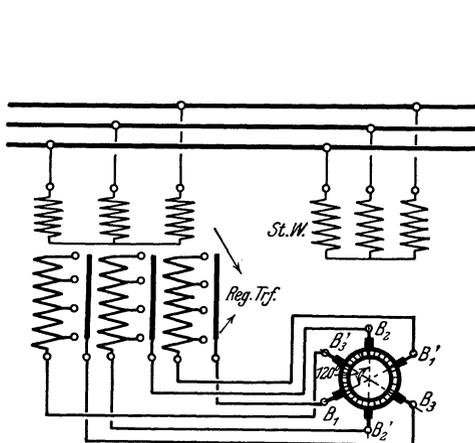


Fig. 105. Stromlaufschema des Drehstrom-Kollektormotors mit Nebenschlußcharakteristik.

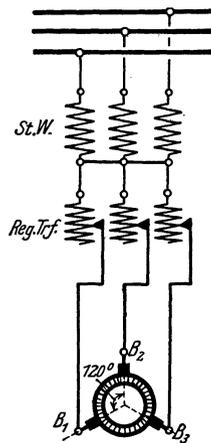


Fig. 106. Drehzahlregelung beim Drehstrom-Kollektormotor durch Autotransformator.

also mit einer Anzahl von Anzapfungen versehen wird, und die Regelung durch einen Windungsschalter erfolgt (Fig. 106).

Der Unterschied dieses Motors gegenüber dem Reihenschlußmotor liegt nun darin, daß derselbe wie der Gleichstrom-Nebenschlußmotor eine gewünschte Drehzahl einzustellen gestattet und diese Umdrehungszahl dann bei allen Belastungsänderungen annähernd konstant beibehält. Als Verwendungsgebiet kommt daher für diesen Motor vornehmlich der Antrieb von Werkzeugmaschinen in Frage.

Auch dieser Motor läuft normal im Synchronismus und gestattet ebenfalls einen übersynchronen Betrieb, indessen kann das letztere nur durch Umschaltung oder durch Benutzung anderer Wicklungsteile geschehen, worauf aber nicht mehr näher eingegangen werden soll.

II. Abschnitt.

Die Umformer.

25. Der Zweck der Umformung und die Einteilung der Umformer

Die heutige vielseitige Anwendung des elektrischen Stromes auf allen Gebieten des privaten und öffentlichen Lebens, der Klein- und Großindustrie usw. zwingt dazu, statt kleiner Einzelstationen große Stromerzeugungsanlagen zu errichten und für den Bau dieser Plätze zu wählen, die in erster Linie für die Stromerzeugung selbst die günstigsten Bedingungen aufweisen. Als solche sind zu nennen: gutes und preiswertes Baugelände, leichte Erweiterungsfähigkeit des Kraftwerkes, bei Dampfmaschinen- und Verbrennungsmotorenbetrieb gute Wasser- verhältnisse, billigste und bequeme Zuführung von Kohlen und anderem Betriebsmaterial, leichte und bequeme Beschaffung von Reservematerial bei größeren Reparaturen usw., um die geringsten Selbsterzeugungskosten für die elektrische Energie zu erhalten und dadurch billige Strompreise für die Abnehmer stellen zu können. Auch für die Verwertung der bis vor kurzer Zeit noch unbenutzten mächtigen Wasserkräfte sind heute die Möglichkeiten durch die dauernd zunehmende Verwendung der Elektrizität in der chemischen Industrie, für die Landwirtschaft und für die Elektrisierung der Staatseisenbahnen in reichem Maße gegeben. Allen diesen Ansprüchen kann wirtschaftlich und mit den notwendigen billigsten Preisen für die nutzbar verwendete Kilowattstunde (KW-Std.) nur entsprochen werden, wenn an Stelle des Gleichstromes der hochgespannte Wechselstrom tritt, und zwar weil bei der Wahl der letzteren Stromart das Kraftwerk seiner Lage nach unabhängig vom Konsumgebiete an einer solchen Stelle gebaut werden kann, an der die obengenannten günstigen Bedingungen erfüllt sind. Spannungen bis 60 000 Volt sind keine Seltenheit mehr, und nach vielen und kostspieligen Versuchen ist es den großen Elektrizitätsfirmen Deutschlands und Amerikas gelungen, mit der Übertragungsspannung neuerdings bis auf 100 000 Volt heraufzugehen. Infolgedessen ist heute jede Entfernung zwischen dem Kraftwerke und der Abnahmestelle überbrückbar, ohne daß die Menge des Materials für die Leitungen und der Verlust in diesen durch die Wahl genügend hoher Spannung die wirtschaftliche Grenze übersteigen.

Aus solchen wirtschaftlichen und insbesondere auch aus betriebstechnischen Gründen kommt für diese Zwecke der elektrische Kraftübertragung fast ausschließlich der Dreiphasenstrom (Drehstrom) zur Anwendung, und nur für Bahnbetriebe wird mit Rücksicht auf eine einfachere Anlage und Unterhaltung der Fahrdrähte Einphasenstrom benutzt.

Die Stromerzeugung in einzelnen großen Kraftwerken vorzunehmen, hat weiter die bedeutenden Vorteile, daß die Kosten für die Anlage auf das wirtschaftlich günstigste Maß herabgedrückt werden können, an Bedienung, Reservemaschinen usw. gespart und der Betrieb selbst so geführt werden kann, wie er dem jeweiligen Stande der Belastung entsprechen soll. Das erhöht wiederum den Wirkungsgrad bzw. den Ausnutzungsfaktor der Gesamtanlage. Es ist ohne große rechnerische Begründung leicht einzusehen, daß die gleiche elektrische Energie von etwa 10 000 PS einmal erzeugt in 10 kleinen in ihrer Leistungs- und Erweiterungsfähigkeit beschränkten Werken, das andere Mal in einem einzigen Kraftwerke im ersteren Falle ganz bedeutend teurer sein muß als im letztgenannten, weil die Aufsicht und Bedienung, die Beschaffung von Reserven u. dgl. und besonders auch die Gebäude unvergleichlich viel höhere Kosten verursachen müssen, als für das eine große Kraftwerk. Dazu kommt ferner, daß der Wirkungsgrad größerer Maschinen wesentlich günstiger ist als der kleinerer, und daß zu Zeiten geringerer Stromabnahme im großen Kraftwerke durch zweckmäßige Unterteilung der einzelnen Maschinensätze der Wirkungsgrad der Stromabgabe an sich günstiger gestaltet werden kann, als das für jedes der zehn Einzelwerke möglich ist.

Diese großen Vorzüge der zentralisierten Stromerzeugung, die ausführlicher im II. Bande zur Besprechung kommen, werden immer mehr erkannt und gewürdigt, und es gehen daher neuerdings viele Städte, insbesondere kleiner und mittlerer Ausdehnung, Industrien usw. dazu über, ihre eigenen Anlagen stillzusetzen, sie nur als äußerste Reserven zu verwenden und ihren Strom von derartigen großen Überlandzentralen zu beziehen. Für solche Betriebe, die mit Gleichstrom arbeiten, muß dann der hochgespannte Drehstrom in Gleichstrom umgeformt werden.

Auch dann, wenn in großen Städten die vorhandenen Gleichstrom-Erzeugungsanlagen, die bei ihrer seinerzeitigen Errichtung an damals günstigen Plätzen erbaut wurden, nicht mehr ausreichen, muß man in der Regel dazu übergehen, die Erweiterungsbauten aus der Stadt heraus zu legen und mit hochgespanntem Drehstrom und Umformern zu arbeiten. Der Preis für die Grundstücke innerhalb des Weichbildes der Stadt ist zumeist so außerordentlich hoch und die Beschaffung von Kohle und Wasser, die Abfuhr der Asche u. dgl. mit so großen Schwierigkeiten verbunden, daß schon allein diese Umstände dazu zwingen, die Erweiterungen der Stromerzeugungsanlagen an vorhandene Wasserstraßen, an das Netz der Gütereisenbahngleise oder an sonst günstig gelegene Punkte vor die Stadt oder in die Vororte zu verlegen. Weitere

Gründe für eine solche Maßnahme sind noch die Rauch- und Rußplage und das Geräusch der laufenden Maschinen, die durch kostspielige Mittel wohl zum Teil behoben werden können, oftmals aber auch unliebsame Auseinandersetzungen zwischen Anlieger und Verwaltung des Kraftwerkes zur Folge haben. Da bei der Verlegung des Werkes nach außerhalb dann zumeist beträchtliche Entfernungen bis zu dem alten Kraftwerke, mit dem das neue Werk zusammenarbeiten muß, um in beiden Anlagen eine gegenseitige Reserve gegen Betriebsstörungen usw. zu besitzen, oder bis zu den Hauptspeisepunkten im Innern der Stadt zu überbrücken sind, fällt als Stromart Gleichstrom von vornherein aus, weil die Spannung zu hoch für die Übertragung größerer Energiemengen gewählt werden und dann doch eine Herabsetzung auf die Gebrauchsspannung von 220 oder 440, im Maximum 500 Volt erfolgen müßte. Neben diesem Nachteile in der Spannung sind aber noch weitere ebenso ins Gewicht fallende vorhanden und zwar: der große Energieverlust, die starken Querschnitte für die Übertragungsleitungen, also der große Aufwand von teurem Material bei großen Energiemengen und die beschränkte Ausdehnungsfähigkeit in der Energieverteilung. Alles dieses zwingt notgedrungen dazu, den durch die einfachen Transformatoren auf jede gewünschte Spannungshöhe zu bringenden Drehstrom zu benutzen und denselben dann durch rotierende Umformer in Gleichstrom der verlangten Gebrauchsspannung umzuformen. Der Wirkungsgrad einer solchen Kraftübertragung muß naturgemäß günstiger sein als derjenige mit Gleichstrom, wenn sie zur Ausführung kommen soll; dabei sei kurz erwähnt, daß nicht nur die Umformer selbst, sondern auch die Transformatoren und Drehstromgeneratoren heute mit sehr hohem Wirkungsgrade gebaut werden können.

Wann nun solche Umformeranlagen statt der direkten Übertragung derselben Stromart, also z. B. Gleichstrom, zu wählen sind, hängt so sehr von den jeweils vorliegenden Verhältnissen ab, daß allgemein gültige Regeln nicht aufgestellt werden können. Der projektierende Ingenieur muß daher vor der Entscheidung dieser Frage durch eine sorgfältige Rechnung und Bewertung aller Punkte prüfen, in welcher Form die Anlage zur Ausführung zu bringen ist. Die Rechnung hat sich zu erstrecken auf die Ermittlung: des Anlagekapitals (Grundstücke, Gebäude, Maschinen, Apparate, Schaltanlage, Leitungen einschließlich Montage, Materialanfuhr und Bauausführung) und des Gesamtwirkungsgrades bei Vollast und Teilbelastungen; ferner sind festzustellen: die jährlichen Ausgaben für Verzinsung, Amortisation und Abschreibung, für Gehälter und Löhne, die Kosten für die Beschaffung der Betriebsmaterialien und die sonstigen Ausgaben für die Betriebsführung. Aus diesen Unterlagen sind die Selbsterzeugungskosten für die KW-Stunde bzw. der Preis für die nutzbar abgegebene elektrische Energie zu ermitteln. Durch den Vergleich dieser Kosten bei verschiedenen Ausführungen — z. B. direkte Gleichstromübertragung, Drehstrom-Hochspannungsanlage mit Kabel oder Freileitung — ergibt sich dann die

zweckmäßigste Form, die aber noch auf die möglichst vollständige Erfüllung der auf S. 113 genannten allgemeinen Bedingungen zu prüfen ist.

Auch für große industrielle Unternehmungen, die z. B. eigene Gleichstromanlagen besitzen, wird bei größeren Erweiterungen der motorischen Anlagen zum Betriebe von Arbeitsmaschinen, Transmissionen usw. sorgfältigst durch Rechnung festzustellen sein, ob neue Gleichstromgeneratoren oder Drehstrommaschinen mit oder ohne Umformer zu installieren sind. Das letztere richtet sich nach den für den Antrieb der Arbeitsmaschinen zu wählenden Motoren (Gleichstrom-Drehstrom, dauernde oder vorübergehende Regelung der Drehzahl, Anzugsmomente usw.), der Entfernung zwischen Maschinenanlage und Arbeitsplätzen und der Höhe der einzelnen Leistungen, wobei große Leistungen zumeist Hochspannung und also dann in der Regel Drehstrom notwendig machen werden.

Um in solchen Anlagen die vorhandenen Gleichstrommaschinen wiederum ganz oder teilweise für die Drehstromgeneratoren als Reserve benutzen zu können, müssen ebenfalls Umformer aufgestellt werden.

Solche Umformer werden nun verschiedenartig gebaut und zwar entweder bestehend aus einem Motor und einem Generator, oder als sog. Einanker- oder Kaskadenumformer, die alle verschiedene Betriebs-eigenschaften besitzen und Unterschiede aufweisen im Wirkungsgrade, in der Raumbeanspruchung und in der Verwendungsmöglichkeit und deshalb gewissermaßen je ihr vorteilhaftestes Anwendungsgebiet besitzen.

Um eine einheitliche Bezeichnung der einzelnen Umformergattungen zu erreichen, hat der Verband Deutscher Elektrotechniker (V. D. E.) die Umformer je nach ihrer mechanischen Ausführung in zwei besondere Klassen eingeteilt¹⁾ und zwar wie folgt:

a) als Motorgenerator ist eine Doppelmaschine zu bezeichnen bestehend in der direkten mechanischen Kuppelung eines Motors mit einem Generator;

b) als Umformer ist eine Maschine zu bezeichnen, bei welcher die Umformung des Stromes in einem gemeinsamen Anker stattfindet.

Unter Zugrundelegung dieser Charakterisierung wird die Umformung d. h. also die Umwandlung einer Stromart (z. B. Drehstrom) in eine andere (z. B. Gleichstrom) oder umgekehrt im folgenden behandelt werden. Nicht aber fällt unter diesen Abschnitt auch die Umwandlung einer gegebenen Spannung z. B. bei Gleichstrom in eine andere Spannung der gleichen Stromart, die man kurz mit Transformierung bezeichnet, und die im III. Abschnitt besprochen wird.

¹⁾ Normalien für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren des V. D. E.

D. Der Motorgenerator.

26. Der Motorgenerator im allgemeinen.

Der Motorgenerator besteht entsprechend seiner Bezeichnung aus zwei Maschinen, einem Motor und einem Generator, die elektrisch vollkommen unabhängig von einander sind. Der Motor wird mit der umzuformenden Stromart und Spannung oder, falls letztere auf der Wechselstromseite bei der verlangten Leistung für das Motormodell zu hoch ist, unter Zwischenschaltung eines Transformators betrieben, und der Generator gibt die geforderte Stromart und Spannung ab.

Die Form des Antriebes zwischen beiden Maschinen kann auf zwei mechanisch grundsätzlich verschiedene Arten vorgenommen werden und zwar entweder mittels Riemen, Seilen, Ketten usw. oder dadurch, daß die Welle des Motors mit der des Generators unmittelbar gekuppelt wird, bzw. die Anker beider Maschinen auf einer Welle zusammengebaut werden.

Der Riemen- oder Seilantrieb des Generators ist mit Rücksicht auf die beiden Maschinen des Umformers selbst das billigste Mittel, weil dieselben dabei in ihren Drehzahlen nur durch die Riemen- bzw. Seilgeschwindigkeit beschränkt sind, und die Drehzahlen demnach so hoch gewählt werden können, als es die fabrikationsmäßig normalen Modelle für die verlangten Leistungen zulassen. Bekanntlich fallen die elektrischen Maschinen mit wachsender Umdrehungszahl nicht unerheblich im Preise abgesehen von Turbogeneratoren, die aber für Riemenbetrieb mit Rücksicht auf die Riemengeschwindigkeit überhaupt nicht in Frage kommen.

Weiter hat die Riemen- und Seilübertragung den Vorteil der Elastizität zwischen Generator und Motor, die dann unter Umständen besonders erwünscht ist, wenn der Generator plötzlichen starken und stoßweise auftretenden Überlastungen ausgesetzt ist. Die Stromstöße werden durch den in solchen Fällen auf den Riemenscheiben etwas schlüpfenden Riemen für den Motor gedämpft¹⁾, übertragen sich infolgedessen auch nicht in gleicher Stärke auf das Kraftwerk. Das ist in solchen Fällen vorteilhaft, wenn die Stromerzeugungsstation im Vergleich zur Leistung des Umformers klein ist und gleichzeitig Energie für Beleuchtungszwecke liefert. Zur Vermeidung von Schwankungen im Licht sind dann unter Umständen automatische Spannungsregler, Schwungmassen u. dgl. für die Maschinen im Kraftwerke einzubauen. Andererseits hat die Riemenverbindung aber die Nachteile, daß der Gesamtwirkungsgrad des ganzen Aggregates infolge des Gleitens des Riemens auf den Scheiben und des damit verbundenen Arbeits- und

¹⁾ Dasselbe gilt auch für Seilübertragung. Der Kettenantrieb ist nicht weiter erläutert, weil derselbe heute keine praktische Bedeutung mehr für die hier zu betrachtenden Fälle hat.

Geschwindigkeitsverlustes, sowie durch die Steifigkeit der Übertragungsorgane namentlich bei Neuanlagen schlechter wird als bei direkter Kupplung. Dieser Verlust beträgt:

bei neuen Riemen	etwa	2%
„ eingelaufenen Riemen.	„	1%
„ Hanfseilen	„	1/2%

Ferner ist die Raumerfordernis für den Maschinensatz recht bedeutend, wenn man ohne Riemenspannrollen (Lenixgetriebe), die wohl einen kürzeren Riemen zulassen, aber dann auch wiederum den Wirkungsgrad verschlechtern, einen zufriedenstellenden Betrieb erreichen will. Im allgemeinen soll die Wellenentfernung zwischen beiden Maschinen für schmale Riemen (bis 10 cm Breite) ca. 5 m, für breitere ca. 10 m betragen. Die Frage der Platzbeschaffung ist aber gerade bei Umformerwerken oftmals eine besonders schwierige (z. B. in Städten). Es muß daher vor der endgültigen Projektbearbeitung eines Umformerwerkes stets untersucht werden, ob diese Form des Antriebes unter Berücksichtigung der Grunderwerbs- und Gebäudekosten sowie des Wirkungsgrades bzw. der Jahreskosten für die am Motor aufzuwendenden Kilowattstunden — der Verlust gerechnet als Zinssumme eines entsprechenden Anlagekapitales für den oder die Maschinensätze — die billigste ist. Oftmals wird es vorteilhafter sein, die Kupplung bzw. den unmittelbaren Zusammenbau zwischen Motor und Generator vorzuziehen, wenn der Motorgenerator nach seinen Arbeitsverhältnissen überhaupt am Platze ist. Dasselbe gilt naturgemäß auch für den Seiltrieb¹⁾.

Die Wahl der Drehzahlen der beiden Maschinen ist, wie bereits oben angedeutet, von der Geschwindigkeit des Übertragungsorganes abhängig, die betriebstechnisch günstig in den Grenzen von etwa 3 m/sec bis maximal 25 m/sec liegt. Höher zu gehen, hat sich in der Praxis nicht bewährt, weil eine einwandfreie Kraftübertragung nicht mehr mit Sicherheit gewährleistet werden kann, und andererseits die Abnutzung der Riemen und Seile die wirtschaftliche Grenze überschreitet.

Der Riemenantrieb kommt ferner nur für Maschinen kleinerer Leistung etwa bis 100 PS zur Anwendung, weil darüber hinaus die Riemen und Seile sehr kostspielig sind (Doppelriemen, große Anzahl parallel arbeitender Seile) und besonders starke Fundamentierungen notwendig werden.

Die Kupplung der beiden Maschinen ist bei Motorgeneratoren die bei weitem am häufigsten benutzte Form; sie kann auf drei verschiedene Arten vorgenommen werden und zwar:

- 1) durch die Kupplung zweier normaler zweilagriger Maschinen,
- 2) in Dreilager-Ausführung,
- 3) in Zweilager-Ausführung.

¹⁾ Über die Berechnung der Riemen-, Seil- und Kettenantriebe siehe Hütte: Teil I.

Die Kupplung zweier normaler zweilagriger Maschinen (Fig. 107) bietet den Vorteil, daß zwei Maschinen normaler Fabrikation, aber naturgemäß gleicher Drehzahlen ohne besondere konstruktive Änderungen verwendet werden können. Dadurch wird der Preis eines solchen Maschinensatzes wesentlich herabgesetzt. Sind die Lagermitten der beiden Maschinen verschieden hoch, so kann der Unterschied, ohne das Aussehen des Maschinensatzes zu beeinträchtigen, durch das Fundament ausgeglichen werden. Eine gemeinsame gußeiserne Grundplatte wird das Bild nur wenig verschöner, kann aber unter Umständen recht bedeutende Mehrkosten verursachen, ohne damit einen besonderen Vorteil etwa durch bessere Wellenlagerung zu verbinden selbstverständlich unter der Voraussetzung, daß die Fundamente sorgfältig ausgeführt sind. Die Kupplung zwischen den beiden Maschinen kann durch einfache Verschraubung der beiden mit Kuppelflanschen versehenen Wellenenden vorgenommen werden (starre Kupplung), oder besser wählt man eine besondere sog. elastische Kupplung und kann durch dieselbe dann ebenfalls bis zu einem gewissen Grade Dämpfung von Stößen, die auf den Generator kommen, für den Motor erreichen.

Dem genannten Vorteile der Benutzung normaler Maschinenmodelle stehen Nachteile gegenüber, die einmal in den vier Lagern liegen, wodurch ein vierfacher Reibungsverlust vorhanden ist, der naturgemäß wiederum den Gesamtwirkungsgrad des Aggregates verschlechtert, und ferner in der Baulänge also der Raumbeanspruchung. Es ist daher, um unnötige Arbeit zu vermeiden, auch hier stets von vornherein überschlägig zu untersuchen, ob die Baulänge nicht zu groß ist, der Maschinensatz in dieser Ausführung also auf einem zur Verfügung stehenden Raume überhaupt untergebracht werden kann z. B. bei Erweiterung bestehender Anlagen, bei denen eine Vergrößerung des Maschinensaales nicht mehr oder nur mit großen Kosten möglich ist.

In Fig. 140 ist die Umformerstation des Elektrizitätswerkes Zürich abgebildet, die von Oerlikon gebaut worden ist, und bei der Vierlagermaschinenätze zur Aufstellung gekommen sind.

Sind die Stromerzeugungskosten im eigenen Betriebe hoch z. B. bei Dampfmaschinenbetrieb mit ungünstigen Kohlenbeschaffungsverhältnissen, oder soll der Umformer an eine fremde elektrische Kraftübertragungsanlage (Überlandzentrale od. dgl.) angeschlossen werden, dann muß natürlich auf den besten Wirkungsgrad gesehen und infolgedessen zu der Dreilager- bzw. der Zweilager-Ausführung übergegangen werden. Eine dieser letzten Bauarten ist ferner besonders dort, wo die Betriebsverhältnisse den Vergleich zwischen Motorgenerator und dem später zu besprechenden Einanker- und Kaskadenumformer möglich machen, zu wählen.

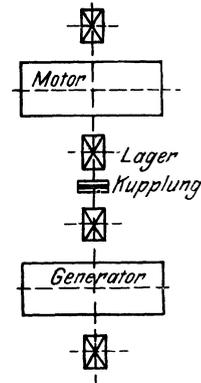


Fig. 107.

Die Dreilager-Ausführung kann entweder in der Weise getroffen werden, daß jede Maschine ihre eigene Welle mit Kupplungsflansch erhält, und letztere verschraubt werden (Fig. 108), oder daß man eine durchgehende Welle (Fig. 109) benutzt. Letzteres wird aus Gründen der Fabrikation seltener ausgeführt und ist auch im Betriebe bei Instand-

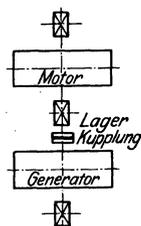


Fig. 108.

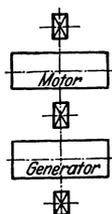


Fig. 109.

setzungen z. B. an dem Anker einer Maschine, wenn derselbe gegebenenfalls von der Welle abgezogen werden muß, zeitraubend und umständlich. Außerdem muß bei dieser Ausführung die Lagerung der Welle eine ganz vorzügliche sein, da anderenfalls Betriebsstörungen durch Lagererwärmung nicht zu vermeiden sind. Diesen Übelständen ist die Kupplung der beiden Wellen, die natürlich dann nur die Form einer starren Flansch-

kupplung haben darf, weil eine elastische Kupplung stets zwischen zwei Lagern liegen muß, nicht unterworfen. Die drei Lager müssen in beiden Fällen, um Lagenänderungen der Wellenmitten auszuschließen, auf einer gemeinsamen Grundplatte aufgebaut sein. Die Vorzüge dieser Ausführung liegen naturgemäß in dem Fortfall eines Lagers und der wesentlich geringeren Baulänge.

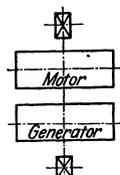


Fig. 110.

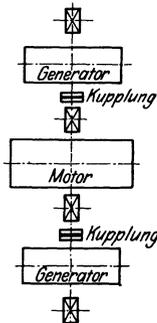


Fig. 111.

Bei der Zweilager-Ausführung (Fig. 110) sind schließlich die Anker beider Maschinen auf einer gemeinsamen Welle aufgezogen, und der Zwischenraum zwischen den beiden Gehäusen kann durch Blech verkleidet werden, so daß das Aggregat gewissermaßen das Aussehen nur einer Maschine erhält. Es ist dieses die günstigste Ausführung sowohl in bezug auf den Wirkungsgrad, der nicht nur durch die verminderte Lagerreibung, sondern auch durch die Verringerung der Verluste durch Luftreibung verbessert wird, als auch in bezug auf die Baulänge.

Die Beschränkung in der Zahl der Lager ist ferner dort zu empfehlen, wo z. B. bei einem Drehstrom-Gleichstrom-Motorgenerator die Gleichstromleistung bei großer Stromstärke und niedriger Spannung auf zwei Maschinen verteilt werden muß. Es kommt dafür in der Regel ein Vierlagermaschinensatz zur Aufstellung. Um die Betriebsbereitschaft eines solchen Aggregates auch dann noch wenigstens teilweise zu ermöglichen, wenn eine Gleichstrommaschine defekt wird, sind die Gleichstromgeneratoren zu beiden Seiten des Motors anzuordnen und mit getrennten Flanschwellen zu versehen (Fig. 111), damit die defekte Maschine leicht und schnell abgekuppelt werden kann. Diese Ausführung ist teurer, als wenn für alle drei Maschinen eine durchgehende Welle benutzt wird, und sie wird nur dort vorteilhaft sein, wo eine

vollständige Unterbrechung in der Stromlieferung nicht eintreten darf. Für die gemeinsame Welle gilt hier aber ebenfalls das oben bei der Dreilagerausführung Gesagte.

In elektrischer Hinsicht haben die Motorgeneratoren ein ganz bestimmtes und wesentlich weiteres Anwendungsgebiet als die später zu besprechenden Einanker- und Kaskadenumformer, wobei in der Hauptsache zu unterscheiden ist, ob es sich um Wechselstrom-Gleichstrom- oder umgekehrt Gleichstrom-Wechselstromumformung handelt.

Für die Wechselstrom-Gleichstromumformung kommen als Wechselstrommotoren entweder synchrone oder asynchrone zur Verwendung, und von diesen sollen hier mit Rücksicht auf die Ausführungen über die Asynchronmotoren im I. Abschnitte nur die synchronen Drehstrommotoren eingehender behandelt werden; für die Gleichstrom-Wechselstrom-Motorgeneratoren wählt man als Antrieb umgekehrt fast ausschließlich Gleichstrom-Nebenschlußmotoren in Verbindung mit Drehstrom-Synchrongeneratoren. Nur vereinzelt und zwar in der Hauptsache für Bahnanlagen finden sich Einphasen-Synchrongeneratoren.

Die Generatoren an sich werden erst im II. Bande ausführlicher besprochen, indessen soll schon hier soviel von denselben erwähnt werden, als zur Beurteilung der Umformer an sich und zur Projektbearbeitung notwendig ist.

27. Der Motorgenerator mit Synchronmotor.

a) Der **Drehstrom-Synchronmotor** ist nichts anderes als ein Synchrongenerator, dem elektrische Energie zugeführt wird, und der dann an seiner Welle mechanische Arbeit leistet. Der Aufbau der Maschine muß als bekannt vorausgesetzt werden. Er hat für die Erregung eine besondere Gleichstromquelle nötig (angebaute Erregermaschine oder vorhandenes Gleichstromnetz konstanter Spannung)¹⁾. Synchronmaschine

¹⁾ Die Erregung des Synchronmotors wird in der Mehrzahl der Fälle als Fremderregung ausgeführt und zwar gespeist entweder von einer angebauten Gleichstromdynamo (Erregergenerator), wie sie in Tafel I, Fig. I und III gezeichnet ist, oder von einer mit dem Motor nicht in mechanischer Verbindung stehenden also vollkommen unabhängigen Gleichstromquelle. Als letztere kommen in Frage: ein besonderer Erregermaschinensatz z. B. bestehend aus Asynchronmotor und Gleichstrom-Nebenschlußgenerator, oder ein vorhandenes Gleichstromnetz (Tafel I, Fig. II). Die Selbsterregung über Umformer wird für Synchronmotoren so gut wie garnicht angewendet, weil sie in der Beschaffung der Maschinen zu teuer ist und keine besonderen Vorteile gegenüber den anderen Erregerformen aufweist.

Die angebaute Erregermaschine wird entweder mit einer Nebenschlußwicklung oder mit einer Compoundwicklung versehen. Im ersteren Falle erfolgt die Regelung der Erregung des Synchronmotors durch Änderung der Erregung der Erregermaschine mittels eines Nebenschlußreglers. Die Apparate für die Spannungsregelung werden klein und billig, weil sie nur für den Strom im Nebenschlußstromkreise zu bemessen sind. Die Änderung der Drehstromspannung selbst geht aber nach dem Verstellen des Reglers nur langsam vor sich, weil die Trägheit von zwei magnetischen Kreisen hintereinandergeschaltet ist. Trotzdem wird die Nebenschlußerregermaschine häufig verwendet. Besser wenn

kurzweg heißt die Maschine aus dem Grunde, weil sie mit einer durch ihre Polzahl und die Frequenz des Stromes — zugeführten oder beim Generator erzeugten — bedingten Drehzahl ohne Schlüpfung zwischen Läufer und Ständer arbeitet.

Der Synchronmotor hat die schätzenswerte Eigenschaft, daß er durch Übererregung voreilenden wattlosen Strom in das Netz zurückliefern kann, also er stellt dann gewissermaßen eine Kapazität dar, die in das vorhandene Drehstromnetz eingeschaltet wird. Insbesondere dort, wo eine ausgedehnte Drehstromanlage vorwiegend mit vielen kleineren asynchronen Motoren belastet ist, die in der Regel recht

auch im Wirkungsgrade etwas ungünstiger — was praktisch aber keine Rolle spielt — ist die Compoundierung der Erregermaschine und die Schaltung des Erregerstromkreises nach Tafel II, Fig. III. Zur Änderung der Erregung, die dann sofort anspricht, wird ein veränderlicher Hauptstromwiderstand *E. Reg.* benutzt, der natürlich größere Abmessungen erhält als der Nebenschlußregler, weil er den ganzen Erregerstrom zu führen hat, und der infolgedessen auch teurer wird. Die Nebenschlußwicklung liegt zumeist fest an den Klemmen des Gleichstromgenerators.

Bei der festen Kupplung bzw. dem Zusammenbau der Erregermaschine mit dem Synchronmotor ist die Spannung natürlich von der Drehzahl abhängig, sie schwankt mit schwankender Belastung, wenn nicht besondere automatisch arbeitende Regulatoren vorhanden sind. In derartigen Betrieben ist die compoundierte Erregermaschine der reinen Nebenschlußmaschine entschieden vorzuziehen, weil bei dieser Ausführung die Erregerspannung leichter in geringen Grenzen ohne besondere Nachstellung des Regulators konstant gehalten werden kann.

Ist dagegen mit großen Belastungsstößen oder mit Spannungsschwankungen im Drehstromnetze zu rechnen, dann empfiehlt sich vorteilhafter die Verwendung eines besonderen unabhängigen Erregeraggregates oder der Anschluß der Magnetwicklung des Synchronmotors an ein vorhandenes Gleichstromnetz, das dann allerdings konstante Spannung haben muß (Tafel I, Fig. II).

Sind nur ein oder zwei Motorgeneratoren installiert, so erhält jeder zumeist seine eigene angebaute Erregermaschine, weil dieses die einfachste, billigste und zuverlässigste Form ist. Die Maschinen sind nach jeder Richtung unabhängig voneinander. Das ist in gleichem Maße nicht mehr der Fall, wenn die Erregung von einem vorhandenen Netze aus erfolgt, denn Vorkommnisse und Störungen in diesem müssen sich naturgemäß auf die Motorgeneratoren übertragen. Auch in einem großen Umformerwerke mit fünf oder noch mehr Umformern gibt man lieber jedem Aggregate seine eigene Erregermaschine, wenn der Betrieb nicht nach Obigem die unabhängige Fremderregung fordert. Die Anlagekosten sind vielleicht etwas höher, als wenn für mehrere Aggregate ein Erreger-Maschinensatz installiert wird, insbesondere dann, wenn die Gleichstromgeneratoren der Motorgeneratoren niedrige Drehzahlen aufweisen, weil in einem solchen Falle auch die Erregermaschinen teurer werden; diese Ausführung hat aber, wie bereits gesagt, den großen Vorteil der gegenseitigen Unabhängigkeit, und auch der Wirkungsgrad jedes Umformers an sich wird besser.

Das besondere Erregeraggregat mit Asynchronmotor ist dagegen insofern für viele selbstverständlich nur größere Umformerstationen die günstigere Anordnung, weil der Erreger-Maschinensatz konstante Spannung liefert und das Stillsetzen eines großen teuren Maschinensatzes infolge eines Defektes an der kleinen Erregermaschine bei unmittelbarem Zusammenbau fortfällt. Außerdem ist die Wartung und Bedienung des einen großen Satzes mit seiner Reserve, die selbstverständlich vorhanden sein muß, einfacher und billiger als diejenige z. B. von fünf kleinen Einzelmaschinen.

Weiteres über die Erregermaschinen wird im II. Bande bei den Synchrongeneratoren erwähnt werden.

bedeutende wattlose Ströme von den Stromerzeugern fordern, kann ein Synchronmotor allein oder wie hier zunächst, wenn er zum Antriebe eines Gleichstromgenerators dient, wesentliche Vorteile bieten. Durch Einstellung der Erregung kann der Synchronmotor nämlich soweit gebracht werden, daß er mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ arbeitet, also seinerseits keinen wattlosen Strom vom Netz aufnimmt oder sogar, wie bereits angedeutet, wattlosen Strom in das Netz selbst abgibt, also die Generatoren des Kraftwerkes entlastet. Wird von ihm diese Erzeugung wattlosen Stromes verlangt, dann muß er größer als für den Antrieb des Gleichstromgenerators erforderlich bemessen werden und zwar aus folgender Überlegung.

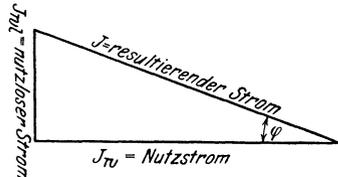


Fig. 112.

Bezeichnet:

- J_w den Wattstrom (Nutzstrom) in Amp.,
- J_{wl} den wattlosen (nutzlosen) Strom in Amp.,
- J den resultierenden Strom in Amp.,

so ist nach Fig. 112 bekanntlich:

$$\left. \begin{aligned} J &= \sqrt{J_w^2 + J_{wl}^2}, \\ J_w &= J \cdot \cos \varphi, \\ J_{wl} &= J \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (80)$$

Für den mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ arbeitenden Synchronmotor geht die Gl. (80) über in die Form:

$$J = \sqrt{J^2 \cdot \cos^2 \varphi + J^2 \cdot \sin^2 \varphi} = \sqrt{J^2 \cdot 1 + J^2 \cdot 0} = J, \quad (81)$$

also es verschwindet der wattlose Strom, und der dem Motor zugeführte Strom wird vollständig ausgenutzt. Soll nun ein bestimmter wattloser Strom J'_{wl} ins Netz geliefert werden, dann ist der Motor für den Strom:

$$J' = \sqrt{J^2 + J_{wl}^2} \quad (82)$$

zu bemessen.

Hat ein Drehstrom-Synchronmotor zum Antriebe eines Gleichstromgenerators z. B. 100 PS abzugeben, so würde der Motor bei einer Spannung von 3000 Volt, und wenn derselbe mit $\cos \varphi = 1$ arbeitete, eine Stromstärke aufnehmen:

$$J = \frac{736 \cdot \text{PS}}{E_k \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_M} = \frac{736 \cdot 100}{3000 \cdot 1,73 \cdot 1 \cdot 0,93} \cong 15,2 \text{ Amp.}$$

Soll nun von demselben noch ein wattloser Strom von $J'_{wl} = 20$ Amp. abgegeben werden, dann ist der Motor für eine scheinbare Leistung von:

$$\begin{aligned} & \frac{E_k \cdot \sqrt{3} \cdot \eta_M}{1000} \sqrt{J^2 + J_{wl}^2} \\ &= \frac{3000 \cdot 1,73 \cdot 0,93}{1000} \sqrt{15,2^2 + 20^2} \cong 121 \text{ KVA (Kilovoltamper)} \end{aligned}$$

zu bemessen.

Infolge einer solchen Kompensierung der in einem Netze vorhandenen wattlosen Ströme wird der Leistungsfaktor der ganzen Kraftübertragung verbessert, der Strom in den Generatoren, Transformatoren und Leitungen verringert, und dadurch ist es möglich, entweder eine bereits bestehende Anlage besser auszunützen oder bei einer Neuanlage unter Umständen ganz erheblich an Kosten für das Leitungsmaterial zu sparen. Die Steigerung der Ausnutzungsfähigkeit der Generatoren in einer vorhandenen Anlage ist dann von ganz besonderem Werte, wenn eine Erweiterung der Gebäude der Stromerzeugungsstation nicht mehr durchführbar ist. Bei Neuanlagen bedarf es einer eingehenden Rechnung und Kalkulation, um festzustellen, um welchen Betrag es sich bei der Ersparnis an Leitungsmaterial handelt gegenüber den Kosten, die durch die Aufstellung, Unterhaltung und Bedienung eines Synchronmotors entstehen. Dabei sind aber alle günstigen Faktoren gebührend zu berücksichtigen so z. B., ob nicht etwa der Synchronmotor eines Motorgenerators für die Lieferung von Gleichstrom an eine anzuschließende Stadt, ein industrielles Werk, eine elektrische Bahn oder dgl. von vornherein etwas größer gewählt wird, um mit demselben dann gleichzeitig die gewünschte Kompensierung der wattlosen Ströme im Netze vorzunehmen.

Andere Gelegenheiten bieten sich oft auch darin, daß an Stelle eines Drehstrom-Asynchronmotors zum Antriebe von Bergwerksventilatoren und -pumpen oder von Transmissionen, die ständig laufen, ein Synchronmotor gewählt wird. Natürlich aber kann es sich dabei nur um solche Maschinen handeln, die selten angelassen bzw. abgestellt werden und die ein geringes Anlaufmoment erfordern. Ist keines dieser günstigen Momente gegeben, so wird man unter Umständen den Synchronmotor leerlaufen lassen, ihn also lediglich zur Kompensierung benutzen, und man kann auch dann noch reichliche Vorteile, gute Verzinsung des Anlagekapitals usw. erzielen.

Ist das Netz der Kraftübertragungsanlage ein sehr ausgedehntes und weit verzweigtes, so hat man gegebenenfalls mehrere Synchronmotoren aufzustellen und sie an solche Plätze zu verteilen, an denen ein besonders schlechter Leistungsfaktor vorhanden ist. Hierfür kommen in Frage: große Drehstrommotoren, Bogenlampen, elektrische Öfen.

Die Erhöhung der Ausnutzungsfähigkeit von Generatoren ist aus folgendem sofort zu erkennen: Betrag der Leistungsfaktor an den Sammelschienen des Kraftwerkes ursprünglich $\cos \varphi = 0,6$ — eine Zahl, die in sehr vielen Anlagen, besonders Überlandzentralen, anzutreffen ist — und wünscht man, den $\cos \varphi$ auf 1 zu bringen, so war z. B. bei 1000 KW und 5000 Volt:

bei $\cos \varphi = 0,6$ die Stromstärke:

$$J = \frac{\text{KW} \cdot 1000}{E_K \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi} = \frac{1000 \cdot 1000}{5000 \cdot 1,73 \cdot 0,6} = 193 \text{ Amp.},$$

und sie geht bei $\cos \varphi = 1$ zurück auf:

$$J = \frac{1000 \cdot 1000}{5000 \cdot 1,73 \cdot 1} = 116 \text{ Amp.}$$

Also beträgt die Stromstärke, ohne daß sich die Leistung oder die Spannung geändert hat, nunmehr nur rund 60 % der bisherigen. Sie verringert sich demnach prozentual um $(1 - \cos \varphi) 100\%$. Es kann somit die ganze Anlage um denselben Prozentsatz höher belastet werden, wobei noch der weitere Vorteil hinzukommt, daß die Generatoren und Transformatoren bei $\cos \varphi = 1$ einen mindestens um 2 bis 3% günstigeren Wirkungsgrad haben als bei dem schlechten $\cos \varphi = 0,6$. Also auch hierin wird die Belastungsfähigkeit der einzelnen Teile der Anlage gesteigert bzw. ihre Ausnutzungsfähigkeit erhöht.

Hinsichtlich der Ersparnis an Leitungsmaterial ist folgendes zu bemerken: Bezeichnet q den Querschnitt der Leitungen in qmm, l die einfache Länge in m, E_2 die Spannung und \mathfrak{E}_2 die abzugebende Energiemenge in Watt bei der Spannung E_2 an der Verbrauchsstelle, ρ den spezifischen Widerstand des Leitungsmaterials ($\rho = 0,0175$ für Kupfer) und ε den Energieverlust in Prozenten der Energie \mathfrak{E}_2 , so ist für Drehstrom:

$$q = \frac{\mathfrak{E}_2 \cdot l \cdot 100}{E_2^2 \cdot \varepsilon \cdot \cos^2 \varphi_2} \rho,$$

für Einphasenstrom:

$$q = \frac{\mathfrak{E}_2 \cdot 2l \cdot 100}{E_2^2 \cdot \varepsilon \cdot \cos^2 \varphi_2} \rho.$$

Liegen ε und E_2 fest, dann ist der Querschnitt und damit die Menge des Leitungsmaterials nur abhängig von dem Werte $\frac{1}{\cos^2 \varphi_2}$.

Bei $\cos \varphi_2 = 0,6$ wird demnach in einer Drehstromanlage die Materialmenge für Leitungen 2,8 mal größer als bei $\cos \varphi = 1$. Dasselbe gilt für den Verlust in den Leitungen, wenn die Menge des Materials nicht geändert werden soll, und zwar beträgt derselbe (wiederum für Drehstrom) bei $\cos \varphi = 0,6$ rund 2,8 mal mehr als bei $\cos \varphi = 1$.

Soll nun die eine Netzbelastung von L_1 KW bei einem $\cos \varphi_1$ auf einen besseren Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$ gebracht und hierzu der Synchronmotor eines Motorgenerators benutzt werden, der mit L_2 KW durch die Gleichstrommaschine bereits belastet ist, so ist der Synchronmotor für eine scheinbare Leistung (Leistung in KVA) zu bemessen von:

$$L'_{S.M.} = \sqrt{L_x^2 + L_2^2}.$$

L_x gibt die noch unbekannte Leistung an, die notwendig ist, um die wattlosen Ströme zu kompensieren. Nach einer Umrechnung¹⁾,

¹⁾ Siehe Herzog-Feldmann: Die Berechnung elektrischer Leitungsnetze, II. Teil.

die hier weniger interessiert, findet man

$$\begin{aligned} L_x &= L_1 \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - (L_1 + L_2) \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \\ &= L_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - (L_1 + L_2) \operatorname{tg} \varphi_2. \end{aligned}$$

Der Leistungsfaktor des Synchronmotors ist dann:

$$\frac{L_2}{\sqrt{L_x^2 + L_2^2}}.$$

Die General Electric Comp.¹⁾ hat in amerikanischen Anlagen solche übererregten Synchronmotoren bereits vielfach benutzt. Sie bezeichnet dieselben mit dem Namen: „Synchronkondensatoren“, und will dadurch andeuten, daß nicht nur Synchronmotoren hierfür brauchbar sind, sondern alle Maschinen ähnlichen Charakters wie also z. B. auch die später zu besprechenden Einankerumformer. In Deutschland haben Synchronkondensatoren bisher nur ganz vereinzelt Anwendung gefunden. Man wird aber mit dem fortschreitenden Ausbau der großen Überlandzentralen, die vorwiegend mit kleinen Asynchronmotoren belastet sind und infolgedessen wohl bald einen recht schlechten Leistungsfaktor aufweisen werden, von dieser Kompensierung der wattlosen Ströme mit der Zeit Gebrauch machen müssen und das dann sicherlich mit günstigen Resultaten.

Diesem recht bedeutenden Vorteile des Synchronmotors, den Leistungsfaktor der Kraftübertragung zu erhöhen, stehen aber auch Nachteile gegenüber, die teilweise in der umständlichen Inbetriebsetzung und teilweise in der Arbeitsweise des Motors liegen.

Um die Inbetriebsetzung eines Drehstrom-Synchronmotors zu erläutern, sei folgendes vorausgeschickt. Wird die Wicklung einer Mehrphasenmaschine von einem Strome durchflossen, so wird von dem Strome ein Drehfeld erzeugt, dessen Drehzahl relativ zum Anker gegeben ist aus der Gleichung $n = \frac{60 \cdot c}{p}$. Steht die vom Wechselstrome

durchflossene Wicklung still, wie das bei den neueren synchronen Wechselstrommaschinen stets der Fall ist (Innenpolmaschinen), und bringt man den Anker auf irgendeine Weise auf die Drehzahl des Drehfeldes, so wird derselbe mitlaufen und zwar aus folgendem Grunde: Die sich in der Armaturwicklung ausbildenden Pole und die durch Gleichstrom erregten Pole des Magnetrades ziehen einander an, sofern sie ungleichnamig sind, und stoßen sich gegenseitig ab, wenn sie das gleiche Vorzeichen haben. Wenn sich nun das Drehfeld langsam zu drehen beginnt, treten zwischen den Polen der Armatur und denjenigen des Magnetrades tangentielle Kräfte auf, durch die das Magnetrad mitgenommen wird, weil die Pole stets bestrebt sind, zueinander dieselbe Lage einzunehmen. Ein konstantes Drehmoment kann infolgedessen

¹⁾ Siehe Niethammer: Synchronkondensatoren E.K.B. 1911 Heft 33, S. 671.

nur entstehen, wenn das Magnetsystem mit derselben Geschwindigkeit läuft wie das von der Armatur erzeugte Drehfeld. Sind diese Geschwindigkeiten verschieden, dann würden nur pulsierende tangentiale Kräfte auftreten, die sich gegenseitig aufheben, und es folgt somit, daß ein Synchronmotor nur Arbeit leisten kann, wenn das Magnetrad synchron mit dem Drehfelde der Armatur läuft.

Wenn kein äußeres Drehmoment zu überwinden ist, so stehen sich die Pole entgegengesetzter Polarität gerade gegenüber, und wenn vom Anker mechanische Arbeit abgegeben wird, verschiebt sich die Lage der Pole im Sinne einer Nacheilung¹⁾. In Fig. 113 ist dieses zur Darstellung gebracht. Eine solche Wechselstrommaschine arbeitet in dem Bereiche zwischen 0 und 90° Nacheilung als Motor und in dem Bereiche von 0 bis 90° Vor-eilung als Generator. In den anderen Lagen ist der Gang instabil.

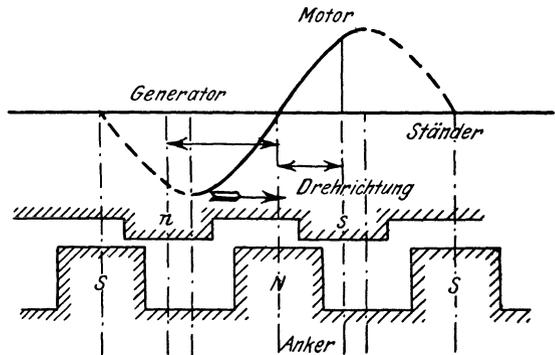


Fig. 113. Diagrammatische Darstellung der Arbeitsweise einer Synchronmaschine.

Aus diesen kurzen Betrachtungen geht hervor, daß also ein Synchronmotor nicht wie z. B. ein Gleichstrom- oder Drehstrom-Asynchronmotor von selbst anläuft, sondern es muß das Magnetsystem im allgemeinen durch eine besondere äußere Kraft erst auf die synchrone Drehzahl gebracht werden. Ferner muß der Motor, bevor er auf das Netz geschaltet werden darf, in Synchronismus mit diesem liegen.

b) Der selbstanlaufende Synchronmotor. Naturgemäß hat man — und zwar mit gutem Resultate — versucht, das besondere „Anwerfen“ des Motors, wie man das Anlassen eines Synchronmotors unter Benutzung einer äußeren Kraftquelle kurz bezeichnet, zu umgehen. Die eine Möglichkeit hierfür besteht darin, daß man das Magnetrad neben der Erregerwicklung mit einer Kurzschlußwicklung versieht ähnlich dem Läufer eines Drehstrom-Kurzschlußankermotors. Zu diesem Zwecke werden lamellierte Pole verwendet, und die Polschuhe erhalten Nuten, in denen eine besondere Käfigwicklung (Kurzschlußwicklung) untergebracht ist. Da diese Wicklung aus praktischen Gründen aber nicht vollständig gleichmäßig über den ganzen Magnetradumfang verteilt werden kann, können, wie leicht einzusehen ist, Stellungen zwischen Magnetrad und Ständer vorkommen, in denen ein Anlaufen nicht möglich ist (sog. „Kleben“ des Magnetrades), doch ist dieses bis zu einem praktisch befriedigenden Maße

¹⁾ Siehe E. Arnold: Die Wechselstromtechnik.

dadurch vermeidbar, daß man den Polbogen mindestens 75 bis 80% der Polteilung wählt.

Das Stromlaufschema ist in Fig. 114 dargestellt. Das Anlassen eines solchen Motors erfolgt bei geöffnetem oder vorteilhafter bei kurzgeschlossenem Erregerstromkreise. Letzteres ist aus dem Grunde günstiger, weil die in der Erregerwicklung induzierte EMK. in ihr selbst verzehrt wird, und der Motor besser anzieht. Um einen zu großen Stromstoß beim Anlaufe zu vermeiden, wird die dem Motor zugeführte Spannung entweder mittels eines Anlaßtransformators oder, wenn ein Leistungstransformator vorhanden ist, durch Anzapfung der Nieder-

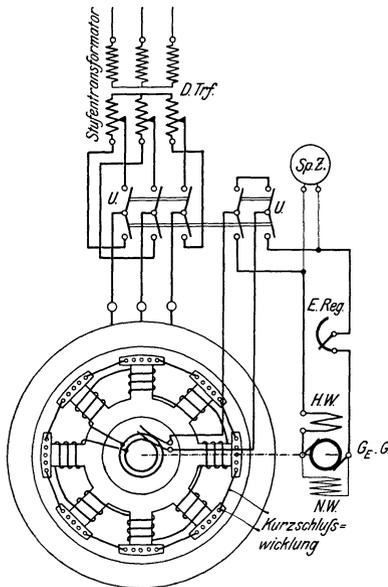


Fig. 114. Stromlaufschema des selbst-anlaufenden Drehstrom-Synchronmotors.

spannungswicklungen des letzteren herabgesetzt, wie auf S. 66 beim Drehstrom - Kurzschlußankermotor angegeben. Dadurch wird ferner vermieden, daß die in der Feldwicklung des Synchronmotors bei Stillstand induzierte Spannung eine Höhe erreicht, die der Isolation dieser Wicklung gefährlich werden könnte. Durch das Drehfeld der Armatur wird der Motor auf eine Drehzahl gebracht, die nahe dem Synchronismus liegt. Durch die „synchronisierende Kraft“ d. h. diejenige Tangentialkraft, die nach früheren Ausführungen bestrebt ist, bei Abweichungen des Magnetrades aus seiner Mittellage der Armatur gegenüber dasselbe in die Mittellage zurück- oder überhaupt hinzuziehen, kann dem selbstanlaufenden Synchronmotor auch die Fähigkeit gegeben werden, von selbst in Synchronismus zu kommen, und zwar wenn der synchronisierende Kraft kein zu großer äußerer Widerstand entgegengesetzt wird. Ist der Synchronismus erreicht, dann wird mit Hilfe des Umschalters U . in Fig. 114 die Magnetwicklung an die Erregermaschine gelegt und auf Leerlaufspannung einreguliert. Hiernach kann die Armaturwicklung von der Anlaßspannung auf die normale Betriebsspannung umgeschaltet werden, wobei der Stromstoß auf das Netz kaum noch von besonderer Bedeutung sein wird. Nachteilig bei dieser Schaltung ist, daß die Erregung nicht immer zuverlässig mit der richtigen Polarität erfolgt. Man kann diesem Übelstande indessen dadurch begegnen, daß man die Erregerwicklung umschaltbar macht (in Fig. 114 nicht berücksichtigt) und die Stromrichtung in derselben durch einen Stromrichtungsanzeiger oder einen Stromzeiger mit beiderseitigem Ausschlag (Nullstellung des Zeigers in der Mitte der Skala) bestimmt.

Das Drehmoment dieses selbstanlaufenden Synchronmotors kann, da der Motor während des Anlaufens ganz allgemein mit einem Kurzschlußankermotor vergleichbar ist, durch entsprechend bemessenen Widerstand der Kurzschlußwicklung beeinflußt werden. Für einen Motorgenerator genügen etwa 5% des normalen Drehmomentes, wobei der Anlaufstrom etwa um 25% größer ist als der normale Vollaststrom. Werden Synchronmotoren dieser Art zum Antriebe von Zentrifugalpumpen und Maschinen ähnlicher Arbeitsweise benutzt, bei denen das Drehmoment annähernd mit der dritten Potenz der Drehzahl steigt, dann wächst bei geringem Widerstande der Kurzschlußwicklung die Anlaufstromstärke auf den 3- bis 4fachen Betrag der Stromstärke bei Vollast an, was wiederum mit Rücksicht auf das Kraftwerk zu beachten ist.

Während des Betriebes wirkt die Kurzschlußwicklung gleichzeitig als Dämpferwicklung, worauf weiter unten noch besonders eingegangen werden wird.

Es soll ferner eine zweite Art des Anlassens eines Synchronmotors ohne äußere Kraft erwähnt werden, die darin besteht, den Motor mit dem Generator zusammen gleichzeitig anlaufen zu lassen. Dieser Fall kommt heute fast gar nicht mehr vor, denn er hat zur Bedingung, daß der stromliefernde Generator des Kraftwerkes nur Synchronmotoren in solchen Betrieben zu speisen hat, die ein gleichzeitiges Anlaufen zulassen. Hierbei sieht man zweckmäßiger von dem Anbau der Erregermaschine an den Motor ab, wählt vielmehr eine besonders angetriebene Erregermaschine, weil das Anlaufdrehmoment des Motors um so stärker ist, je stärker er erregt wird, die Erregerspannung aber bei angebaute Erregermaschine erst mit zunehmender Drehzahl steigt.

28. Das Anwerfen des Synchron-Motorgenerators durch eine besondere äußere Kraft.

In den weitaus häufigsten Fällen wird die Inbetriebsetzung des Synchron-Motorgenerators mittels einer besonderen äußeren Kraft und zwar durch einen Anwurfsmotor vorgenommen; es sind dafür die folgenden drei Ausführungen im Gebrauch:

- a) als Anwurfsmotor dient die eigene Erregermaschine;
- b) als Anwurfsmotor wird der im normalen Betriebe anzutreibende Gleichstromgenerator benutzt;
- c) der Anwurf erfolgt durch einen besonderen Asynchronmotor.

a) Die eigene Erregermaschine als Anwurfsmotor. Diese Form der Inbetriebsetzung des Synchronmotors hat zunächst zur Voraussetzung, daß Strom aus einem Gleichstromnetze genügender Leistungsfähigkeit wenn auch nur für die Zeit, während welcher die Erregermaschine als Motor arbeitet, zur Energielieferung an diese und zur Erregung des Synchronmotors zur Verfügung steht. Naturgemäß muß die Erregermaschine mit dem Motorgenerator mechanisch verbunden sein und zwar am vorteilhaftesten durch Kupplung. Riemen-

übertragung erfordert zu viel Platz und ist aus anderen betriebstechnischen Gründen nicht gut (Abfallen, Nachspannen, Gleiten des Riemens). Hierfür kommen demnach nur solche Anlagen in Betracht, die bereits Gleichstrom in größerem Umfange benutzen (Erweiterung einer bestehenden Gleichstromanlage durch Aufstellung eines Motorgenerators) oder solche, in denen eine Akkumulatorenbatterie vorhanden ist.

In Tafel I Fig. I ist das vollständige Schaltungsschema einer solchen Anordnung dargestellt und zwar für eine Anlage mit Akkumulatorenbatterie, Zusatzmaschine für die Ladung und Einfachzellenschalter¹⁾. Die an den Motorgenerator angebaute Erregermaschine wird mit Hilfe des Umschalters *U.* zunächst auf das Gleichstromnetz, das von der Akkumulatorenbatterie unter Strom steht, geschaltet, und dieser Umschalter legt auch die Erregung des Synchronmotors zwangsläufig und gleichzeitig an die Gleichstromsammelschienen. Da die Erregermaschine mit Compoundwicklung versehen ist, schließt der Umschalter die Hauptstromwicklung kurz, und die Erregermaschine arbeitet während des Anwerfens nur mit der Nebenschlußwicklung. Mit Hilfe des Anlassers *Anl.* wird die Erregermaschine als Motor in Gang gesetzt, und sie treibt infolgedessen den Motorgenerator an. Durch den Erregerregulator *E.Reg.* wird der Synchronmotor allmählich auf Spannung gebracht, und die Drehzahl des Aggregates mittels des Nebenschlußreglers der Erregermaschine *N.Reg.* so einreguliert, daß der Synchronmotor synchron mit dem Netze läuft. Mit Hilfe der in Tafel I eingetragenen Strom- und Spannungszeiger auf den Gleichstromseiten kann man den ordnungsmäßigen Gang des Anlassens leicht und sicher beobachten.

Diese Art für das Anwerfen hat den Vorteil, daß ein besonderer Anwurfsmotor entbehrlich und daß eine Regelung der Drehzahl des Synchronmotors zum Zwecke der Parallelschaltung in leichter Weise möglich ist; sie verlangt aber eine besondere Gleichstromquelle, die in dem vorliegenden Falle z. B. noch dazu benutzt werden kann, die Stromlieferung in den Nacht- und Frühstunden zu übernehmen. Der Wirkungsgrad der Gesamtanlage kann dadurch verbessert werden, weil während der Nacht und in den Frühstunden, wenn also die Belastung des Netzes nur eine sehr geringe ist, die Akkumulatorenbatterie im Betriebe ist, und die Verluste im Transformator und im Motorgenerator fortfallen. Beträgt z. B. bei $\frac{1}{4}$ -Last der Wirkungsgrad:

des Transformators	93%
„ Motors	85%
„ Generators	79%,

so wird der Gesamtwirkungsgrad:

$$0,93 \cdot 0,85 \cdot 0,79 \cong 0,62,$$

während derjenige der Batterie etwa 0,7 ist. Das Laden mit Hilfe der Zusatzmaschine kann in den Morgen- oder Mittagsstunden also wiederum zu Zeiten geringerer Belastung des Motorgenerators erfolgen.

¹⁾ Die besondere Erläuterung der Schemas der Tafel I erfolgt auf S. 138 u. f.

Die Anwurfsleistung, die die Erregermaschine als Motor zu entwickeln hat, ergibt sich aus der Leerlaufenergie des Motorgenerators und beträgt etwa $\frac{1}{4}$ der Gesamtleistung beider Maschinen, doch ist das von Fall zu Fall stets besonders zu prüfen. Die Erregermaschine wird infolgedessen größer zu wählen sein, als sie normal als Generator ausfallen würde. Die Schaltung ist nicht besonders einfach, die Instrumentierung muß sehr reichlich sein, und die Inbetriebsetzung des ganzen Aggregates erfordert besondere Aufmerksamkeit und Geschick. Über das Synchronisieren wird auf S. 139 gesprochen.

Ist der Synchronmotor auf das Netz geschaltet, dann ist der Umschalter U der Erregermaschine umzulegen; dadurch wird gleichzeitig auch die Erregung des Synchronmotors auf die eigene Erregermaschine geschaltet. Dieses Umschalten muß sehr rasch erfolgen, weil der Synchronmotor im Augenblicke der Unterbrechung ohne Erregung läuft und, da das Drehfeld kein Gegenfeld hat, „durchgeht“. Nun kann der Gleichstromgenerator $G.G.$ erregt werden, und dadurch wird der Motor gezwungen, Energie vom Netze aufzunehmen, also Arbeit zu leisten.

Durch Änderung der Erregung des Synchronmotors kann die Energieaufnahme also die Arbeitsleistung desselben nicht beeinflusst werden, sondern es wird nur die Phase des Motorstromes geändert und zwar im Sinne einer Nacheilung bei schwächerer und einer Voreilung bei stärkerer Erregung. Demzufolge gibt es also eine Erregung, bei der Strom und Spannung in Phase miteinander sind, der Leistungsfaktor $\cos\varphi = 1$ ist, und vom Motor kein wattloser Strom aufgenommen wird. Die Erregung muß infolgedessen bei verschiedenen Belastungen nachreguliert werden, um stets diesen günstigsten Arbeitszustand also den geringsten Motorstrom zu erhalten.

b) Der Gleichstromgenerator als Anwurfsmotor. Diese Methode für das Anlassen des Motorgenerators besteht darin, daß man den im normalen Betriebe stromliefernden Gleichstromgenerator für die Zeit der Inbetriebsetzung des Maschinensatzes als Motor laufen läßt. Sie findet ebenfalls dann Anwendung, wenn Gleichstrom in der Umformeranlage bereits vorhanden ist. Im Gegensatz zur Form a) benutzt man diese Art für das Anwerfen häufiger und zwar vornehmlich natürlich in solchen Anlagen, die in größerem Umfange Gleichstrom zur Verfügung haben, z. B. in Umformerstationen städtischer Gleichstrom-Elektrizitätswerke, in ausgedehnten Fabriken mit teilweiser Gleichstromversorgung und ähnlichen Betrieben, die an ein Drehstrom-Kraftwerk angeschlossen werden sollen, läßt dann auch die Erregermaschine ganz fortfallen und benutzt für die Erregung der Magnete des Synchronmotors ebenfalls das vorhandene Gleichstromnetz, wählt also unabhängige Fremderregung. In dieser Ausführung wird der Motorgenerator am einfachsten und billigsten. Allerdings setzt diese Art der Erregung voraus, daß die Spannung an den Gleichstromsammelschienen für alle Belastungen stets auf gleicher Höhe

gehalten wird. Im anderen Falle kann es bei starken Spannungsschwankungen vorkommen, daß der Motorgenerator, wenn die Sammelschienenspannung höher als die Spannung des Gleichstromgenerators ist, dann umgekehrt Gleichstrom aufnimmt und Drehstrom abgibt, also falsch arbeitet, wenn diese Arbeitsweise nicht durch das Einschalten eines selbsttätig wirkenden Spannungsrückgangs- oder Rückstromschalters im Stromkreise des Gleichstromgenerators verhindert wird. Durch häufiges Ansprechen eines solchen Schalters, der den Stromkreis jedesmal unterbricht, kann aber der Betrieb in unzulässiger Weise gestört werden, weil nach dem Abschalten stets wieder vollständig von neuem angefahren und synchronisiert werden muß. Die erwähnten automatischen Schalter beruhen ebenfalls wie die Höchststromschalter (S. 25) auf dem allgemeinen Prinzip, daß der Schaltmechanismus durch Relais zur Auslösung gebracht wird.

In Tafel I Fig. II ist das Schaltungsschema für eine solche Anlage dargestellt. Es ist bei demselben angenommen worden, daß zwei Gleichstromgeneratoren bereits vorhanden sind, und der Motorgenerator an ein Drehstromnetz von 3000 Volt anzuschließen ist. Der Motor soll mit dieser Spannung unmittelbar betrieben werden können. Die Gleichstrommaschine *G.G.* erhält ähnlich wie die Erregermaschine in Fig. I der Tafel I noch einen besonderen Anlasser *Anl.* für die Inbetriebsetzung, der nach Beendigung des Anlaufes und Synchronisierens des Motors durch einen Schalter *Sch.* kurzgeschlossen wird.

Der Vorgang beim Anlassen und Synchronisieren spielt sich in ähnlicher Weise wie im Falle a) ab. Zunächst wird der Gleichstromgenerator als Motor in Betrieb gesetzt, die Drehzahl bis zur synchronen durch den Nebenschlußregler eingestellt und der Synchronmotor dann parallelgeschaltet. Ist das geschehen, so wird der Anlasser kurzgeschlossen, und die Gleichstrommaschine durch Regelung ihrer Erregung zur Stromabgabe gezwungen. Bemerkte sei noch besonders, daß der Nebenschlußregler *N.Reg.* des Generators *G.G.* des Motorgenerators nicht mit einem Kurzschlußkontakte versehen sein darf, wie das bei den anderen Gleichstromgeneratoren *G.G.*₁ und *G.G.*₂ der Fall ist, da sonst durch versehentliches Drehen der Reglerkurbel nach der falschen Seite die Gleichstrommaschine ohne Erregung arbeiten und dann durchgehen könnte.

c) **Der Anwurf durch einen besonderen Asynchronmotor.** Der dritte Fall ist schließlich der, daß kein Gleichstrom vorhanden ist. Dann muß ein besonderer asynchroner Drehstrommotor oder in Einphasenanlagen ein Wechselstrommotor zum Anwerfen benutzt werden. Da aber die Drehzahl eines solchen Motors bei Vollast infolge der Schlüpfung um etwa 4 bis 6% von der synchronen nach unten abweicht, kann der Synchronmotor auf diese Art nicht ohne weiteres auf volle synchrone Umdrehungszahl gebracht werden. Wird der Synchronmotor mit der durch den Motor an sich ohne besondere Hilfsmittel bedingten geringeren Drehzahl auf das Netz geschaltet, dann wird er infolge der synchronisierenden Kraft in der Regel wohl auf den Synchronismus

einspringen. Er nimmt dabei aber plötzlich einen so großen Strom aus dem Netze auf, daß der dadurch bei kleineren Anlagen hervorgerufene Spannungsabfall in den Generatoren und damit an den Sammelschienen des Kraftwerkes andere im Betriebe befindliche Synchronmotoren oder Einankerumformer stört bzw. zum Stillstande oder, wie man sagt, zum „Außertrittfallen“ bringen kann. Die Elektrizitätswerke schreiben infolgedessen bei derartigen Anschlußanlagen die höchstzulässigen Stromstöße vor, um einem solchen Übelstande sicher vorzubeugen, und man ist dann gezwungen, um normale Motoren also nicht solche mit besonders geringer Schlüpfung für das Anwerfen verwenden zu können, den asynchronen Anwurfsmotor mit der nächsthöheren als der durch den Synchronmotor verlangten Drehzahl zu wählen. Die Verminderung der Umdrehungszahl des Asynchronmotors wird in der Regel am einfachsten mittels eines regelbaren Widerstandes im Läuferstromkreise vorgenommen, was mit Rücksicht auf die kurze Betriebsdauer unbedenklich ist. Da ein solcher Regelanlasser aus dem im I. Abschnitte angeführten Gründen schon recht beträchtliche Abmessungen erhalten muß und dadurch teuer wird, kann man sich einfacher auch in der Weise helfen, daß man zwischen die Welle des Anwurfsmotors und diejenige des Motorgenerators eine Reduktionskupplung, eine Zahnradübersetzung od. dgl. einschaltet. Kann durch ein solches Zwischenglied die synchrone Drehzahl nicht genau erreicht werden, dann nimmt man für die letzte Einstellung den Anlasser zur Hilfe, der so aber bedeutend kleiner ausfällt.

Die Leistung des Anwurfsmotors kann ebenfalls im Mittel zu etwa $\frac{1}{4}$ derjenigen des Motorgenerators angenommen werden, doch empfiehlt es sich, die Entscheidung wiederum dem Konstrukteur zu überlassen, der die Leistung aus den zu beschleunigenden Massen von Fall zu Fall ermitteln muß. Da der Anwurfsmotor nur während der Zeit des Inbetriebsetzens und des Synchronisierens unter Last läuft, kann er in seiner Größe für intermittierenden Betrieb gewählt werden; er wird infolgedessen kleiner und billiger. Ist die vorhandene Netzspannung für den Anwurfsmotor zu hoch, dann muß man einen Transformator vorschalten.

Der Anwurfsmotor sollte stets in der Form an den Motorgenerator angebaut werden, daß er leicht abgekuppelt werden kann, nachdem der Synchronmotor auf das Netz geschaltet worden ist. Es ist dieses insofern vorteilhaft, als der Motor im Betriebe so nicht nutzlos mitläuft, und der Gesamtwirkungsgrad des Motorgenerators nicht durch die für den leerlaufenden Anwurfsmotor abzugebende Arbeit verschlechtert wird. Bei kleineren Motorgeneratoren erreicht man dieses, indem man den Anwurfsmotor auf eine Wippe setzt und die Übertragung durch eine entsprechend ausgebildete Kupplung vornimmt, während bei größeren Maschinensätzen ausrückbare Klauenkupplungen od. dgl. benutzt werden.

In Tafel I Fig. III ist das vollständige Schaltungsbild eines auf diese Weise anzulassenden Motorgenerators wiedergegeben. Derselbe ist mit einer besonderen Erregermaschine mit Compoundwicklung aus-

gestattet, was dann empfehlenswert ist, wenn mit starken Belastungsschwankungen auf der Gleichstromseite zu rechnen ist. Sonst steht natürlich nichts im Wege, die Erregung auch von dem Gleichstromgenerator aus vorzunehmen. Angenommen ist ferner, daß die Netzspannung auf der Drehstromseite wiederum 3000 Volt beträgt. Besonders interessant ist der Vergleich der Fig. I bis III der Tafel I, aus dem man leicht erkennen wird, wie groß z. B. die Zahl der Apparate und Instrumente ist, die für die verschiedenen Formen der Inbetriebsetzung notwendig, welche Schaltungen vorzunehmen sind u. dgl. m.

Die Vorteile, den Motorgenerator mit einem Synchronmotor auszurüsten, bestehen zusammengefaßt darin, daß einmal der Leistungsfaktor des Netzes verbessert, also die Generatoren im Kraftwerke besser ausgenutzt werden können, und daß ferner der Wirkungsgrad und die Stromaufnahme eines solchen Maschinensatzes günstiger sind, als wenn ein asynchroner Motor zum Antriebe des Gleichstromgenerators verwendet wird. Auch dort ist er besonders am Platze, wo er bald Gleichstrom und bald Wechselstrom abgeben muß, weil eben der Synchronmotor ohne weiteres auch Energie liefern kann. Demgegenüber stehen aber die Nachteile der umständlichen Inbetriebsetzung, die nur von einem geschulten Personal vorgenommen werden kann und im Gegensatz zum asynchronen Motor recht viel Zeit in Anspruch nimmt (Anwerfen, Parallelschalten usw.), und ferner der Abhängigkeit eines guten Betriebes des Synchronmotors von der Spannung des zugeführten Stromes. Wenn dieselbe starken Schwankungen unterworfen ist, die eine bestimmte Höhe überschreiten, oder durch Ausgleichströme starke Pendelungen des Stromes hervorgerufen werden, dann wird der Gang des Motors unstabil, und er bleibt unter Umständen stehen (er fällt „aus dem Tritt“). Hinsichtlich Abmessungen, Wirkungsgrade, Gewichte usw. sei auf die Tabelle VIII verwiesen.

29. Der asynchrone Motorgenerator.

Ist die Bedingung, den Leistungsfaktor des Drehstromnetzes zu regeln, nicht gestellt, dann wählt man lieber den asynchronen Motorgenerator, der in einfachster Weise durch die Kupplung zweier normaler Maschinen — eines asynchronen Motors mit einem Gleichstromgenerator — hergestellt wird. Für die mechanische Ausführung des Maschinensatzes ist das zu Anfang dieses Abschnittes Gesagte zu berücksichtigen.

Das Anlassen eines solchen Motorgenerators macht keine Schwierigkeiten und erfordert keine besondere Vorsicht. Auch die Apparate und Instrumente sind an Zahl geringer, und das Parallelschalten fällt in der Regel fort. In Fig. 115 und Taf. II ist das Schaltungsschema für einen derartigen Motorgenerator gezeichnet. Fig. 115 bedarf keiner besonderen Erläuterung. Auch hier sei empfohlen, die Schemata der Tafel I mit der Fig. 115 zu vergleichen. Man wird daraus ein recht interessantes Bild über den gesamten elektrischen Aufbau der verschiedenen Anordnungen gewinnen.

Die Vorteile, die für die Verwendung eines asynchronen Motorgenerators sprechen, sind: schnelle und leichte Inbetriebsetzung, Fortfall der besonderen Erregung und im allgemeinen des Parallelschaltens,

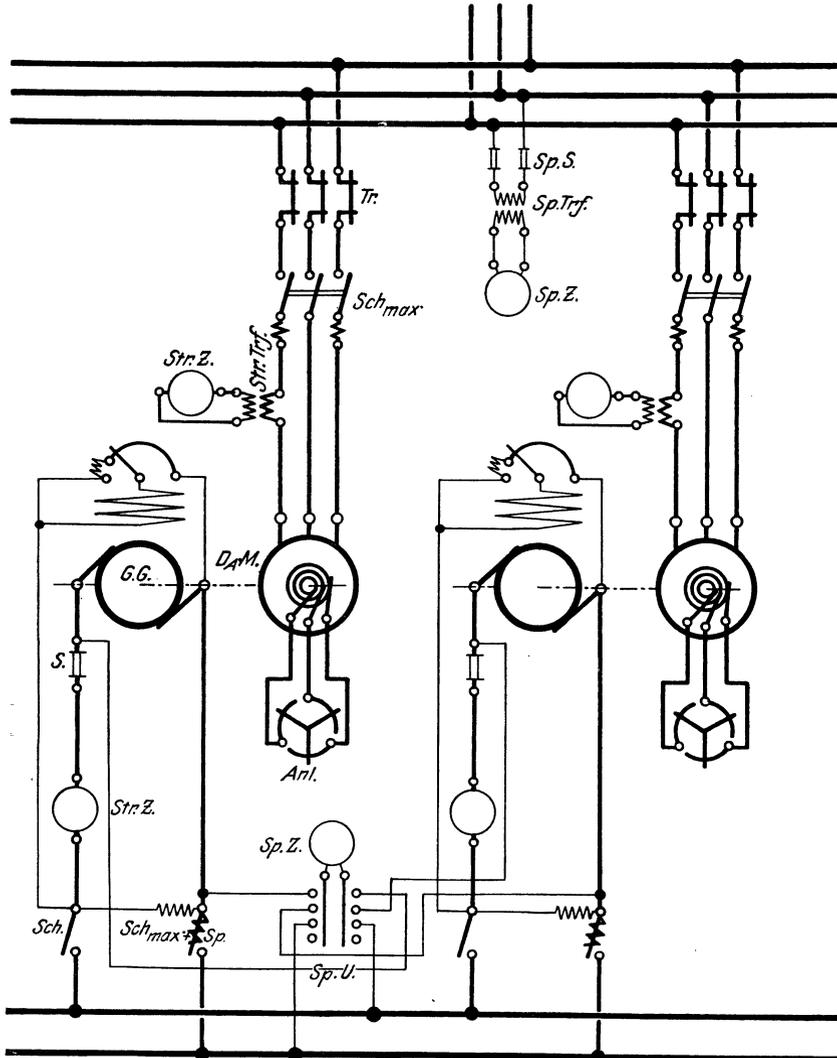


Fig. 115. Schaltungsschema für eine Motorgenerator-Anlage mit Drehstrom-Asynchronmotoren.

billigerer Preis und geringere Raumbeanspruchung. Ferner ist er auch dort zu benutzen, wo es sich darum handelt, großen Stromstößen durch die Anwendung von Schwungmassen, Schlupfreglern usw. zu begegnen. Hierbei kann im übrigen der asynchrone Motorgenerator

durch keinen anderen Umformer völlig befriedigend ersetzt werden. Schließlich ist die Überlastungsfähigkeit größer als beim Synchron-Motorgenerator, und ein „Außertrittfallen“ ist nicht zu befürchten. Auch durch Pendelungen des zugeführten Stromes wird der Asynchronmotor nicht gestört. Angaben über Gewicht, Raumabmessungen, Wirkungsgrade usw. finden sich ebenfalls in Tabelle VIII. Die Nachteile liegen: in einem schlechteren Gesamtwirkungsgrade, in der Aufnahme wattlosen Stromes aus dem Netze, also Verschlechterung des Leistungsfaktors und in dem größeren Stromverbrauche, denn es ist z. B.:

für einen 100 PS, 3000 Volt Drehstrom-Synchronmotor bei $\cos\varphi = 1$:

$$J_{S.M.} = \frac{736 \cdot \text{PS}}{E_k \cdot \sqrt{3} \cdot \eta_M} = \frac{736 \cdot 100}{3000 \cdot 1,73 \cdot 0,935} = 15,2 \text{ Amp.},$$

und für einen gleich großen Asynchronmotor:

$$J_{A.M.} = \frac{736 \cdot \text{PS}}{E_k \cdot \sqrt{3} \cdot \eta_M \cdot \cos\varphi_M} = \frac{736 \cdot 100}{3000 \cdot 1,73 \cdot 0,92 \cdot 0,86} = 18 \text{ Amp.},$$

also ist $J_{A.M.}$ ca. 20% größer, was bei einer umfangreicheren Anlage schon von bedeutendem Einflusse sein kann, und jedenfalls nicht außer acht gelassen werden darf.

Da der Drehstrommotor eines Motorgenerators nur unter geringer Last anläuft, so kann man statt des Schleifringanker-Motors auch einen solchen mit Kurzschlußanker verwenden. Ein solcher Kurzschlußanker-Motor hat natürlich die Vorteile, daß die Schleifringe, Bürstenabhebevorrichtung, der Anlasser und die Leitungen zu letzterem fortfallen, und auch der Motor selbst billiger wird; aber es bestehen hinsichtlich des Anlassens, wie schon im I. Abschnitte ausführlich besprochen, manche Schwierigkeiten, weil zumeist ein unmittelbares Einschalten auf das Netz wegen der hohen dabei auftretenden Anlaufstromstärke nicht statthaft ist. Der Stromstoß kann indessen wenn auch nicht völlig vermieden, so doch wenigstens stark vermindert werden¹⁾, wenn der Motor vor dem Anschalten auf das Netz möglichst nahe auf die synchrone Drehzahl gebracht wird, der die Leerlaufsdrehzahl entspricht; man muß ihn dann aber gewissermaßen ebenfalls synchronisieren.

Ist eine andere Gleichstromquelle vorhanden, so kann der Anlauf bzw. das allmähliche Hinauflaufen des Motors auf die Leerlaufsdrehzahl — die höchste, die der Motor erreichen kann — von der Gleichstromseite aus vorgenommen werden wie im Falle b) beim Synchron-Motorgenerator. Ist das nicht möglich, dann muß man entweder einen Anlaßtransformator (siehe S. 66) oder einen besonderen kleinen Anwurfmotor benutzen, der wieder wie bei dem synchronen Motorgenerator nach der Synchronisierung abgeschaltet und dann mechanisch vom Um-

¹⁾ Dr. L. Fleischmann: Über Stromstöße beim Einschalten von Induktionsmotoren bei synchron laufendem Rotor. *El. u. Masch.* 1908, S. 45.

former abgetrennt wird. Auch beim Anlaßtransformator sind Stromstöße beim Anschalten des Motors auf das Netz nicht zu vermeiden; diese Methode wird daher bei Motorgeneratoren großer Leistung und bei kleinen Kraftwerken (Lichtwerken) nicht immer vorteilhaft sein.

Wählt man einen besonderen Anwurfsmotor, dann kann man für die Synchronisierung des Asynchronmotors die von Dr. F. Horschitz angegebene einfache Vorrichtung¹⁾ verwenden, die wie alle diese hierfür zu benutzenden Apparate auf der Messung der Schlüpfung beruht, weil der Motor ohne Verbindung mit dem Netze keine Spannung zu erzeugen vermag. Diese Vorrichtung (Asynchronoskop) besteht darin, daß die Welle des Motors zwei schmale Schleifringe S und S' (Fig. 116) und einen schmalen Kommutator K erhält, dessen Lamellenzahl gleich der Polzahl des Motors ist. Auf den beiden Schleifringen gleiten Bürsten a und b , welche mit je einem Leiter des Netzes — bei Spannungen bis 250 Volt unmittelbar und bei höheren Spannungen unter Zwischenschaltung eines Spannungstransformators — verbunden sind. Die voneinander isolierten Segmente des Kommutators sind abwechselnd mit einem der Schleifringe verbunden. Auf dem Kommutator schleifen zwei weitere Bürsten c und d , die mit einem polarisierten Spannungszeiger $Sp.Z.$ verbunden sind, dessen Nullpunkt in der Mitte der Skala liegt.

Durch diese Anordnung wird eine gesetzmäßige Kommutierung des Wechselstromes bewirkt; der Spannungszeiger zeigt stets den arithmetischen Mittelwert an. Der Zeiger des Instrumentes führt Schwingungen aus, die mit

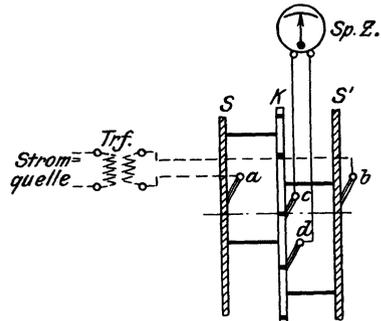


Fig. 116. Synchronisierschaltung für Asynchronmotoren nach Dr. F. Horschitz.

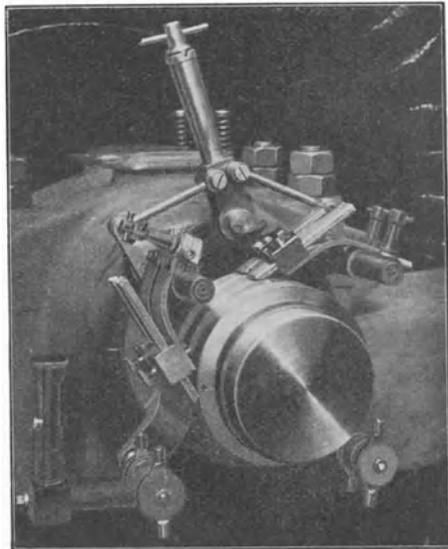


Fig. 117. Asynchronoskop nach Dr. F. Horschitz.

¹⁾ Dr. Felix Horschitz: Eine Synchronisierungsvorrichtung für Kurzschlußankeromotoren. E. T. Z. 1909, Heft 35 und E. K. B. 1909, Heft 29.

abnehmender Schlüpfung langsamer werden und ganz aufhören, sobald angenäherter Synchronismus vorhanden ist. Ist dieser Augenblick erreicht, dann kann der Hauptschalter des Drehstrommotors eingelegt werden. Die Fig. 117 zeigt die praktische Ausführung dieser Vorrichtung am Motor angebaut.

Zusammengefaßt sei nochmals besonders hervorgehoben, daß der Motorgenerator, da die beiden Maschinen elektrisch vollständig unabhängig voneinander sind, eine Regelung der Gleichstromspannung in beliebigen Grenzen, soweit dieses die Gleichstrommaschine überhaupt zuläßt, gestattet. Das ist ein weiterer Vorzug gegenüber den später zu behandelnden Umformern, der das Anwendungsgebiet des Motorgenerators ebenfalls und zwar nach ganz bestimmter Richtung festlegt.

30. Die Apparate im äußeren Stromkreise.

Schon bei der Behandlung der einzelnen Inbetriebsetzungs- und Regelungsformen und der Synchronisierung sind verschiedentlich die Apparate und Instrumente kurz erwähnt worden, die für die Durchführung eines ordnungsmäßigen Betriebes erforderlich sind. Weiter gilt hier sinngemäß auch alles das, was über die Verwendung von Sicherungen und Momenthebelschaltern, in Hochspannungsanlagen von selbsttätigen Ölschaltern, Trennschaltern, Meßinstrumenten mit Meßtransformatoren usw. im I. Abschnitte gesagt worden ist. Um indessen die Schemata der Tafel I und Tafel II mit den eingezeichneten Apparaten vollständiger zu verstehen, soll im nachfolgenden noch eine ausführlichere Erklärung derselben gegeben werden.

a) Der Synchron-Motorgenerator. (Tafel I Fig. I.) Es handle sich um nur einen Motorgenerator. Erweiterungen in der Gleichstromanlage seien ausgeschlossen. Die zur Verfügung stehende Drehstromspannung soll so hoch sein, daß der Synchronmotor für dieselbe nicht mehr gewickelt werden kann. Demzufolge ist der Drehstromtransformator *D.Trf.* (in Sternverbindung der Wicklungsenden) vorgeschaltet. Damit man nun die Maschine mit ihren sämtlichen Apparaten jederzeit vollständig spannungslos machen kann, ohne den Transformator oder die Zuführungsleitungen im Kraftwerke abschalten zu müssen, was zumeist nicht zugänglich ist, weil noch andere Stromverbraucher an dieselbe Leitung angeschlossen sind, werden drehstrom-niederspannungsseitig die Trennschalter *Tr.* (siehe S. 280) eingebaut. Es folgen dann: der dreipolige Hauptschalter *Sch.*, der nach der Synchronisierung zur Verbindung des Synchronmotors mit dem Netz dient, und drei einpolige Streifensicherungen *S.*, was unbedenklich ist, wenn die Spannung 500 Volt und die Leistung etwa 100 PS nicht übersteigen. Da dem Schema diese Verhältnisse zugrunde liegen, konnten Meßtransformatoren für die Meßinstrumente in Fortfall kommen. Zur Feststellung der Stromstärke dient ein Stromzeiger *Str.Z.*; für die Leistungsmessung in KW ist ein Leistungszeiger *L.Z.* und für die Messung des Verbrauchs an

elektrischer Energie ein Zähler Z . vorgesehen. Der Leistungszeiger ist aus dem Grunde besonders empfehlenswert, weil er eine unmittelbare KW-Ablesung gestattet, was wie bei Gleichstrom durch Feststellung der Stromstärke und Multiplikation dieser mit der Spannung bei Wechselstrom mit Rücksicht auf den Leistungsfaktor $\cos\varphi$ nicht möglich ist.

Es soll nun an Hand der Tafel I Fig. I weiter das Einschalten des Synchronmotors auf das Netz besprochen werden, um daraus den entwerfenden Ingenieur erkennen zu lassen, in welcher Weise dieses zu geschehen hat, und welche Apparate und Instrumente hierfür vorzusehen sind.

Um einen Synchronmotor an das Netz anschließen zu können, ist es, wie bereits wiederholt angedeutet, erforderlich, ihn mit dem Netze d. h. mit den Maschinen des Kraftwerkes in Synchronismus zu bringen. Die Grundbedingungen für den Synchronismus sind: richtige Phasenfolge, gleiche Spannung mit der des Netzes, übereinstimmende Frequenz mit der der Kraftmaschinen und schließlich Phasengleichheit.

Die Ermittlung der richtigen Phasenfolge hat nur einmal und zwar vor der ersten Inbetriebsetzung zu erfolgen und geschieht im Anschlusse an die Montage. Werden die Anschlußleitungen vom Netze getrennt, was allerdings eigentlich nur vorkommt, wenn in diesen eine Störung zu beseitigen ist, dann muß das Prüfen der richtigen Phasenfolge naturgemäß wiederum vorgenommen werden. Um in solchen Fällen Irrtümer durch falsches Anschließen der Leitungen zu vermeiden, was z. B. bei verseilten Mehrleiterkabeln leicht vorkommen kann, empfiehlt es sich, die einzelnen Phasen beim Netzanschlusse und an dem Synchronmotor durch verschiedene Farben (verschiedenfarbig glasierte oder gestrichene Isolatoren u. dgl.) zu kennzeichnen. Ist ein asynchroner Drehstrommotor und ein Gleichstromnetz der gleichen Spannung wie diejenige des Gleichstromgenerators des Motorgenerators vorhanden, dann kann die Prüfung der Phasenfolge einfacher dadurch geschehen, daß man den Asynchronmotor einmal an das Netz und dann an den Synchronmotor, der zu diesem Zwecke als Generator angetrieben wird, anschließt. Dreht sich der Prüfmotor in beiden Fällen im gleichen Sinne, dann ist die Phasenfolge richtig. Im anderen Falle müssen die einzelnen Leitungen der einen Seite des Anschlusses gegeneinander so lange vertauscht werden, bis gleicher Drehsinn des Motors erreicht ist. Kann die Prüfung mit Hilfe eines solchen Motors nicht vorgenommen werden, dann bedient man sich eines sog. Drehfeldrichtungsanzeigers¹⁾.

Stimmen die Phasen nicht überein, und wird der Synchronmotor dabei auf das Netz geschaltet, dann werden die Maschinen des Kraftwerkes lediglich über den Widerstand, den die Ständerwicklung des Synchronmotors besitzt, und denjenigen der Zuführungsleitungen kurz-

¹⁾ Ein Drehfeldrichtungsanzeiger ist ein kleines Meßinstrument, das nach dem Drehfeldprinzip gebaut ist und eine Magnetnadel trägt, die sich je nach dem Anschluß der Phasen links oder rechts dreht.

geschlossen. Die Folge davon kann unter Umständen, wenn die selbsttätigen Schalter bzw. Sicherungen im Kraftwerke oder in der Umformstation nicht sofort den Strom unterbrechen, eine Beschädigung nicht nur des Synchronmotors, sondern auch der Stromerzeuger sein, und somit große Betriebsstörungen im Gefolge haben.

Die zweite Grundbedingung, daß die Spannungen an den Netzsammelschienen und am Synchronmotor die gleichen sind, wird durch den Vergleich der entsprechenden Spannungszeiger geprüft. Weichen die beiden Spannungen voneinander ab, dann fließen Ausgleichströme zwischen Kraftwerk und Synchronmotor, die ein Pendeln der Generatoren und damit Betriebsstörungen im Kraftwerke oder im Netze, wenn noch andere Synchronmotoren oder Einankerumformer angeschlossen sind, zur Folge haben können. Das Einregulieren des Synchronmotors auf die Netzspannung geschieht mit Hilfe des Erregerregulators *E.Reg.* Die Spannungen müssen natürlich unmittelbar vor dem Parallelschalten übereinstimmen.

Um schließlich festzustellen, ob Synchronismus vorhanden und weiter ob die Phasenfolge richtig ist, also für das eigentliche Parallelschalten benutzt man verschiedene Methoden, von denen hier indessen nur die einfachste und für Motorgeneratoren am häufigsten verwendete kurz erläutert werden soll. Es dienen dazu zwei oder drei Spannungszeiger und bei besonders reichlich mit Instrumenten ausgestatteten Anlagen noch ein Doppelfrequenzmesser, die in Niederspannungsanlagen bis 250 Volt nach Tafel I Fig. I unmittelbar und in Hochspannungsanlagen nach Tafel I Fig. II und III unter Benutzung von Meßtransformatoren (Spannungstransformatoren *Sp.Trf.*) an das Netz und den Synchronmotor angeschlossen werden. Zwei der Spannungszeiger dienen zum Vergleiche der Spannungen von Netz und Maschine, während mit dem dritten Spannungszeiger — in der Regel mit parallelgeschalteten Glühlampen (Phasenlampen) — die Phasenübereinstimmung beobachtet wird.

Diese Meßtransformatoren gestatten infolge der geringen Höhe von Spannung bzw. Strom sekundär die getrennte Installierung derselben und der Meßinstrumente, und infolgedessen kann, wie hier nur kurz eingeflochten sein soll, die gesamte Schaltanlage ganz nach den vorteilhaftesten Gesichtspunkten ausgeführt werden, ohne also an den Aufstellungsort der Schalttafel gebunden zu sein. Für die Verbindung zwischen Meßtransformator und Instrument sind dann nur schwache Leitungen einfachster Art zu wählen, deren Querschnitt nach der Eichung der Instrumente zu bestimmen ist.

Haben Netz und Maschine gleiche Spannung und übereinstimmende Phase bei gleicher Frequenz, dann sind — im allgemeineren Fall bei Verwendung von Meßtransformatoren — die Spannungen dieser am Netz- und Maschinenspannungszeiger einander gleich und in gleicher Phase. In einem Augenblicke werden sie, da sie (vgl. Schemas der Tafel I) gegeneinander geschaltet sind, die durch einen Pfeil angedeutete Richtung haben, sich also gegenseitig aufheben. Der mittlere Span-

nungszeiger — der sog. Phasenzeiger — steht dann auf Null, zeigt also keinen Ausschlag, und die Lampen leuchten nicht. Man nennt daher diese Schaltung auch die Dunkelschaltung¹⁾. In diesem Augenblicke muß der Hauptschalter *Sch.* bzw. *Sch.*_{max} geschlossen werden, und der Synchronmotor ist damit parallelgeschaltet.

Sind die Frequenzen gleich, liegen aber die Spannungen um 180° auseinander, dann zeigen die beiden Spannungszeiger wohl die gleiche Spannungshöhe an, aber der Zeiger des Phasenzeigers geht nicht auf den Nullpunkt zurück, sondern die Spannungen addieren sich, und das Instrument zeigt die doppelte Spannung an, bzw. die Lampen leuchten mit voller Lichtstärke. Hieraus geht hervor, daß sowohl der Phasenzeiger als auch die Lampen die doppelte Spannung bei unmittelbarem Anschluß des Netzes — bei Zwischenschaltung von Meßtransformatoren das Doppelte der Unterspannung dieser — erhalten können, und es empfiehlt sich daher, die Lampen für die normale Spannung zu wählen und stets zwei derselben hintereinander zu schalten. Wird nur eine Lampe verwendet, dann besteht beim Durchbrennen derselben die Gefahr, daß der Phasenzeiger beschädigt wird. In allen anderen Fällen der Lage der Phasen von Netz und Motor zueinander ist der Phasenzeiger nicht in Ruhe, bzw. die Lampen brennen periodisch heller und dunkler. Der Doppelfrequenzmesser gestattet, unmittelbar zu erkennen, wie stark die Frequenzen von Netz und Maschine voneinander abweichen, und er gibt in diesem Falle dem Schalttafelwärter an, ob er die Drehzahl des Synchronmotors zu erhöhen oder herabzusetzen hat.

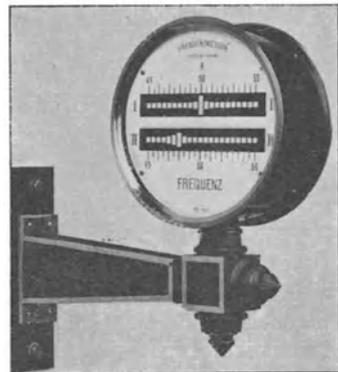


Fig. 118. Doppelfrequenzmesser von Siemens & Halske A. G.

Die Frequenzmesser sind Apparate, die die Geschwindigkeit der angeschlossenen Maschinen anzeigen. Als Schalttafelinstrumente werden sie in der in Fig. 118 dargestellten Form u. a. von Hartmann & Braun und der Siemens & Halske A. G. hergestellt. Diese Instrumente sind sog. Zungeninstrumente (System Frahm); sie beruhen auf dem Resonanzprinzip und zwar auf folgender Erscheinung: Bei S. & H. ist auf einem einzigen gemeinsamen Stege (Fig. 119), der von einem Magneten in Schwingungen versetzt wird, eine Anzahl mit Fähnchen versehener abgestimmter Federn nebeneinander befestigt.

¹⁾ Durch eine Änderung der Schaltung der Lampen läßt sich auch erreichen, daß dieselben den Augenblick für die Parallelschaltung durch volles Aufleuchten anzeigen (sog. „Hellschaltung“). Auf die Vorzüge und Nachteile dieser und der sonst noch gebräuchlichen Parallelschaltungsvorrichtungen wird erst im II. Bande ausführlicher eingegangen werden.

Der Magnet wird von dem zu untersuchenden Wechselstrome erregt und in Schwingungen gebracht, die synchron zum Wechselstrome sind. Diejenige Zunge, welche mit der Frequenz des Wechselstromes zur Resonanz kommt, gerät in heftige Schwingungen, was sich durch die Breite des Fähnchens auf der sichtbaren Skala markiert (Fig. 118).

Solche Frequenzmesser zeichnen sich besonders dadurch aus, daß ihre Angaben unabhängig sind von Spannungsschwankungen, und daß sie von äußeren magnetischen Feldern nicht beeinflusst werden.

Damit man nun ferner, auch wenn der Umformer nicht läuft, oder nach Reparaturen am Transformator bzw. der Fernleitung jederzeit feststellen kann, ob wieder Spannung drehstromseitig vorhanden ist,

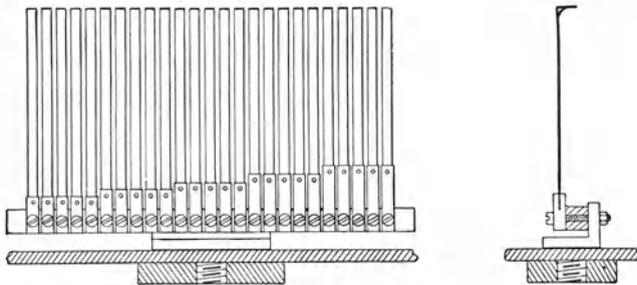


Fig. 119. Zungensystem (Frahm) für Frequenzmesser.

ist der Netzspannungszeiger vor den Trennschaltern abgezweigt und durch einen kleinen Schalter *Sch.* abschaltbar. Werden die Spannungszeiger nicht mehr benutzt, so sind sie durch diesen Schalter und den Spannungszeiger-Umschalter *Sp.U.* leicht abzutrennen.

Zur Inbetriebsetzung dieses Motorgenerators soll die Erregermaschine $G_E. G.$ verwendet und der Gleichstrom von der Akkumulatorenbatterie geliefert werden. Ganz allgemein ist nun darauf zu achten, daß im Erregerstromkreise keine Sicherungen liegen, damit die Gefahr vermieden wird, daß dieselben unbemerkt abschmelzen und der Synchronmotor dann ohne Erregung arbeitet. Er würde in einem solchen Falle sofort das Bestreben haben, eine unzulässig hohe Drehzahl anzunehmen, oder kurz gesagt „durchgehen“. Aus diesem Grunde sind die Sicherungen *S.* im Stromkreise des Gleichstrom-Erregergenerators $G_E. G.$ nur dazu da, die Erregermaschine, wenn sie als Motor arbeitet, vor Überlastung zu schützen. Die Erregerleitungen zum Synchronmotor sind vor diesen Sicherungen abgezweigt, während dann, wenn $G_E. G.$ als Generator Strom für die Erregung liefert, keine Sicherungen mehr im Stromkreise liegen. Damit ferner jede Betätigung des Umschalters *U.* im Betriebe z. B. durch Unvorsichtigkeit vermieden wird, ist derselbe zweckmäßig derart anzuordnen bzw. auszuführen, daß er durch eine mechanische Vorrichtung in richtiger Betriebslage verschlossen wird und nur durch den unterrichteten Schalttafelwärter bedient also entsperrt werden kann. Zur Messung der Erregerstromstärke

dient der Stromzeiger *Str.Z.*, während der Spannungszeiger *Sp.Z.* für die Ausführung von Messungen der Spannung an verschiedenen Stellen der Maschinenanlage mit einem Umschalter *Sp.U.* versehen ist.

Der Gleichstromgenerator erhält unter den gleichen Gesichtspunkten wie auf S. 24 angegeben in dem einen Pole Schalter *Sch.* und Sicherung *S.*, in dem zweiten Pole einen selbsttätig wirkenden Schalter *Sch._{max}*, der sowohl bei Überlastung als auch beim Sinken der erzeugten Gleichstromspannung unter einen bestimmten Wert anspricht. Das ist notwendig, weil die Akkumulatorenbatterie vorhanden ist (S. 132). Diese letztere soll für die Inbetriebsetzung und zur Beleuchtung während der Nacht dienen, und wird durch einen kleinen Gleichstromgenerator *G.G.*, der mit einem Gleichstrommotor gekuppelt ist, geladen. Die Ladung kann natürlich nur dann erfolgen, wenn der Motorgenerator arbeitet.

Tafel I Fig. II. Diesem Schema liegt die Annahme zugrunde, daß der Synchronmotor mit Hochspannung unmittelbar betrieben wird. Demzufolge sind nicht Sicherungen und Luftschalter, sondern ein automatischer Ölschalter *Sch._{max}* gewählt worden, und die Meßinstrumente, wie Spannungs-, Strom- und Leistungszeiger, müssen an Meßtransformatoren (*Str.Trf.* u. *Sp.Trf.*) angeschlossen werden. Diese letzteren sind so bemessen, daß mit ihnen gleichzeitig mehrere Instrumente verbunden werden können.

An Stelle des einpoligen Spannungszeiger-Umschalters für den Gleichstromgenerator der Fig. I sind hier zweipolige Umschalter benutzt, um nach jeder Richtung unabhängig zu sein.

Der Erregerstromkreis des Synchronmotors liegt ohne Sicherungen fest an den Gleichstrom-Sammelschienen. Der doppelpolige Schalter *Sch.* könnte fortfallen, weil der Erregerregulator nach dem Stillsetzen des Maschinensatzes die Erregerwicklung kurzschließt, sie also dadurch gewissermaßen vom Netze abschaltet. Er dient hier nur dazu, im Bedarfsfalle auch den Erregerregulator abzutrennen, wenn die Erregerspannung z. B. 500 Volt beträgt, also eine gefährliche Höhe hat. Ist der besondere Kontakt am Regler nicht vorhanden, dann muß der Schalter *Sch.* unbedingt eingebaut werden, um den Erregerstromkreis nach Stillsetzen des Umformers stromlos machen zu können, da die Wicklung sonst dauernd Energie aufnehmen und, weil die Kühlung durch das laufende Magnetrad fehlt, zu Schaden kommen würde. Dieser Schalter ist aber ebenfalls ganz besonders vor unrichtiger Betätigung zu sichern.

Tafel I Fig. III. Bei diesem Schema ist besonders darauf hinzuweisen, daß der Stromkreis für den Anwurfsmotor zu hohe Spannung hat, und infolgedessen ein Transformator zwischengeschaltet werden muß. Um nun die Apparate für diesen ganz sekundären Teil des Motorgenerators auf das geringste Maß zu beschränken, ist nur ein automatischer Schalter vor dem Transformator installiert, der nach der Anlaufperiode ausgeschaltet wird und damit auch den Transformator stillsetzt, also unnötige Energieverluste durch den leerlaufenden Transformator (siehe S. 199) vermieden werden. Um auch den Ölschalter und den Trans-

formator des Motors ohne weitere Betriebsstörung des Umformers untersuchen zu können, sind wiederum die billigen und einfachen Trennmesser *Tr.* vorgesehen.

b) Der asynchrone Motorgenerator. In Tafel II ist das vollständige Schaltschema der elektrischen Anlage für ein großes industrielles Unternehmen abgebildet, das des Interesses wegen ebenfalls ausführlicher besprochen werden soll.

Der elektrische Strom, der zum Betriebe einer ausgedehnten Sodafabrik dient, wird aus einem großen Überland-Kraftwerke bezogen. Er steht von einer Transformatorenstation in unmittelbarer Nähe der Fabrik als Drehstrom mit einer Niederspannung von 3600 Volt und 42 Perioden in der Sekunde zur Verfügung und wird einer Umformerstation auf dem Fabrikgrundstücke zugeführt. In der Maschinenhalle sind zurzeit vier Umformergruppen aufgestellt. Der fertige Ausbau soll fünf Einheiten umfassen, was im Schaltschema dadurch berücksichtigt ist, daß alle fünf Aggregate eingezeichnet sind. Jede Gruppe besteht aus einem asynchronen Drehstrommotor *D_A.M.* von 650 PS bei 310 minutlichen Umdrehungen mit Schleifringläufer und Anlasser *Anl.* und einem mittels elastischer Kupplung gekuppelten Gleichstromgenerator *G.G.* von 450 KW Leistung, welcher Strom von 150 Volt Spannung und 3000 Amper liefert.

Da die Drehstrommotoren für die Spannung von 3600 Volt vollkommen betriebssicher gewickelt werden können, ist eine weitere Herabtransformation der verfügbaren Drehstromspannung nicht notwendig.

An die Hauptsammelschienen sind nun die asynchronen Motorgeneratoren unter Zwischenschaltung von Trennschaltern *Tr.* und je eines automatischen Höchststrom-Ausschalters *Sch_{max}* angeschlossen. Die Relais *R.* dieser Schalter sind als Zeitrelais ausgebildet, die bewirken, daß der Schalter erst dann zur Auslösung kommt, wenn der Strom während einer bestimmten, einstellbaren Zeitdauer ein gewisses Maximum überschreitet. Mit Rücksicht auf die verhältnismäßig hohe Spannung sind diese Relais an Meßtransformatoren (Stromtransformatoren *Str.Trf.*) angeschlossen. Dadurch wird, wie bereits früher erwähnt, die Hochspannung von der Schalttafel ferngehalten. Nach den gleichen Gesichtspunkten sind auch die Stromzeiger *Str.Z.* auf der Drehstromseite mit Meßtransformatoren versehen.

Die Gleichstromgeneratoren erhalten ebenfalls je einen Stromzeiger *Str.Z.*, der hier der großen Stromstärken wegen an einen Chunt (geeichten Nebenschluß) *N_{str.}* angeschlossen ist. Dadurch wird die umständliche und kostspielige Heranführung der Gleichstromkabel- oder Kupferschienen aus dem Schaltraume nach der Bedienungstafel vermieden, und es sind nur schwache Leitungen für die Stromzeiger notwendig. Zur Messung der Gleichstromspannungen ist ein Spannungszeiger *Sp.Z.* vorgesehen, der an einem Spannungszeiger-Umschalter *Sp.U.* liegt. Mit Hilfe dieses Umschalters kann die Spannung jedes Generators geprüft werden.

Zur Sicherung der Gleichstromgeneratoren sind auch hier selbsttätig wirkende Maximal- und Minimalschalter eingebaut, erstere um zu verhindern, daß Überlastungen die Maschinen gefährden, letztere um beim unbemerkten Spannungsrückgange das Arbeiten der Generatoren als Motoren zu verhüten.

Von den Gleichstrom-Hauptsammelschienen zweigen die einzelnen Stromkreise für die Bogen- und Glühlampenbeleuchtung, für die elektrochemischen Apparate usw. ab, und zwar ist der positive und negative Pol für die Verteilung in der Schaltanlage räumlich vollständig getrennt angeordnet. Das ist auch für die Kabelführung zu den Arbeitsplätzen dann günstiger, wenn mehrere Einleiterkabel in einem Kabelgraben zusammenliegen. Die Pole können somit getrennt und Kurzschlüsse in den Verteilungsleitungen verhindert werden. In die Verbindungsleitungen zwischen Gleichstrom-Haupt- und Verteilungssammelschienen ist zur leichteren Betriebsprüfung je ein registrierender Strom- (*Registr. Str.Z.*) und Spannungszeiger (*Registr. Sp.Z.*) eingeschaltet. Der Stromzeiger liegt wiederum an einem besonderen Nebenschluß.

Der Drehstrom wird ferner über einen 47 PS asynchronen Motor-generator in Gleichstrom zur Speisung einer Akkumulatorenbatterie umgeformt. Diese Batterie dient als Gleichstromreserve, im Falle der Drehstrom einmal vollständig ausbleiben sollte, und sie wird unter Verwendung eines Einfach-Zellenschalters durch Spannungserhöhung des Gleichstromgenerators geladen.

Die Gleichstrom-Verteilungsschienen dieses Umformers können sowohl von dem Generator als auch von der Batterie Strom erhalten. Zu diesem Zwecke ist der Pluspol einmal und der Minuspol in der Sammelschienenanlage doppelt vorgesehen. Damit nun aber nicht die ganzen abgehenden Stromkreise im Notfalle, wenn die Batterie allein arbeitet, Strom aus derselben entnehmen können und dieselbe dann frühzeitiger als erwünscht zur Entladung bringen, sind nur die drei rechten Stromkreise durch Umschalter *U*. auf Generator oder auf Batterie umschaltbar.

Schließlich ist noch eine Anzahl kleinerer asynchroner Drehstrommotoren *D₄.M.* mit Strom zu versorgen. Da dieselben nun in den Arbeitsräumen verteilt stehen und durch unkundige Leute bedient werden müssen, schließlich auch der geringeren Leistungen wegen, muß die Spannung von 3600 Volt mittels eines Transformators weiter herabgesetzt werden, und zwar sind hier als Unterspannung 220 Volt gewählt. Hoch- und niederspannungsseitig sind Schmelzsicherung für diesen Transformator sowie einfache Schalter vorhanden. Strom- und Spannungszeiger auf der 220-Volt-Seite, die ohne Meßtransformatoren benutzbar sind, geben über das Arbeiten des Transformators Aufschluß.

Die Drehstrommotoren erhalten der geringen Spannung wegen einfache Sicherungen und Momenthebelschalter und werden, da sie mit Schleifringläufer ausgerüstet sind, durch Anlasser *Anl.* in Betrieb gesetzt. Nur ein Motor besitzt Kurzschlußanker und erhält mit Rücksicht auf möglichst geringe Stromstöße beim Anlaufe einen Stern-Dreieck-Umschalter.

Um jederzeit prüfen zu können, ob die Drehstrom-Sammelschienen unter Spannung stehen, ist noch ein General-Spannungszeiger installiert, der naturgemäß wiederum an einen Meßtransformator angeschlossen ist. Die Spannungstransformatoren erhalten stets Sicherungen *Sp.S.* aus den auf S. 292 erwähnten Gründen.

E. Der Einankerumformer.

31. Der Einankerumformer im allgemeinen.

Neben dem Motorgenerator kommt heute immer mehr der sog. Einankerumformer zur Verwendung, und zwar ist unter diesem eine Maschine zu verstehen, die, wie schon der Name sagt, nur mit einem Anker ausgerüstet ist.

Versieht man den Anker einer normalen Gleichstrommaschine mit einer unaufgeschnittenen Gleichstromwicklung, zapft diese Wicklung z. B. an drei um 120° versetzten Punkten an und verbindet diese Punkte mit drei Schleifringen, so kann man der Maschine, sofern sie durch eine äußere Kraft angetrieben wird, an dem Kollektor Gleichstrom und an den Schleifringen Drehstrom entnehmen. Man erhält also eine „Doppelstrommaschine“, die sich in dieser Form in der Praxis bisher indessen nur wenig eingebürgert hat, weil ein elektrisch vollkommen zufriedenstellendes Arbeiten nicht immer erreicht werden kann, und zweierlei Stromarten mit je verhältnismäßig geringer Leistung in ein und derselben Anlage nicht oft anzutreffen sind. Verfährt man dagegen in der Weise, daß man keine besondere mechanische Kraft zum Antriebe einer solchen Maschine aufwendet, sondern einer der beiden Seiten Strom — also entweder Gleichstrom oder Ein- bzw. Mehrphasen-Wechselstrom — zuführt, so kann man auf der anderen Seite entsprechend Wechselstrom oder Gleichstrom abnehmen; es erfolgt dabei innerhalb des Ankers der Maschine eine Umformung der Stromart. In Fig. 120 ist das Stromlaufschema der Maschine und in Fig. 121 ein solcher Umformer im Schnitt abgebildet.

Daraus, daß also statt wie beim Motorgenerator mit zwei Maschinen nur durch eine einzige Maschine eine gegebene Stromart in eine andere umgeformt wird, entspringt für den Einankerumformer zunächst der große Vorteil der Raumersparnis, der schon für eine ganze Reihe von Anlagen den Ausschlag geben wird, sich eines solchen Einankerumformers zu bedienen. Das ist, um aus den vielen Fällen einen herauszugreifen z. B. bei städtischen Anlagen von hervorragender Bedeutung, wenn bei der fortschreitenden Ausdehnung eines vorhandenen Gleichstromnetzes für Licht- und Kraftabgabe oder für Speisung einer elektrischen Bahn die Stromzuführung von dem entfernt gelegenen Kraftwerke zu neuen Anschlußgebieten oder Hauptspeisepunkten wegen des

Verlustes in den Speisekabeln und der hohen Anschaffungskosten für diese nicht mehr Gleichstrom diesen Punkten unmittelbar zugeführt werden kann. Es muß dann dazu übergegangen werden, hochgespannten Drehstrom bis in die Nähe der Speisepunkte oder neuen Hauptanschlußstellen zu führen und denselben dort umzuformen. Wie schon in der Einleitung zu diesem Abschnitte gesagt, sind die Bodenpreise für die Errichtung derartiger Umformerwerke in der Regel so hohe, daß der Raum auf das kleinste Maß beschränkt werden muß, und also ein neues Kraftwerk nicht mehr gebaut werden kann ganz abgesehen von den Schwierigkeiten hinsichtlich der Kohlenzufuhr, der Beseitigung der Rauch- und Rußbelästigung, der Geräuschbildung usw.

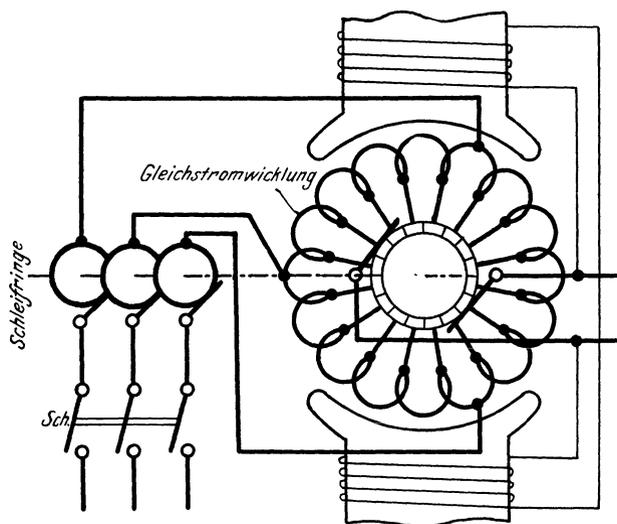


Fig. 120. Stromlaufschema des Einankerumformers.

Hier ist der Einankerumformer die gegebene und geeignetste Maschine, soweit derselbe natürlich in seiner Arbeitsweise den gestellten Betriebsbedingungen genügen kann.

Aber nicht allein in der geringen Raumbeanspruchung liegt der Hauptvorteil des Einankerumformers anderen Umformern gegenüber, sondern er hat auch elektrisch besondere Eigenheiten, die ihm unter bestimmten Verhältnissen den Vorrang vor dem Motorgenerator geben. Hierauf wird jedoch erst weiter unten näher eingegangen werden.

Aus dem Stromlaufschema der Maschine Fig. 120 ist ersichtlich, daß bei einem Einankerumformer die Gleichstrom- und die Wechselstromspannung ganz gleichgültig, ob die eine von einem vorhandenen Netze aufgedrückt und die andere erzeugt wird, oder beide erzeugt werden, in einem bestimmten Abhängig-

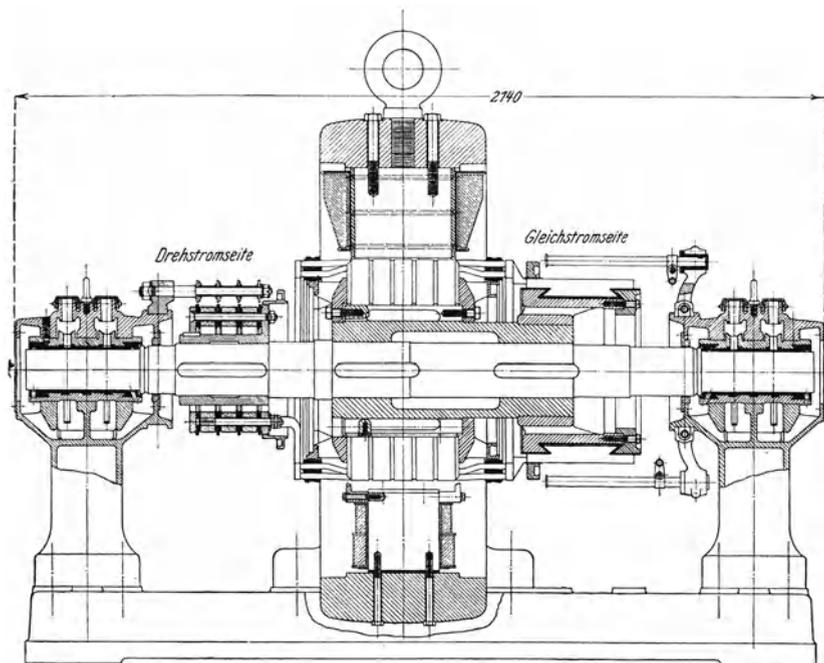


Fig. 121 a. Schnitt durch einen Einankerumformer.

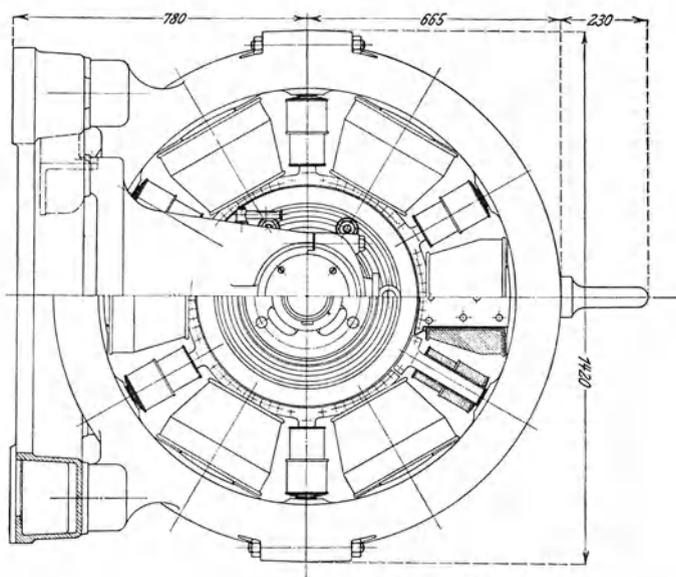


Fig. 121 b.

keitsverhältnisse zueinander stehen müssen, weil nur eine Erregung und eine Ankerwicklung vorhanden ist. Ohne auf besondere theoretische Erörterungen¹⁾ einzugehen, ergibt sich dieses Spannungsverhältnis, wenn mit E_W die Wechselstromspannung, mit E_G die Gleichstromspannung und mit u das Übersetzungsverhältnis beider bezeichnet wird:

$$u = \frac{E_W}{E_G}, \quad E_W = u \cdot E_G, \quad (83)$$

bzw. für die verschiedenen praktisch vorkommenden Fälle berechnet:

Tabelle III.

$E_W = 0,707 \cdot E_G$	bei Einphasenstrom
$E_W = 0,61 \cdot E_G$	bei Drehstrom
$E_W = 0,354 \cdot E_G$	bei Sechssphasenstrom

unter der Voraussetzung sinusförmigen Verlaufes der Wechselstromspannungskurve. Die Gleichstromspannung ist also stets größer als die Wechselstromspannung. Wenn man demnach Drehstrom in Gleichstrom von 220 Volt umformen will, so muß die Spannung des Drehstromes $0,61 \cdot 220 = 134$ Volt betragen. Da aber nun der Drehstrom sowohl in der einen wie auch in der anderen Richtung der Umformung mit so niedriger Spannung in der Mehrzahl der Fälle nicht vorteilhaft ist, muß auf der Drehstromseite zumeist noch ein Transformator eingeschaltet werden, denn gerade die Möglichkeit, bei Wechselstrom mit hohen Spannungen arbeiten zu können, gibt demselben das große Anwendungsgebiet bei allen Kraftübertragungsanlagen.

Der dem Anker über die Schleifringe zugeführte Ein- oder Mehrphasenstrom — wenn z. B. angenommen wird, daß der Einankerumformer als Drehstrom-Gleichstromumformer arbeitet — und der erzeugte, vom Kollektor entnommene Gleichstrom heben sich im Anker zum Teil auf. Der resultierende Strom muß infolgedessen, da er kleiner als der normale ist, geringeren Eisen- und Stromwärmeverlust ergeben, als der in einem Gleichstromgenerator gleicher Leistung in der Ankerwicklung fließende Gleichstrom. Der Einankerumformer kann daher wesentlich größere Leistung hergeben als eine Gleichstrommaschine gleicher Größe. Die Verhältnisse werden um so günstiger, je größer die Phasenzahl des Wechselstromes ist; man führt demnach den Mehrphasenstrom wenn irgend tunlich der Ankerwicklung nicht nur an drei um 120° auseinander liegenden Punkten zu (verkettete Schaltung), sondern löst die Verkettung auf, erhält dann sechs Wicklungsenden, benutzt sechs Schleifringe am Umformer und versetzt die Anschlußpunkte der Ankerwicklung um je 60 Phasengrade gegeneinander. Dabei ist die Anlage der Zuführungsleitungen an sich

¹⁾ Siehe E. Arnold: Die Wechselstromtechnik. Bd. 3 u. 4.

nicht zu ändern, denn die Auflösung der Verkettung wird nur angewendet, wenn ein Transformator notwendig ist, und sie erfolgt stets auf der Niederspannungsseite desselben.

Wie oben gesagt, sind also auch die Verhältnisse zwischen zugeführtem und abgenommenem Strome verschieden, und zwar ist:

Tabelle IV.

$J_W = 1,41 \cdot J_G$	bei dem Einphasenumformer
$J_W = 0,94 \cdot J_G$	„ „ Dreiphasenumformer
$J_W = 0,47 \cdot J_G$	„ „ Sechsphasenumformer

Diese Werte stellen indessen nur die dem entnommenen Gleichstrom entsprechenden Komponenten des Wechselstromes dar; sie erhöhen sich um ein geringes durch den Leerlaufstrom des Umformers, und ferner auch dann, wenn zwischen Strom und Spannung Phasenverschiebung vorhanden ist. Die Leistung, die eine solche Maschine abgeben kann, wenn sie statt als einfacher Gleichstromgenerator als Einankerumformer betrieben wird, zeigt die folgende tabellarische Zusammenstellung:

Tabelle V.

reine Gleichstromleistung	$= L_G$
Leistung als Einphasenumformer	$0,85 \cdot L_G$
„ „ Dreiphasenumformer	$1,34 \cdot L_G$
„ „ Sechsphasenumformer	$1,96 \cdot L_G$

Besteht keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, ist also der Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$, dann ist die Ausnutzung des Umformers die höchst erreichbare, weil die Ankerrückwirkung der Wechselstromseite gleich und entgegengesetzt der Ankerrückwirkung der Gleichstromseite ist; die resultierende Ankerrückwirkung wird infolgedessen annähernd gleich Null.

Daß diese Maschine gegenüber der Bauart als einfache Gleichstrommaschine als Einankerumformer mit lamellierten Polschuhen und gegebenenfalls auch lamellierten Polen hergestellt werden muß, um die Erwärmung durch Wirbelströme und die Energieverluste noch weiter herabzumindern und dadurch den Wirkungsgrad zu erhöhen, ist heute selbstverständlich.

Der Gesamtwirkungsgrad eines Einankerumformers ist nun selbst dann, wenn dem Umformer auf der Drehstromseite ein Transformator vorgeschaltet wird, wesentlich höher als derjenige eines Motorgenerators. Das hat seine Gründe darin, daß einmal die dem Umformer zugeführte elektrische Energie unmittelbar wieder in elektrische Energie umgeformt wird, die Umwandlung zunächst in mecha-

nische Arbeit und dann zurück in elektrische Energie wie beim Motor-generator also vermieden ist, und wie bereits gesagt, die Verluste kleiner ausfallen als beim Motor-generator. Es ist daher für die Wahl zwischen diesen beiden Umformern allein nur die Arbeitsweise bzw. das Verhalten bestimmten Betriebsbedingungen gegenüber ausschlaggebend, denn sonst ist der Einankerumformer immer vorteilhafter und auch billiger im Anschaffungspreise selbst unter Einschluß eines Transformators. In den Tabellen VI, VII und VIII sind die Wirkungsgrade, Gewichte und Abmessungen für synchrone und asynchrone Motorgeneratoren und Einankerumformer zusammengestellt, und sie lassen die Vorzüge des Einankerumformers in den zum Vergleiche stehenden Punkten deutlich erkennen:

Tabelle VI.

Wirkungsgradvergleich für Motor-generator und Einankerumformer.

Motor-generator bestehend aus: Drehstrom-Synchronmotor, 3000 Volt, Frequenz 50, Gleichstrom-Nebenschlußgenerator, 300 KW, 220 Volt, Drehzahl 500 i. d. Min., Zweilagertyp				Drehstrom-Gleichstrom-Einanker- umformer mit Transformator, Sechschphasenschaltung, Drehstrom, 3000/134 Volt, Frequenz 50, Gleichstrom, 300 KW, 220 Volt, Drehzahl 500 i. d. Min.			
Wirkungsgrade in Prozenten							
Be- lastung	η_M	η_G	η_U	Be- lastung	η_T	η_{EU}	η_U
$\frac{1}{4}$	86,0	84,5	72,67	$\frac{1}{4}$	95,4	87,0	82,99
$\frac{1}{2}$	92,5	89,0	82,31	$\frac{1}{2}$	96,8	92,2	89,25
$\frac{3}{4}$	94,0	91,5	86,01	$\frac{3}{4}$	97,3	93,5	90,98
$\frac{4}{4}$	94,5	92,5	87,41	$\frac{4}{4}$	97,53	94,0	91,68

η_M Wirkungsgrad des Motors,
 η_G „ „ Generators,
 η_T „ „ Transformators,
 η_{EU} „ „ Einankerumformers,
 η_U „ „ der gesamten Umformung.

Siehe umstehende Tabelle VII.

32. Die Erregung und die Spannungsregelung.

a) **Die Erregung.** Für die folgenden Betrachtungen soll des leichteren Verständnisses wegen davon ausgegangen werden, daß der Einankerumformer als Drehstrom-Gleichstrom-Umformer arbeite, weil diese Form wohl am häufigsten anzutreffen ist. Eine sinngemäße Übertragung der Verhältnisse auf die anderen Arbeitsmöglichkeiten des Umformers wird dann nicht schwer sein.

Tabelle VII¹⁾.

Wirkungsgrade, Gewichte und Bodenflächen von 25 und 60 Perioden Drehstrom-Gleichstromumformern mit einem Spannungsbereiche von 240 bis 300 Volt bei einer mittleren Gleichstromspannung von 275 Volt²⁾.

Leistung in KW	Belastung	bei 25 Perioden ³⁾			bei 60 Perioden ³⁾		
		I. Synchronmotor, direkt gekuppelt mit Gleichstrom-generator	II. Induktionsmotor, direkt gekuppelt mit Gleichstrom-generator	III. Einankerumformer der Spaltpoltype	I. Synchronmotor, direkt gekuppelt mit Gleichstrom-generator	II. Induktionsmotor, direkt gekuppelt mit Gleichstrom-generator	III. Einankerumformer der Spaltpoltype
Wirkungsgrade in % (%)							
300	$\frac{1}{1}$	84	+2,4	+ 6,5	86,75	-1,4	+ 2,2
	$\frac{3}{4}$	82,25	+2,1	+ 7,6	85	-2,0	+ 2,1
	$\frac{1}{2}$	77	+4,0	+12,3	81,75	-2,7	+ 1,0
500	$\frac{1}{1}$	85,5	+2,3	+ 6,1	87,75	-8,5	+ 1,4
	$\frac{3}{4}$	83,75	+2,1	+ 7,7	86	-1,1	+ 1,2
	$\frac{1}{2}$	79,5	+3,8	+11,0	83	-2,7	+ 0
1000	$\frac{1}{1}$	87,5	+0,3	+ 4,8	87,75	-0,3	—
	$\frac{3}{4}$	86	+0,6	+ 5,2	86	-0,6	—
	$\frac{1}{2}$	82,25	+1,7	+ 9,4	83	-0,3	—
2000	$\frac{1}{1}$	88,25	+0,6	+ 4,5	88,5	-0,3	—
	$\frac{3}{4}$	86,75	+0,3	+ 5,7	86,5	-0,3	—
	$\frac{1}{2}$	82,75	+2,4	+ 9,3	83	-0,3	—
Gewichte in kg (%)							
300	—	22700	-2,0	-36,0	21800	-2,0	—
500	—	31000	-4,4	-30,0	29600	-4,6	-16,7
1000	—	44500	-8,1	-5,0	41800	-3,3	-15,4
2000	—	98000	-7,0	-2,3	96400	-1,4	—
Bodenflächen in qm (%)							
300	—	7,44		+13,7	6,23		—
500	—	11,35	wie	+ 8,3	10,23	wie	+43,0
1000	—	12,65	bei I	+25,0	13,02	bei I	+36,0
2000	—	41,00		+8,4	40,46		—

¹⁾ Siehe auch Tabelle VIII.

²⁾ Siehe E. Eichel: Amerikanische Umformerpraxis. E. K. B. 1909, Heft 11.

³⁾ Für I und II Gesamtwirkungsgrad von Motor und Gleichstromgenerator mit Wendepolen. Bei Synchronmotorgeneratoren ist ein Motor gewählt, der mit 80% Phasenvoreilung betrieben werden kann, um 60% seiner Leistung für die Phasenregelung verwenden zu können. In die Polschuhe der mit 125 Volt erregten Felder ist zum leichteren Anlassen und zur Dämpfung eine Kurzschlußanker-Kupferstabwicklung eingefügt. Die Induktionsmotoren haben Schleifringläufer ohne Kurzschluß- und Bürstenabbevorrichtung. Für III. Gesamtwirkungsgrad von Drehstromtransformator und Umformer einschließlich Verlusten in den Verbindungskabeln zwischen beiden.

Der Kraftfluß Φ der Magnete ist, wie das Stromlaufschema Fig. 120 erkennen läßt, für die beiden im Anker des Umformers induzierten EMKe. gemeinsam und gleich. Der Strom für die Erregung wird der Gleichstromseite entnommen, und die Maschine arbeitet infolgedessen mit Selbsterregung; eine besondere Erregermaschine ist daher nicht notwendig. Bei Leerlauf sind die Klemmenspannungen gleich den in der Ankerwicklung induzierten EMKen., und man kann, wenn man den geringen Spannungsabfall im Anker bei Belastung unberücksichtigt läßt, mit hinreichender Genauigkeit auch bei Belastung die Klemmenspannungen gleich den induzierten EMKen. setzen. Es ist demnach:

$$E_G = \frac{E_W}{u},$$

oder:

$$E_W = u \cdot E_G.$$

Hieraus sieht man also, daß die Gleichstromspannung, da $u = \text{const.}$, abhängig ist von der Drehstromspannung und nicht durch die Änderung der Erregung geregelt werden kann. Es würde zu weit führen, hier die umfangreichen rechnerischen Ableitungen für den Einfluß der Erregung auf die Gleichstromspannung zu geben, und es soll daher nur darauf hingewiesen werden, daß durch Änderung der Erregung nur die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung auf der Wechselstromseite beeinflußt werden kann, weil der wattlose Strom, den der Umformer aufnimmt, fast vollständig unabhängig von der Belastung und nur abhängig von der induzierten EMK. also von der Erregung ist. Bei schwacher Erregung bleibt der Strom hinter der Spannung zurück (Phasennacheilung), und bei starker Erregung eilt er der Spannung vor (Phasenvoreilung). Es wird infolgedessen eine bestimmte Erregung geben, bei welcher Phasengleichheit besteht, der Leistungsfaktor also $\cos \varphi = 1$ ist. Der Einankerumformer gestattet somit gleich dem Synchronmotor eine Regelung der Phasenverschiebung, und er kann demnach zur Phasenreglung für das ganze Drehstromnetz d. h. zur Lieferung wattlosen Stromes benutzt werden. Also auch nach dieser Richtung steht er dem Synchron-Motorgenerator nicht nach.

b) Die Spannungsregelung mittels Drosselspulen und Streutransformatoren. Da Wechselstrom- und Gleichstromspannung in einem bestimmten festen Verhältnisse zueinander stehen, ist infolgedessen bei unveränderlicher Wechselstromspannung eine Regelung der Gleichstromspannung nicht ohne weiteres möglich. Hierin liegt einer der wesentlichsten Unterschiede zwischen Einankerumformer und Motorgenerator, denn der Hauptvorteil des letzten besteht (S. 138) darin, daß die Spannung der Gleichstromseite vollständig unabhängig von derjenigen der Wechselstromseite ist, und auch unabhängig von der Belastung gleichstromseitig in gleicher Weise wie bei jedem normalen Generator geregelt werden kann.

Um nun die Spannung z. B. auf der Gleichstromseite des Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformers ändern zu können, muß man sich also besonderer Hilfsmittel und zwar entweder auf der Wechselstrom- oder auf der Gleichstromseite bedienen.

Wird der Umformer über einen Transformator gespeist, und schaltet man zwischen die Unterspannungsklemmen des Transformators und die Schleifringe Drosselspulen *D.Sp.* (Fig. 122), so kann durch diese

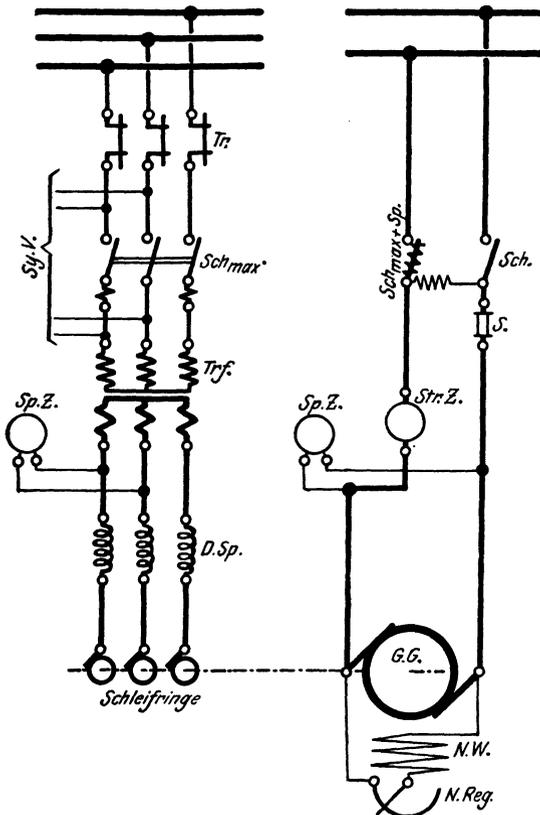


Fig. 122. Spannungsregelung beim Einankerumformer durch Drosselspulen.

ist die resultierende Spannung an den Schleifringen annähernd gleich der Netzspannung bzw. derjenigen der Unterspannungsseite des Transformators. Ist aber Phasenvor- oder Nacheilung zwischen dem den Schleifringen zugeführten Strom und z. B. der Unterspannung des Transformators vorhanden, so ist die an den Schleifringen des Umformers herrschende Spannung infolge der Drosselspule entsprechend größer oder kleiner als diejenige auf der Sekundärseite des Transformators, und diese Phasenverschiebung zwischen Strom und Span-

Anordnung schon eine recht bedeutende Regelfähigkeit erreicht werden. Das beruht auf folgender Erscheinung:

Die Spannung an den Schleifringen des Einankerumformers ist die Resultante aus der konstanten Spannung, die an den Unterspannungsklemmen des Transformators oder im Netze vorhanden ist, und der Spannung der Drosselspule. Der phasenvoreilende Strom hat eine Spannungserhöhung und der phasennacheilende Strom eine Spannungserniedrigung in der Drosselspule zur Folge und zwar, weil die Spannung derselben proportional dem den Schleifringen zugeführten Strom ist und, wie als bekannt vorausgesetzt werden muß, annähernd senkrecht auf dem Stromvektor steht. Ist der Strom in Phase mit der Netzspannung bzw. der Unterspannung des Transformators, tritt also keine Phasenverschiebung auf, so

nung kann, wie bereits gesagt, in einfachster Weise durch Änderung der Erregung hervorgerufen werden. Je nachdem man also die Erregung verstärkt oder schwächt, wirkt man auf die Phasenstellung zwischen dem den Schleifringen zugeführten Strome und der Transformatorspannung ein, und man kann ein Vor- bzw. Nacheilen erzielen, d. h. also die den Schleifringen zugeführte resultierende Spannung und infolgedessen auch die Gleichstromspannung trotz konstanter Netzspannung auf der Drehstromseite in gewissen Grenzen ändern. Die Regelung der Spannung auf der Gleichstromseite kann auf diese Weise bis zu etwa $\pm 7,5\%$ betragen. Darüber hinauszugehen, hat sich nicht als praktisch erwiesen einerseits, weil die Überlastungsfähigkeit des Umformers beschränkt wird, und andererseits, weil die Verluste in der Ankerwicklung zu groß werden, der Wirkungsgrad also sinkt. Die Drosselspule ist für dieselbe Stromstärke wie der Umformer zu bemessen, und die scheinbare Leistung derselben (in KVA) muß so groß sein in Prozenten der Leistung des Umformers, als die Spannungsänderung beträgt.

Versieht man die Magnete des Umformers für diese Spannungsänderung mit einer besonderen Hauptstromwicklung, so kann man dem Einankerumformer damit die Eigenschaften einer compoundierten oder auch einer übercompoundierten Gleichstrommaschine geben, was für manche Zwecke, z. B. für den Bahnbetrieb oder in anderen Betrieben, in denen plötzliche stoßweise Überlastungen eintreten, von großer Bedeutung ist. Auch ein einwandfreier Parallelbetrieb mit einer Pufferbatterie läßt sich auf diese Weise erzielen, wenn die Magnete mit einer Gegencompoundwicklung versehen werden.

Eine ähnliche Wirkung wie durch die Drosselspulen erzielt man auch durch stark streuende Transformatoren. Die Regelungsgrenze liegt hier ebenfalls ungefähr zwischen $\pm 7,5\%$ (15% ganzer Bereich).

Diese beiden Arten der Spannungsregelung haben allerdings den großen Nachteil, daß sie mit Benutzung wattloser Ströme vor sich gehen, die neben der Erhöhung der Verluste im Umformeranker und der Verschlechterung des Leistungsfaktors des Netzes auch auf das Pendeln der Maschinen einen ungünstigen Einfluß haben.

c) Die Spannungsregelung durch Änderung der Transformatorspannung. Soll die Gleichstrom-Spannungsänderung in noch weiteren als den mittels Drosselspulen oder Streutransformatoren erreichbaren Grenzen möglich sein, dann muß man dazu übergehen, die Drehstromspannung auf der Sekundärseite des Transformators zu ändern. Das kann einmal in der Weise geschehen, daß man die Unterspannungsseite des Transformators stufenweise unterteilt (Fig. 123), oder aber man schaltet zwischen Transformator und Schleifringe einen drehbaren Zusatztransformator (Fig. 124).

Das Zu- bzw. Abschalten der einzelnen Windungsstufen des Stufentransformators erfolgt mit Hilfe eines Stufen- oder Windungsschalters,

ähnlich wie er auf S. 67 bei dem Anlaßtransformator für einen asynchronen Drehstrommotor beschrieben worden ist¹⁾. Mit diesem Stufenschalter kann man die dem Umformer zugeführte Spannung in größeren Stufen und nur sprungweise ändern, und das überträgt sich naturgemäß auch auf die Gleichstromspannung. Sind die Abstufungen bzw. die Spannungssprünge auf der Gleichstromseite zu grob, dann ist eine feinere Regelung noch dadurch möglich, daß man wiederum

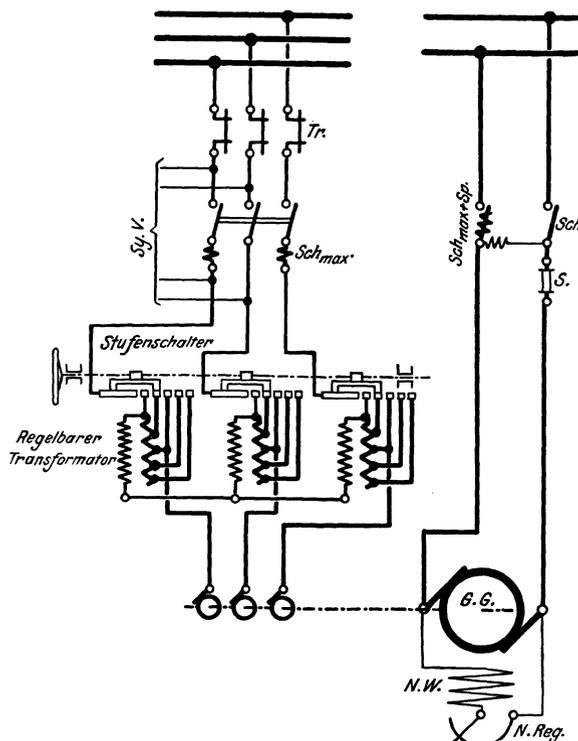


Fig. 123. Spannungsregelung beim Einankerumformer mittels Stufentransformators.

so hat sie aber andere Nachteile, die darin liegen, daß die Spannungsänderung nicht schnell erfolgen kann, wenn nicht noch ein besonderer, durch Relais gesteuerter motorischer Antrieb des Stufenschalters vorhanden ist. Weiter wird die Gefahr der Betriebsstörung durch das Pendeln in gleicher Weise erhöht wie bei der Verwendung von Drosselspulen.

Soll die Spannungsänderung gleichmäßig möglich sein, dann tritt an Stelle des Stufentransformators ohne oder mit Drosselspulen vorteil-

¹⁾ Über diesen Stufenschalter in Verbindung mit dem Transformator siehe auch S. 266 u. f.

Drosselspulen benutzt, und dann die Erregung geändert wird. Eine Anzapfung des Transformators auf der Überspannungsseite ist nicht zu empfehlen, weil bei höheren Spannungen Ölschalter verwendet werden müssen. Dieselben werden nicht nur teuer, sondern in ihren Abmessungen, sowie in der Konstruktion größer und umständlicher. Außerdem soll man das häufige Schalten hoher Spannungen der Überspannungsgefahren wegen tunlichst vermeiden. An Stelle der unterteilten Transformatoren in Zweispulenausführung können ebenfalls Autotransformatoren (siehe S. 259) verwendet werden.

Wenn auch diese Regelarart die Benutzung wattloser Ströme vermeidet, sofern die Drosselspulen in Fortfall kommen,

hafter ein drehbarer Zusatztransformator. Über den Aufbau und die Arbeitsweise eines solchen Transformators ist im III. Abschnitte (S. 271) alles Wissenswerte gesagt. Ein Schaltungsschema ist der Vollständigkeit wegen in Fig. 124 wiedergegeben, das indessen erst weiter unten ausführlicher besprochen werden wird. Mit Hilfe eines solchen drehbaren Zusatztransformators ist eine sehr feinstufige Spannungsänderung in verhältnismäßig weiten Grenzen erzielbar. Auch hier

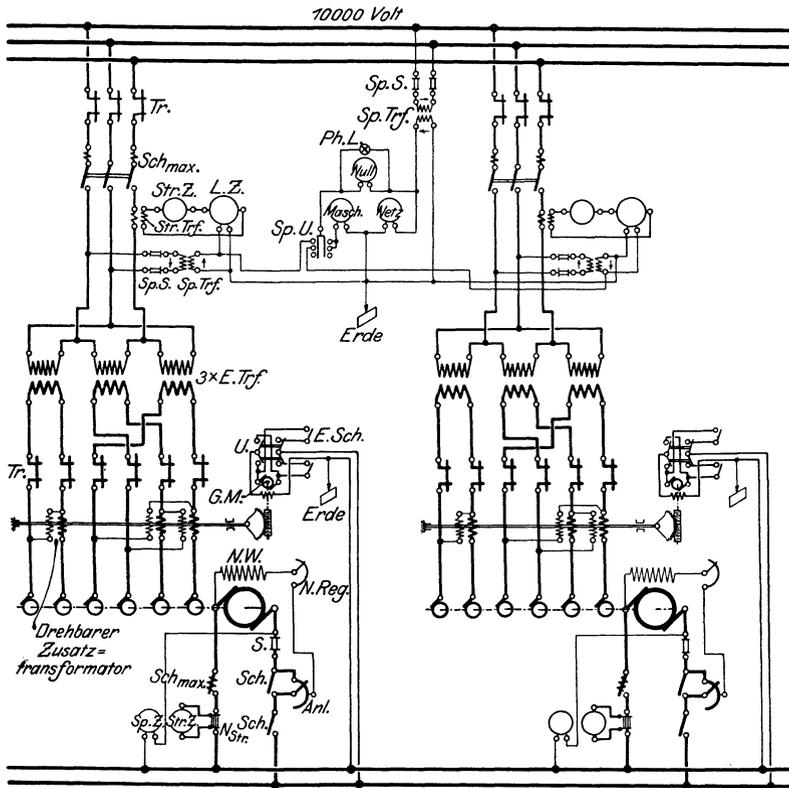


Fig. 124. Spannungsregelung beim Einankerumformer mittels drehbaren Zusatztransformators (Erklärung s. S. 167).

kann die Regelung ohne Beeinflussung der Phasenverschiebung bei allen Belastungen und Spannungen vorgenommen werden, wenn der Zusatztransformator als Doppelmachine (S. 273) ausgeführt ist.

d) Die Spannungsregelung mittels einer besonderen Zusatzmaschine. Vorteilhafter als die bisher beschriebenen Arten ist die Benutzung einer besonderen synchronen Zusatzmaschine, die vor den Umformer geschaltet wird, und die zu der Netz- bzw. Transformator-Unterspannung eine veränderliche Zusatzspannung erzeugt. Das Schaltungsschema zeigt die Tafel III. Der Strom fließt vom Transformator

D. Trf. in den feststehenden Anker des Zusatzgenerators, dessen Magnet-system umläuft, dann über die Schleifringe des Umformers in dessen Anker. Je nach der regelbaren Stärke der Erregung dieser Zusatzmaschine, deren Magnete entweder nur mit einer Hauptstrom- oder zu dieser auch noch mit einer Nebenschlußwicklung versehen werden, wird im Anker derselben eine EMK. induziert. Diese setzt sich zu der dem Anker des Umformers aufgedrückten Klemmenspannung hinzu oder vermindert dieselbe.

Wenn die Spannungsregelung selbsttätig vor sich gehen soll, dann ist eine Compoundwicklung auf den Magneten des Zusatzgenerators erforderlich.

Eine solche Zusatzmaschine kann nun entweder unmittelbar auf die Welle des Einankerumformers aufgesetzt oder mit ihr gekuppelt oder auch durch einen besonderen Synchronmotor angetrieben werden, denn sie muß naturgemäß synchron mit dem Umformer laufen. Da die Leistung der Zusatzmaschine verhältnismäßig gering ist, — sie richtet sich nur nach der durch die verlangte Spannungsregelung erforderlichen Zusatzspannung auf der Drehstromseite des Umformers und dem sie durchfließenden Strome — empfiehlt sich der Zusammenbau mit dem Umformer oftmals nicht. Sie müßte, da sie mit der Umdrehungszahl des Einankerumformers laufen, also die gleiche Polzahl mit letzterem haben müßte, unter Umständen viel größer gewählt werden, als ihrer Leistung entsprechen würde, was die Beschaffungskosten selbstverständlich unverhältnismäßig heraufsetzt. Man benutzt in solchen Fällen zum Antriebe der Zusatzmaschine besser einen besonderen Synchronmotor, schafft also einen vollständigen Maschinensatz, der nunmehr in seiner Polzahl also seiner Drehzahl unabhängig vom Umformer ist und so bestimmt werden kann, wie er für die Abmessungen und demnach den Preis mit Rücksicht auf die zu erzeugende Leistung am günstigsten wird. Es empfiehlt sich ferner, die Unterspannung des Transformators derart zu wählen, daß sie um die Hälfte des Betrages des Regelbereiches der Spannung über der gewünschten niedrigsten Spannung liegt. Wenn also z. B. die Gleichstromspannung von 500 Volt als unterste Grenze auf 600 Volt erhöht werden soll, so ist die Unterspannung des Transformators so zu bemessen, daß sie normal auf der Gleichstromseite des Umformers eine Spannung von 550 Volt erzeugt. Daraus ergibt sich dann der Spannungsbereich der Zusatzmaschine so, daß die Hälfte der von ihr erzeugten Spannung addiert, die Hälfte subtrahiert wird, um auf der Gleichstromseite 600 bzw. 500 Volt zu erhalten.

Derartige Zusatzaggregate kommen nur bei größeren Umformern in Frage. Die Anordnung kann, wenn mehrere Einankerumformer zu regeln sind, dann auch so getroffen werden, daß ein Synchronmotor mehrere Zusatzmaschinen antreibt. Zweckmäßig ist dabei, die Schaltung des Synchronmotors derart zu wählen, daß er gleichzeitig mit einem Umformer anläuft, um die Inbetriebsetzung des Zusatzaggregates zu vereinfachen und an Apparaten bzw. an Bedienung zu sparen.

Dieses Regelverfahren ist das vorteilhafteste und günstigste, weil sowohl die Benutzung wattloser Ströme vermieden ist, als auch die Gefahren für das Pendeln der Umformer durch die Art der Regelung nicht erhöht werden.

Neben der Verwendung eines besonderen Synchronmotors kann man nun auch einen besonderen Zusatz - Einankerumformer (Fig. 125) benutzen, oder die Spannungsregelung auf der Gleichstromseite mit Hilfe einer Gleichstrom-Zusatzmaschine vornehmen (Fig. 126). Bei der Methode nach Fig. 125 wird der Zusatzumformer wiederum entweder mit dem Hauptumformer gekuppelt oder zusammengebaut oder besonders angetrieben. Die Schaltung ist sehr umständlich,

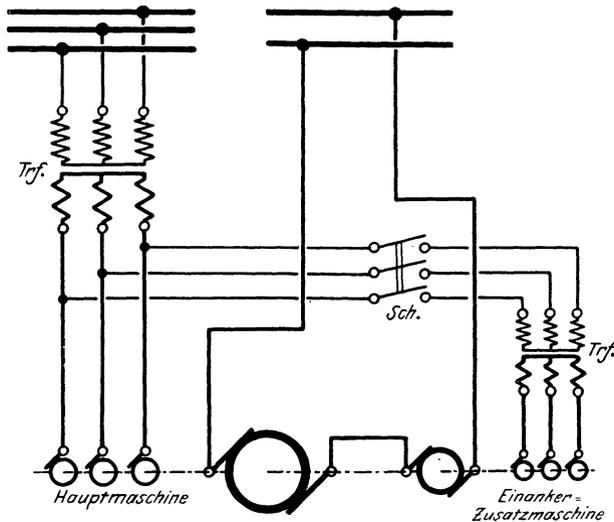


Fig. 125. Spannungsregelung beim Einankerumformer durch Zusatz-Einankerumformer.

weil außer dem Haupttransformator noch ein an die Unterspannungsseite desselben anzuschließender zweiter Transformator für den Zusatzumformer erforderlich wird, der mit großer Streuung auszuführen ist, wenn Drosselspulen vermieden werden sollen. Die Nachteile sind dieselben wie bei der Regelung durch Drosselspulen allein, und der Umständlichkeit wegen wird diese Methode so gut wie gar nicht angewendet. Die Gleichstromseite des Zusatzumformers wird mit derjenigen des Hauptumformers in Reihe geschaltet. Der Kommutator der Zusatzmaschine ist demnach für den ganzen Strom des Hauptumformers zu bemessen, und die Zusatzmaschine wird infolgedessen verhältnismäßig teuer und groß.

Die Regelart nach Fig. 126 sieht auf der Gleichstromseite eine besondere Gleichstromzusatzmaschine vor, deren Anker wiederum mit dem Anker des Umformers in Reihe geschaltet wird. Infolgedessen ist auch hier der Kommutator dieser Maschine sehr groß im Verhältnis

zur Leistung, weil er ebenfalls für die ganze Stromstärke des Umformers bemessen sein muß. Diese Anordnung kommt in der Hauptsache nur dann zur Anwendung, wenn es sich um die Ladung von Akkumulatorenbatterien handelt, wenn also die Spannungserhöhung etwa 40% und mehr betragen muß. Sie ist für diesen Fall derjenigen mit synchronem Zusatzgenerator vorzuziehen, weil für mehrere Umformer nur

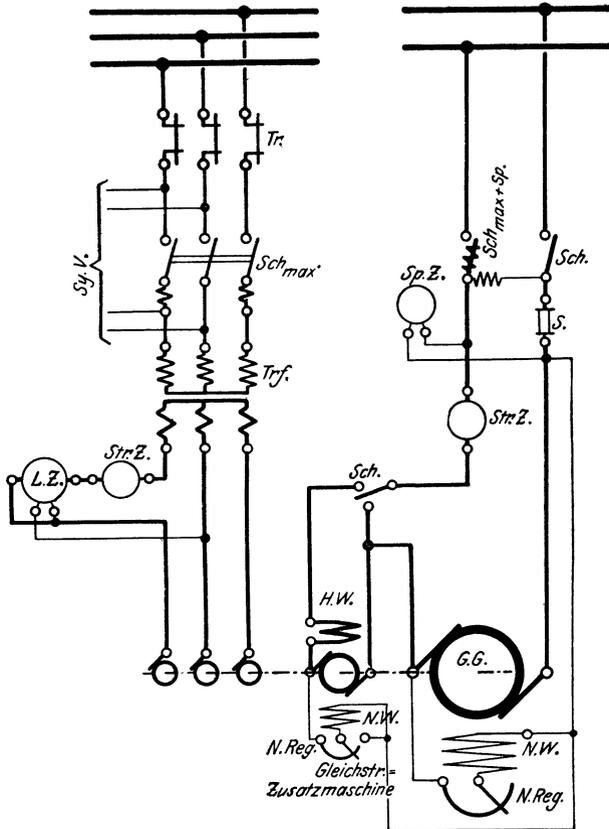


Fig. 126. Spannungsregelung beim Einankerumformer durch Gleichstrom-zusatzmaschine.

ein Maschinensatz nötig ist. Besondere Nachteile für die Wechselstromseite bestehen natürlich nicht.

e) **Die Spannungsregelung durch Benutzung von Spaltpolen.** Schließlich sei noch eine besonders in Amerika häufiger anzutreffende Ausführungsart des Einankerumformers für größere Spannungsregelung angeführt, die man mit dem Namen Spaltpolumformer bezeichnet, und die von J. L. Woodbridge vorgeschlagen worden ist. Sie beruht auf der Abhängigkeit des Übersetzungsverhältnisses zwischen Wechselstrom- und Gleichstrom-

spannung von der Polbreite der Magnete. Jeder Pol wird in drei nebeneinanderstehende Pole aufgelöst, von denen jeder außer mit der normalen Erregerwicklung noch mit einer besonderen Wicklung versehen ist, die zum Regeln dient. Die eigentliche Erregung erfolgt in normaler Weise. Die besonderen Regelwicklungen sind verschieden hintereinandergeschaltet, und zwar alle äußeren und alle inneren je für sich. Die erzeugte Gleichstromspannung wird erhöht durch die Erregung der äußeren Regelwicklungen in dem Sinne, daß sie die Haupterregung unterstützen, während die mittleren Regelwicklungen dem Felde entgegenwirken. Der Leistungsfaktor ist bei derartig ausgeführten Maschinen bei allen Belastungen und Spannungen unveränderlich.

J. L. Burnham löst jeden Pol nur in zwei ungleiche Teile auf, wickelt auf den größeren die eigentliche Erregerwicklung und auf den kleineren die Regelwicklung. Durch die Stromumkehr in der letzteren wird die Spannung erhöht oder erniedrigt.

Beiden Arten haften aber die Nachteile an, daß die Spannungs-kurve stark verzerrt wird, wattlose Ströme benutzt werden, weil die Änderung der Erregung die Phasenstellung zwischen Strom und Spannung beeinflußt, und schließlich auch die Gefahr für das Pendeln erhöht wird. Ferner werden die Abmessungen eines solchen Spaltpolumformers größer wie diejenigen eines Einankerumformers mit unveränderlichem Übersetzungsverhältnisse¹⁾ seiner Wicklungen (Tab. VII).

33. Die Arbeitsweise des Einankerumformers.

Für die Beurteilung der Arbeitsweise eines Einankerumformers ist die Form bestimmend, in welcher derselbe zur Umformung benutzt wird. Es sind möglich:

- 1) die Ein- oder Mehrphasen-Wechselstrom-Gleichstromumformung;
- 2) die Gleichstrom-Wechselstromumformung (ein- oder mehrphasig);
- 3) die Doppelstrommaschine.

Für jede dieser drei Arten hat der Einankerumformer in elektrischer Beziehung bestimmte Eigentümlichkeiten, die nunmehr besprochen werden sollen. Da dieser Umformer ganz allgemein zur Umwandlung von vorhandenem Wechselstrom in Gleichstrom für die Wechselstromseite die Gleichstromerregung nötig hat, besitzt er, wie bereits gesagt, vollständig die Eigenschaften eines Synchronmotors. Er muß nicht nur vor dem Einschalten auf das Wechselstromnetz mit diesem synchronisiert werden, sondern hat für die Wechselstrom-Gleichstromumformung auch die Nachteile hinsichtlich des Anlaufes, sowie der Abhängigkeit von den Vorgängen im Wechselstromkreise (Pendeln, Spannungsschwankungen usw.).

a) Die Drehstrom-Gleichstromumformung. Das Anlassen. Für das Anlassen gilt sinngemäß alles das, was bereits für den Synchronmotor angeführt worden ist.

¹⁾ E. T. Z. 1910, Heft 14: Das Spannungsverhältnis bei Einankerumformern mit besonderer Berücksichtigung des Spaltpolumformers.

In der amerikanischen Praxis, in der sich der Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformer schon seit langer Zeit großer Beliebtheit erfreut, umgeht man soweit irgend möglich die umständlichen Anlaufmethoden, verfährt vielmehr auf die bereits auf S. 128 geschilderte einfachste Weise, indem man den Umformer von der Drehstromseite mit Hilfe des auf der Unterspannungsseite unterteilten Transformators und eines einfachen Hebelumschalters anläßt¹⁾. Der Transformator erhält zumeist nur eine, höchstens zwei Anlaßstufen, und zwar ungefähr bei $\frac{1}{3}$ bzw. $\frac{1}{4}$ der normalen Spannung. Da es sich in der Regel um Spannungen drehstromseitig von höchstens 300 bis 400 Volt handelt, wird ein normaler dreipoliger Hebelumschalter benutzt. Immerhin können unter Umständen aber doch recht erhebliche Spannungen an den Schenkelwicklungen auftreten, und auch der Stromstoß beim Anlassen recht bedeutend werden, so daß diese Methode bei kleineren Kraftwerken nicht besonders zu empfehlen ist. Die Anlaufstromstärke kann auf den drei- bis vierfachen Wert der normalen Betriebsstromstärke anwachsen, und da derselbe nur wattloser Strom ist, so kann der durch ihn hervorgerufene Spannungsabfall im Netze andere Synchronmotoren oder Einankerumformer zum Außertrittfall bringen.

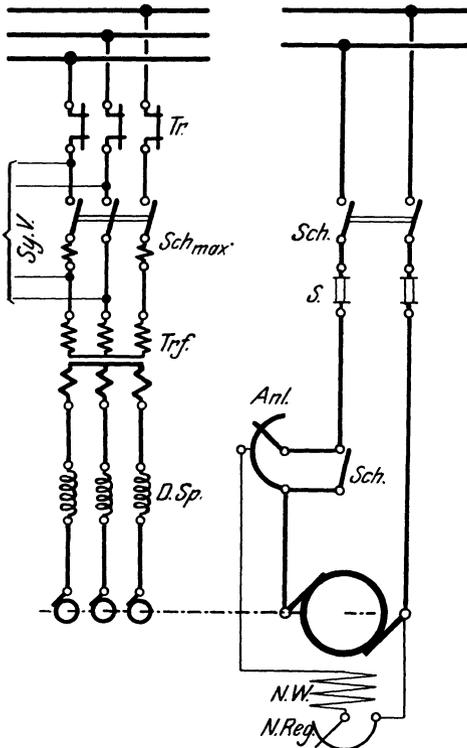


Fig. 127. Anlassen des Einankerumformers von der Gleichstromseite.

Das auf S. 128 über die Schaltung der Erregung Gesagte gilt auch hier.

Ist ein spannungsführendes Gleichstromnetz vorhanden, z. B. in einer Anlage mit Akkumulatorenbatterien, oder arbeitet der

¹⁾ El. Enging. 1908, 4. Juni: 600-KW-Umformer, Drehstrom 6000 Volt, Frequenz 25, Gleichstrom 470 bis 600 Volt für Licht- und Kraftzwecke. Das Anlassen erfolgt von der Wechselstromseite in 30 bis 40 Sekunden. Der Umformer wird mit $\frac{1}{5}$ der normalen Unterspannung des Transformators bei normaler Stromstärke angelassen, und ist zu diesem Zwecke auf einen Anlaßwiderstand geschaltet. Beim Anlassen sind drei, beim Betrieb alle sechs Schleifringe angeschlossen. Die Wechselstromspannung kann durch eine synchrone Zusatzmaschine geändert werden.

Umformer mit anderen Umformern bzw. mit vorhandenen Gleichstromgeneratoren parallel, dann kann das Anlassen am einfachsten und schnellsten von der Gleichstromseite vorgenommen werden. Zu diesem Zwecke gibt man von dem vorhandenen Gleichstromnetze auf die Gleichstromseite des Umformers Strom und läßt ihn also als normalen Gleichstrommotor laufen. Es muß infolgedessen auf der Gleichstromseite noch ein Anlasser eingebaut werden, der nach Beendigung der Anlauperiode durch den Schalter *Sch.* (Fig. 127) kurzgeschlossen wird. Für das Einschalten der Drehstromseite auf das Netz gelten die gleichen Bedingungen wie für den Synchronmotor, d. h. es muß die Phasenfolge des Umformers und des Netzes die gleiche sein, und die Spannungen und Phasen beider müssen übereinstimmen. Auch die für das drehstromseitige Parallelschalten notwendigen Instrumente sind dieselben wie beim Synchronmotor. Das genaue Einstellen der synchronen Drehzahl erfolgt mit Hilfe des Nebenschlußreglers *N. Reg.* der Gleichstromseite, denn solange der Umformer, wie es hierbei der Fall ist, als Gleichstrom-

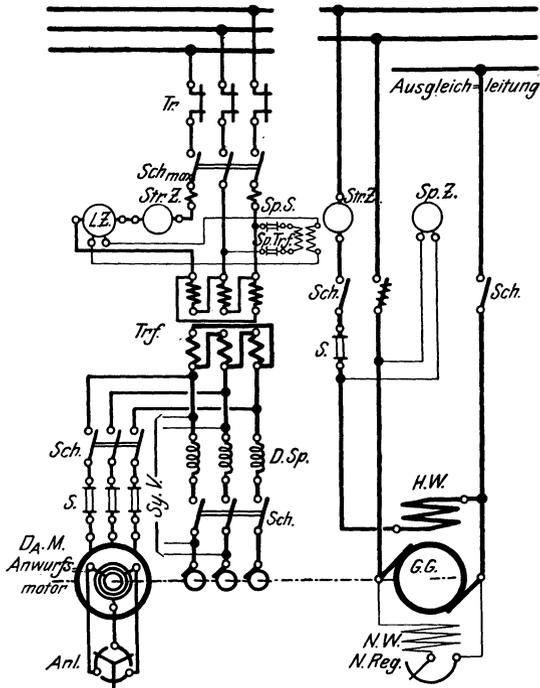


Fig. 128. Anlassen des Einankerumformers durch einen Drehstrom-Asynchronmotor.

Drehstromumformer läuft, ist seine Umlaufzahl von seiner Erregung abhängig. Arbeitet der Umformer mit dem Drehstromnetze parallel, dann wird durch Verstellen des Nebenschlußreglers die Gleichstromseite gezwungen, Strom abzugeben, also als Generator zu arbeiten.

Ist ein dauernd und zuverlässig spannungsführendes Gleichstromnetz nicht vorhanden, so kann neben der oben bereits genannten amerikanischen Anwurfsmethode auch ein besonderer, angebauter asynchroner Drehstrommotor als Anwurfsmotor verwendet werden. Die Fig. 128 zeigt das Schaltungsschema hierfür, und in Fig. 129 ist ein solcher Einankerumformer der Siemens-Schuckert-Werke mit Anwurfsmotor abgebildet. Im Gegensatz zu dem ausführlichen Schema der Fig. 130 für diese Art des Anlassens ist die

Gleichstromseite des Umformers in Fig. 128 noch mit einer Hauptstromwicklung versehen, also compoundiert.

Die sonstige Arbeitsweise des Einankerumformers in der Verwendung als Drehstrom-Gleichstromumformer ist eine derartige, daß er in allen Betrieben, auch solchen mit stoßweiser oder stark schwankender Belastung, Verwendung finden kann (Bahnbetriebe, Walzwerke usw.).

Ist die Drehstromspannung konstant, und arbeitet der Umformer gleichstromseitig nicht mit anderen Gleichstromgeneratoren oder einer Batterie parallel, so bleibt auch die Gleichstromspannung bei allen Belastungen konstant. Bleibt dagegen unter den gleichen Voraussetzungen für die Gleichstromseite die Drehstromspannung nicht dauernd unverändert, so ändert sich mit dem Schwanken der Drehstromspannung

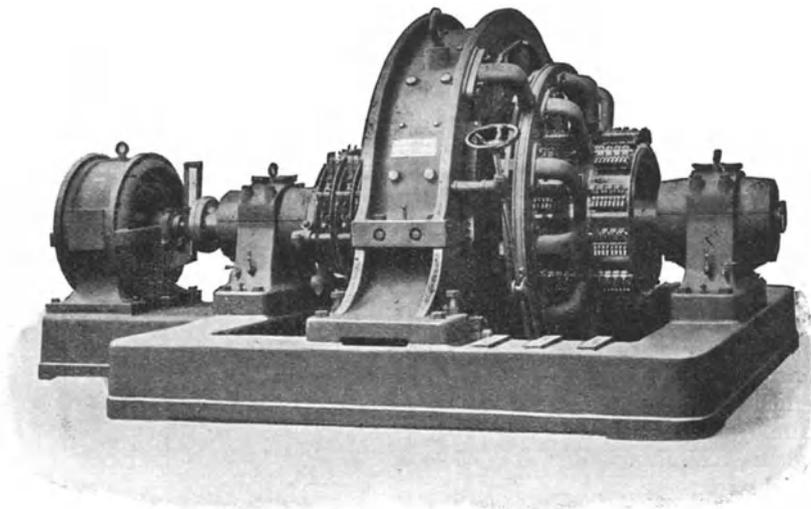


Fig. 129. Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformer mit Anwurfsmotor.

in gleichem Verhältnisse auch die Gleichstromspannung, und man muß, falls z. B. für Lichtbetrieb konstante Gleichstromspannung verlangt wird, zwischen Transformator und Schleifringe Drosselspulen oder stark streuende Transformatoren einbauen.

Arbeitet aber die Gleichstromseite parallel mit anderen Gleichstromgeneratoren oder einer Akkumulatorenbatterie, so nimmt beim Sinken der Drehstromspannung die Gleichstromseite aus dem vorhandenen Gleichstromnetze Strom auf, erhält dadurch motorische Wirkung, und es wird infolgedessen auf der Drehstromseite Strom erzeugt. Diese Umkehr der Stromlieferung tritt schon bei einer Schwankung der Drehstromspannung um etwa ± 2 bis 3% ein. Auch hier kann man dem Übelstande durch den Einbau von Drosselspulen oder streuenden Transformatoren begegnen, oder das schlechtere Mittel anwenden, die Gleichstromseite durch Spannungs- oder Stromrückgangsschalter mit selbsttätiger Wirkung zu schützen.

Bei größeren drehstrom- bzw. gleichstromseitigen Spannungsschwankungen etwa bis $\pm 5\%$ muß von der Verwendung von Einankerumformern im allgemeinen abgesehen werden.

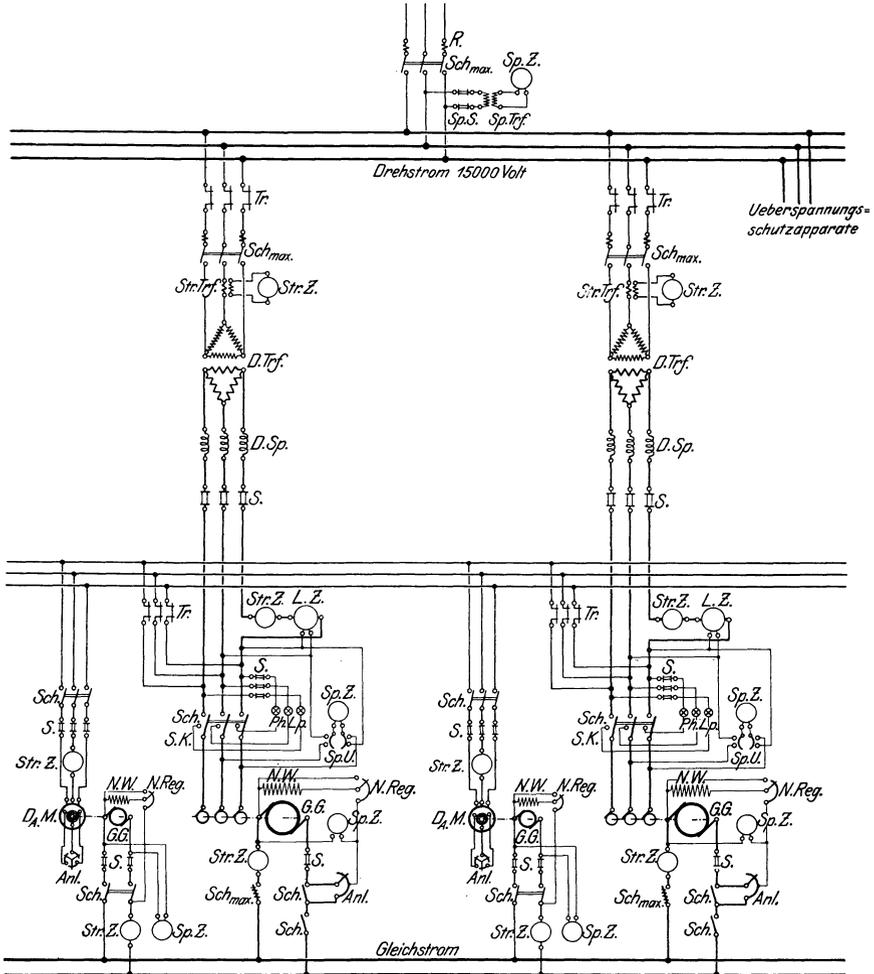


Fig. 130. Schaltungsschema für eine Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformeranlage mit Anlassen von der Gleichstromseite unter Benutzung eines Gleichstrom-Anlaßaggregates (Erklärung s. S. 169).

Andererseits ist der Drehstrom-Gleichstromumformer sehr stark überlastbar, ohne daß er aus dem Tritt fällt, was bei einem einfachen Synchronmotor in gleicher Weise nicht statthaft ist. Es empfiehlt sich dann aber der Einbau von Wendepolen und einer Hilfscompoundwicklung, um ein Nachstellen der Bürsten mit zunehmender Belastung

zu vermeiden, und funkenlose Kommutierung zu erzielen. Da der Umformer ferner am günstigsten arbeitet, wenn sein Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ oder annähernd $= 1$ ist, so darf er nicht mit großen Schwungmassen im umlaufenden Teile ausgerüstet, sondern muß möglichst

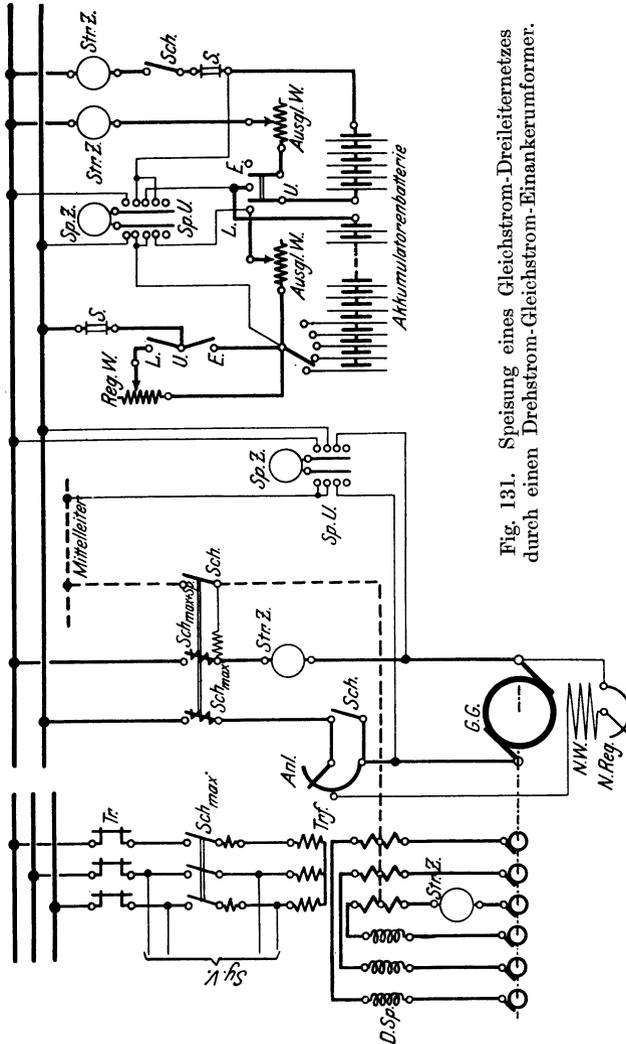


Fig. 131. Speisung eines Gleichstrom-Dreileiternetzes durch einen Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformer.

leicht gebaut sein, um den Schwankungen in der Periodenzahl des Drehstromnetzes gut folgen zu können. Soll er zur Phasenregelung benutzt werden, dann muß er dafür wie auch der Synchronmotor selbstverständlich von vornherein bemessen sein.

Können die Generatoren des Drehstromnetzes nicht dauernd auf gleichbleibender Drehzahl gehalten werden, schwankt also die Frequenz

im Drehstromnetze, so läßt sich ein Pendeln des Umformers hervorgerufen durch das Pendeln des Stromes im Netze wirksam dadurch vermeiden oder erheblich abschwächen, daß man die Magnetpole mit einer Dämpferwicklung versieht, durch die infolge der Wirbelströme, die bei Schwankungen der Frequenz des Drehstromnetzes in derselben entstehen, ein bremsender Einfluß auf den Anker des Umformers ausgeübt wird.

Schließlich sei noch erwähnt, daß die Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformer auch zur Speisung eines Dreileiter-Gleichstromnetzes benutzt werden können. Zu diesem Zwecke wird der Nulleiter des Netzes an den neutralen Punkt des Transformators angeschlossen; es kann in solchem Falle aber nur die sechsphasige Schaltung des Transformators unterspannungsseitig Verwendung finden. Man hat damit den Vorteil, da ein Transformator fast stets erforderlich ist, besondere Einrichtungen zur Spannungsteilung nicht mehr nötig zu haben. Die Schaltung ist in Fig. 131 wiedergegeben. Soll in diesem Falle in beiden Netzhälften getrennt die Spannung geändert werden können, dann muß man allerdings besondere Gleichstrom-Zusatzmaschinen aufstellen.

Die Inbetriebsetzung des Umformers in Fig. 131 erfolgt wiederum von der Gleichstromseite, und zwar wird der Strom von der vorhandenen Akkumulatorenbatterie geliefert. Diese Batterie wird, um ein besonderes Ladeaggregat zu vermeiden, in zwei Reihen aufgeladen und zwar mit Hilfe der Umschalter U ., deren Kontakte L und E für die Ladung bzw. die Entladung bestimmt sind. Ausgleichs- und Regelwiderstände gestatten das genaue Einstellen bzw. Abgleichen der Spannung für beide Batteriehälften während der Ladung.

b) Die Apparate im äußeren Stromkreise. Die in der Fig. 124, sowie in der Tafel III und Fig. 130 wiedergegebenen besonders ausführlichen Schematas für Umformerwerke mit Einankerumformern sollen nunmehr einer eingehenden Betrachtung unterzogen werden.

Die auf S. 157 bereits erwähnte Verwendung von drehbaren Zusatztransformatoren zur Spannungsregelung bei Einankerumformern zeigt in einem vollständigen Schaltungsschema die Fig. 124, wie sie für die städtischen Beleuchtungs- und Wasserwerke Bochum von der Elektrotechnischen Fabrik Rheydt, Max Schorch & Co. A.-G. zur Ausführung gekommen ist¹⁾. Der Einankerumformer, der eine Leistung von 800 KW bei 50 Perioden und 300 Umdrehungen in der Minute hat, ist an das Elektrizitätswerk Westfalen angeschlossen, das Drehstrom mit einer Spannung von 10000 Volt verteilt. Zur Vervollständigung ist noch ein zweiter Umformer hinzugezeichnet.

In dem Umformerwerke passiert der Hochspannungsstrom zunächst Trennschalter Tr . und einen automatischen dreipoligen Ölschalter Sch_{max} ., sowie Meßtransformatoren für die Relais, die Strom-, Spannungs- und

¹⁾ Siehe Groß: Ein 800 KW, 50 Perioden-Einankerumformer der städtischen Beleuchtungs- und Wasserwerke Bochum. E. K. B. 1909, Heft 30, S. 590.

Leistungszeiger und die Synchronisiervorrichtung, und gelangt dann zu dem für jeden Umformer notwendigen Transformator, der ein Übersetzungsverhältnis von 10 000/190 Volt hat. Da jeder Umformer mit sechs Schleifringen ausgerüstet ist, sind die Niederspannungswicklungen der Transformatoren nicht verkettet; es sind vielmehr drei Einphasentransformatoren ($3 \times E. Trf.$) benutzt, deren Hochspannungsseiten in Dreieck geschaltet sind (über die Vorteile dieser Schaltung siehe S. 263).

Zwischen jedem Transformator und den Schleifringen liegt ein drehbarer Zusatztransformator, um mit diesem Hilfsmittel die vorgeschriebene Regelung der Gleichstromspannung in den Grenzen zwischen 230 und 270 Volt sicher vornehmen zu können. Je eine Phase der Ständerwicklung des Zusatztransformators ist mit der Niederspannungswicklung des Haupttransformators in Reihe geschaltet, während die Läuferwicklung die volle verkettete Sekundärspannung erhält. Die Einstellung einer gewünschten Spannung erfolgt mittels eines kleinen Gleichstrommotors *G.M.*, der den Läufer des Zusatztransformators antreibt und von der Schalttafel durch einen kleinen Steuerschalter *U.* gesteuert wird. Zur Begrenzung der Endstellungen des Läufers sind Endausschalter *E.Sch.* vorhanden, die den Motorstromkreis im geeigneten Augenblicke selbsttätig unterbrechen.

Da Gleichstrom in der Anlage bereits vorhanden ist, wird jeder Umformer von der Gleichstromseite durch einen Anlasser *Anl.* in Betrieb gesetzt.

Über die sonstigen Schalt- und Sicherheitsapparate ist nichts Besondere gegenüber dem schon bei anderen Gelegenheiten Gesagten zu erwähnen.

Die Schaltung einer anderen, ebenfalls beachtenswerten Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformeranlage, bei der zur Spannungsregelung eine synchrone Zusatzmaschine Verwendung findet, ist in Tafel III zur Darstellung gebracht. Sie ist von der A. E. G. für das Unterwerk „Motzstraße“ des Elektrizitätswerkes Südwest in Schöneberg bei Berlin ausgeführt worden.

Es sind dort vier Einankerumformer mit je einer Leistung von 800 KW aufgestellt (gezeichnet sind nur drei). Ihre Spannung soll in so weiten Grenzen regelbar sein, daß sie sowohl auf die Netzsammelschienen geschaltet, als auch zur Ladung der Akkumulatorenbatterie herangezogen werden können. Die hierzu benutzte Synchronmaschine als Zusatzmaschine ist mit dem Gleichstromanker auf einer Welle jedesmal zusammengebaut. Infolgedessen ist für jede Umformergruppe ein Magnetregler *E.Reg.* und ein Nebenschlußregler *N.Reg.* notwendig. Durch den Regler der Zusatzmaschine wird die Spannung und infolgedessen auch die Energieabgabe geregelt, während der Nebenschlußregler zur Phaseneinstellung dient.

In den Drehstromzuführungsleitungen sind automatische Ölschalter *Sch_{max}*. mit Maximal- und Rückstromrelais *R.R.*, Stromzeiger *Str.Z.*, und Trennschalter *Tr.* eingebaut. Die Relais und Meßinstrumente

haben wiederum Meßtransformatoren erhalten. Für die Auslösevorrichtungen an den Schaltern, die durch die Relais *R.* gesteuert werden, ist Gleichstrom gewählt worden, der der Akkumulatorenbatterie entnommen wird.

Das Anlassen der Umformer erfolgt von der Gleichstromseite mittels eines im Betriebe kurzgeschlossenen Anlassers, und zwar kann hierfür jedes der beiden Gleichstrom-Sammelschienensysteme benutzt werden.

Des besonderen Hinweises bedürfen bei diesem Schaltungsschema noch die folgenden Punkte:

Die Drehstromsammelschienen sind in Gefahrenfällen leicht dadurch spannungslos zu machen, daß man sie durch einen Kurzschlußschalter kurzschließt, eine Anordnung, die seltener anzutreffen ist, die Sicherheit für das Bedienungspersonal indessen recht bemerkenswert erhöht. Außerdem sind die Umformer vor Überspannungen durch entsprechende Sicherheitsapparate geschützt, deren eingehende Erklärung aber erst im III. Abschnitte bei der Besprechung der Schaltanlagen von Transformatoren stattfindet.

Auf der Gleichstromseite sind zwei verschiedene Spannungen erhältlich, und jedes abgehende Gleichstromkabel kann nach Bedarf an das eine oder das andere Sammelschienensystem gelegt werden. Zur Verbindung der beiden Schienensysteme werden automatische Schalter *Sch_{max.}* benutzt. Da das Verteilungsnetz als Gleichstrom-Dreileiteranlage ausgeführt ist, sind nach Fig. 131 die Haupttransformatoren im Mittelpunkt ihrer Niederspannungswicklung angezapft und durch eine besondere Leitung (Nulleitung) mit der Mittelleiter-Sammelschiene verbunden. Der Nulleiter darf erst nach erfolgter Synchronisierung angeschlossen werden, und deswegen ist der Umschalter *U.* vorgesehen.

In Fig. 130 schließlich ist das Schaltungsschema einer Umformerstation abgebildet, in welchem besonders das Anlassen mittels Anwurfsmotoren und die einfache Parallelschaltungsvorrichtung beachtenswert sind.

Auf der Niederspannungsseite der Transformatoren vor dem Hauptmaschinenschalter auf der Drehstromseite *Sch.*, der zum Parallelschalten dient, ist für jeden Umformer mittels Trennschaltern *Tr.* eine Verbindung mit einem besonderen asynchronen Drehstrom-Gleichstrom-Motorgenerator geschaffen. Der Gleichstromgenerator dieser Anlaßgruppe liefert Strom auf die Gleichstrom-Sammelschienen, und die Umformer können von der Gleichstromseite angelassen werden. Nach dem Parallelschalten der Umformer mit dem Drehstromnetze wird der Motorgenerator stillgesetzt.

Jeder Umformer hat ferner seine eigene Synchronisierungsvorrichtung, die einfach aus drei Phasenlampen *Ph.Lp.* und einem umschaltbaren Spannungszeiger *Sp.Z.* besteht. Der Maschinenschalter ist zu diesem Zwecke mit Hilfskontakten *S.K.* versehen. Eine derartige Anordnung für das Synchronisieren ist im Gegensatz zu derjenigen z. B. der Tafel I mit Spannungszeigern sehr einfach, erfordert aber im Betriebe ein sehr geübtes Bedienungspersonal, da anderenfalls Stromstöße beim Parallelschalten nicht zu vermeiden sind.

c) Die Gleichstrom-Drehstromumformung. Diese zweite gleichfalls häufiger verlangte Arbeitsweise kommt dann zur Anwendung, wenn bei einem von anderen Gleichstrommaschinen gespeisten Netze der Umformer eine Reserve auch für das Drehstromnetz bilden und im Falle der Störung an den Drehstromgeneratoren für diese einspringen soll. Eine solche Betriebsweise ist nun allerdings nicht gleich günstig wie die umgekehrte, und nur unter bestimmten Verhältnissen empfehlenswert.

Liegt der Fall zunächst so, daß der Umformer nur dann als Gleichstrom-Drehstromumformer arbeitet, wenn das Drehstromnetz von einer anderen Seite nicht unter Spannung steht, so kann diese Arbeitsweise ohne große Bedenken zugelassen werden, sofern die Belastung nicht induktiv ist und bei der Konstruktion des Umformers von vornherein darauf Rücksicht genommen wird. Sind Drosselspulen oder sonstige Regelapparate auf der Seite des Transformators vorhanden, so sind dieselben natürlich kurzzuschließen bzw. auszuschalten. Ferner ist zu berücksichtigen, daß die Spannung auf der Drehstromseite bis zu den Oberspannungsklemmen des Transformators recht bedeutend abfällt, was nur durch Nachregulierung des Umformers beseitigt werden kann, wenn nicht der Transformator auch überspannungsseitig mit unterteilter Wicklung ausgeführt wird.

Ist die Drehstromseite des Umformers induktiv belastet, also eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung vorhanden, so muß der Umformer ferner mit einem Zentrifugalkurzschließer ausgerüstet werden, um bei Überlastung ein „Durchgehen“ desselben zu vermeiden, denn wie bereits auf S. 163 erwähnt, ist derselbe, solange er nicht synchron auf ein bereits unter Strom stehendes Wechselstromnetz arbeitet, in seiner Drehzahl von der Erregung abhängig. Dieses Durchgehen ist durch folgende Erscheinung bedingt: Infolge der durch die induktive Belastung vorhandenen Phasenverschiebung und der hierdurch eintretenden Ankerrückwirkung der Drehstromseite wird die Magneterregung geschwächt, und dadurch steigt die Drehzahl des Umformers. Um daher eine unzulässige Erhöhung der Drehzahl zu verhindern, bedient man sich des erwähnten Zentrifugalkurzschließers oder auch eines Zentrifugalreglers in Verbindung mit einer Hilfs-erregwicklung; durch letztere wird bei der Überschreitung einer bestimmten Drehzahl die Erregung selbsttätig plötzlich sehr verstärkt, und dadurch die Umdrehungszahl wieder auf ein zulässiges Maß herabgemindert. Diese Hilfs-erregwicklung kann auch an eine besondere, mit dem Umformer gekuppelte, kleine Gleichstrommaschine angeschlossen werden.

Die gleiche Gefahr bezüglich des Durchgehens des Gleichstrom-Drehstromumformers besteht, wenn derselbe parallel auf ein vorhandenes Drehstromnetz arbeitet, das in seiner Periodenzahl schwankt. Auch hier ist ein Zentrifugalkurzschließer oder -regler notwendig. Ist dagegen die Frequenz des vorhandenen Drehstromnetzes dauernd konstant, dann ist das Durchgehen des Umformers bei

Überlastung nicht zu fürchten, weil seine Drehzahl stets im Synchronismus mit dem Netze bleibt, und eine Änderung derselben durch die Erregung nicht mehr möglich ist. Sofern in diesem Falle eine Phasenverschiebung im Umformer auftritt, dient der Gleichstrom-Drehstromumformer als Phasenregler für andere Teile der Gesamtanlage ähnlich dem übererregten Synchronmotor.

Es ist dringend zu empfehlen, auf alle diese Verhältnisse vor der Auftragserteilung auf derartige Umformer hinzuweisen bzw. schon bei der Projektbearbeitung Rücksicht zu nehmen, um beim späteren Betriebe die günstigsten und vor allem auch befriedigende Arbeitsverhältnisse zu erhalten.

Schließlich sei erwähnt, daß man ein Durchgehen des Gleichstrom-Drehstrom-Einankerumformers noch dadurch vermeiden kann, daß man ihm Fremderregung durch eine besondere angekuppelte Erregermaschine gibt, die nur schwach magnetisch gesättigt ist. Mit unzulässig zunehmender Drehzahl steigt der Erregerstrom, und dadurch fällt dann wieder die Drehzahl auf den normalen Wert. In Fig. 132 ist für diese Ausführung ein Schaltungsbild gegeben.

Als weitere Verwendungsarten des Einankerumformers, die indessen aus den nachstehenden Gründen nicht zu empfehlen sind, und auch in die Praxis bisher nur geringen Eingang gefunden haben, sind zu nennen diejenigen zur:

d) Wechselstrom-Gleichstrom- und Gleichstrom-Wechselstromumformung.

Einphasiger Wechselstrom einem solchen Umformer zugeführt, liefert auf der anderen Seite einen schwach pulsierenden Gleichstrom, der zur Speisung insbesondere von Glühlampen nicht geeignet ist. Außerdem sind die magnetischen Verhältnisse so ungünstige, daß eine funkenlose Kommutation am Kollektor der Gleichstromseite nur außerordentlich schwer erreicht werden kann.

Mit einer der Hauptursachen aber dafür, daß der Einankerumformer in dieser Art nicht verwendet wird, bildet die Ausnutzung des Maschinenmodells, die selbst bei einem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ um etwa 15% geringer ist als diejenige eines mechanisch angetriebenen Gleichstromgenerators gleicher Größe (siehe auch S. 150). Wird der Umformer umgekehrt als Gleichstrom-Wechselstromumformer

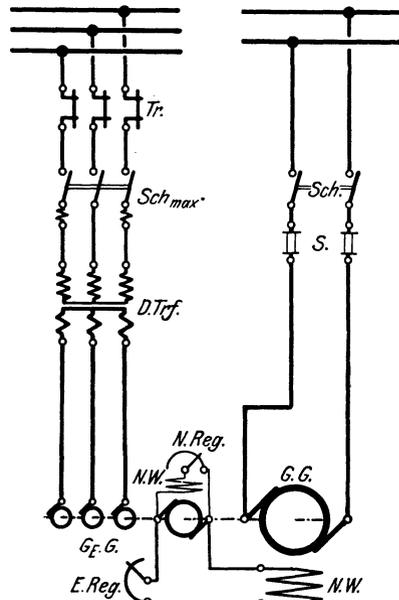


Fig. 132. Schaltungsdiagramm eines Gleichstrom-Drehstrom-Einankerumformers mit besonderer Erregermaschine.

betrieben, so sinkt die Leistung auf der Wechselstromseite bei $\cos \varphi = 0,8$ bis auf etwa 65% der normalen; die Ausnutzung ist also sowohl nach

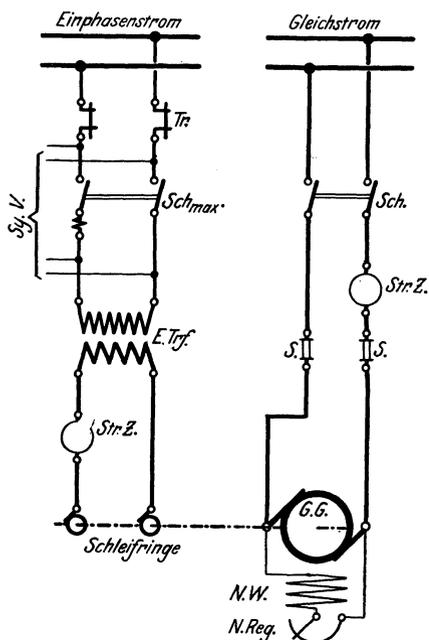


Fig. 133. Schaltungsschema eines Einphasenstrom-Gleichstrom-Einankerumformers.

an dieser Maschine die Stromlieferung auf beiden Seiten natürlich unterbrochen ist. Wenn nicht insbesondere Raumverhältnisse dazu zwingen, eine solche Doppelstrommaschine aufzustellen, sollte man vorteilhafter von der Verwendung derselben absehen, und lieber zwei getrennte Generatoren wählen.

Über die Arbeitsweise des Doppelstromgenerators sei kurz folgendes erwähnt: Den größten Einfluß auf dieselbe hat die Ankerückwirkung der Gleichstrom- und der Wechselstromseite; benutzt man zur Aufhebung der ersteren eine besondere Compoundwicklung auf den Magneten, so bleibt noch der Einfluß der zweiten auf die Erregung bestehen, und man gibt daher vorteilhafter dem Doppelstromgenerator an Stelle der Selbsterregung eine Fremderregung von einem vorhandenen Gleichstromnetze, einer Batterie oder einer besonderen — besser nicht mit dem Umformer zu kuppelnden — Erregermaschine.

Die Bürsten auf der Gleichstromseite müssen, um eine funkenlose Kommutierung zu erreichen, entsprechend der Belastung nachgestellt werden, ein Umstand, der gleichfalls mit Rücksicht auf die notwendige zuverlässige Bedienung sehr unerwünscht ist.

der einen wie nach der anderen Seite als außerordentlich ungünstig zu bezeichnen. In Fig. 133 ist der Vollständigkeit wegen auch ein Schalt-schema für diesen Umformer gegeben.

Schließlich macht auch das Anlassen des Umformers Schwierigkeiten, und es empfiehlt sich daher, sofern es sich um Einphasen-Wechselstrom handelt, besser einen Motor-generator aufzustellen.

e) Der Doppelstromgenerator.

Wie bereits zu Anfang dieses Kapitels erwähnt, kann man den Einankerumformer, sofern man ihn mechanisch antreibt, auch als Doppelstromgenerator benutzend, d. h. als eine Maschine, die sowohl Gleichstrom, als auch Ein- bzw. Mehrphasen-Wechselstrom abgibt. Auch diese Form der Verwendung des Einankerumformers ist in der Praxis bisher selten zu treffen, weil eine Dampf- oder andere Antriebsmaschine nötig, und bei Defekten

f) Der Parallelbetrieb des Einankerumformers. Da in umfangreicheren Anlagen die Einankerumformer oftmals nicht nur drehstromseitig, sondern auch gleichstromseitig mit anderen Einankerumformern bzw. mit Drehstrom- oder Gleichstromgeneratoren parallel arbeiten müssen, ist es für einen zufriedenstellenden Betrieb notwendig, daß die Spannungsabfälle der parallel arbeitenden Maschinen gleich sind. Findet andererseits z. B. Parallelbetrieb mit einer Pufferbatterie statt, was in Bahnkraftwerken fast stets der Fall ist, dann würde einer der Umformer, dessen Spannungsabfall von Leerlauf bis Vollbelastung zu klein ist, die Belastungsstöße aufnehmen, und die Pufferbatterie wäre unwirksam. Es empfiehlt sich, zur Änderung der Spannung auf der Drehstromseite für diese Fälle eine Drosselspule vorzuschalten, oder die Transformatoren mit starker Streuung auszuführen. Soll der Umformer mit Gleichstrom-Nebenschlußgeneratoren parallel arbeiten, dann muß der Spannungsabfall auf den Gleichstromseiten beider Maschinen ebenfalls gleich sein, um eine gute Belastungsverteilung sicher zu erreichen.

Wird während des Parallelbetriebes mit Gleichstromgeneratoren oder Batterien die Wechselstromseite gestört oder unterbrochen, dann arbeitet der Umformer als Gleichstrom-Drehstromumformer und kann unter Umständen eine unzulässig hohe Drehzahl aus den auf S. 170 erklärten Gründen annehmen. Es ist der Umformer infolgedessen bei derartigen Betriebsverhältnissen stets mit einem Zentrifugalregler oder mit einer besonderen Erregermaschine auszurüsten.

Jeder Umformer erhält ferner vorteilhafter einen eigenen Transformator, weil beim Anschlusse mehrerer Umformer an einen gemeinsamen Transformator eine Änderung in der Lastverteilung auf den Gleichstromseiten bei Parallelbetrieb nicht möglich ist. Infolgedessen könnte bei ungleicher Belastung der einzelnen Umformer z. B. einer derselben überlastet und dadurch gefährdet werden.

F. Der Kaskadenumformer.¹⁾

34. Der Kaskadenumformer im allgemeinen.

Zur Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom sind bis vor kurzem fast durchweg die oben behandelten Motorgeneratoren mit Synchron- oder Asynchronmotoren und die Einankerumformer verwendet worden. In neuerer Zeit kommen indessen mehr und mehr auch die Kaskadenumformer zur Anwendung, und zwar weil sie für eine Reihe von Verhältnissen recht schätzenswerte Vorzüge gegenüber den anderen Umformergattungen besitzen.

¹⁾ E. Arnold u. J. L. la Cour: Der Kaskadenumformer. — Dieselben: Die Wechselstromtechnik, Bd. V. — E. T. Z. 1910, Heft 23 u. 24; E. K. B. 1906, Heft 19; E. K. B. 1910, Heft 5.

Die Nachteile des Einankerumformers liegen in der Hauptsache darin, daß derselbe, um von der Wechselstromseite in Betrieb gesetzt zu werden, besondere Anlaßvorrichtungen erforderlich macht. Ferner kann eine funkenfreie Kommutierung des Gleichstromes bei größeren Periodenzahlen des Wechselstromes (über etwa 25 Perioden) nur durch reichliche Dimensionierung des Umformers erzielt werden. Bei dem Motor-generator, bei dem ein Synchronmotor die Gleichstrommaschine antreibt, ist im allgemeinen ebenfalls eine besondere Vorrichtung nötig, um den Motor-generator von der Wechselstromseite anzulassen. Ferner müssen Motor und Generator für die volle Leistung des Gesamtaggregate gebaut werden, und schließlich ist in den meisten Fällen noch eine besondere Erregermaschine erforderlich. Die dritte Anordnung schließlich mit Asynchronmotoren als Antriebsmaschinen hat den Nachteil, daß der aufgenommene Wechselstrom gegenüber der Klemmenspannung

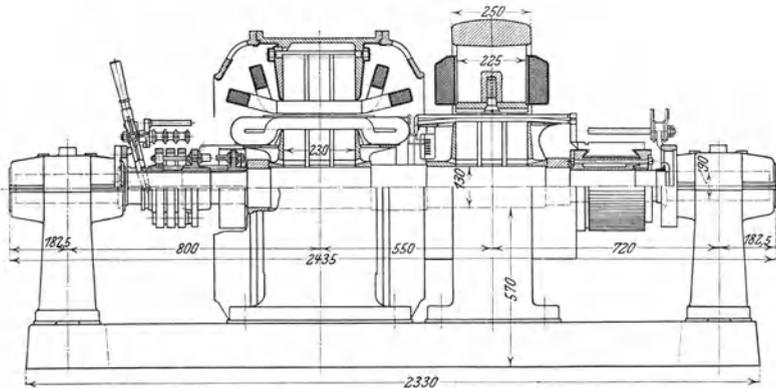


Fig. 134. Schnitt durch einen Kaskadenumformer.

phasenverschoben ist. Für die beiden letztgenannten Formen des Motorgenerators ist noch außerdem der große Raumbedarf zu erwähnen.

Der Kaskadenumformer nun, der von Bragstadt und la Cour angegeben worden ist, vermeidet die einzelnen Nachteile der Motorgeneratoren bzw. Einankerumformer einmal dadurch, daß er ein leichtes Anlaufen von der Wechselstromseite ermöglicht; zweitens kann der Drehstrommotor mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ arbeiten, und drittens gestattet er im Verhältnis zu den drei obengenannten Umformeranordnungen eine Material- bzw. Raum- und Preisersparnis zu erzielen. Der Kaskadenumformer vereinigt somit die Vorzüge der anderen Umformer, und er nähert sich auch in seinem Wirkungsgrade dem Einankerumformer.

Nach Fig. 134 und dem Stromlaufschema Fig. 135 besteht der Kaskadenumformer aus einem gewöhnlichen asynchronen Drehstrommotor und einem Einankerumformer, die beide eine gemeinsame Welle haben; beide Maschinen sind also mechanisch und starr miteinander gekuppelt. Die einen Enden der Läuferwicklung des

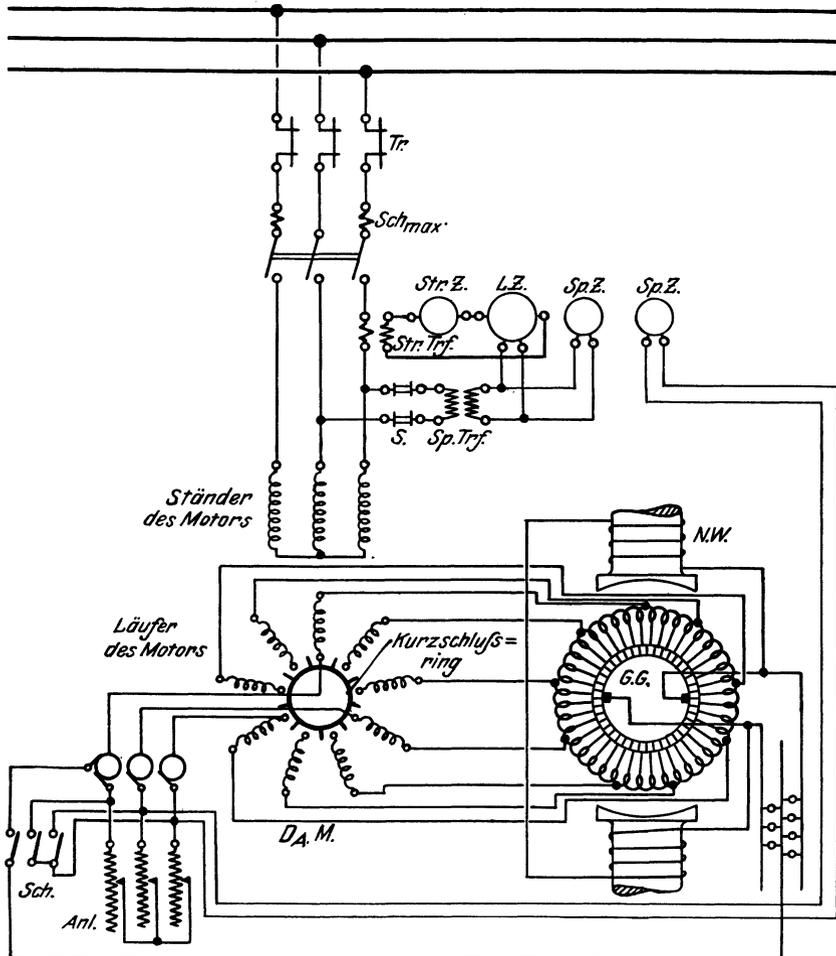


Fig. 135. Stromlaufschema des Drehstrom-Gleichstrom-Kaskadenumformers.

Asynchronmotoren sind in einen Punkt zusammengeschlossen, während die anderen Enden mit äquidistanten Punkten der Ankerwicklung des Einankerumformers verbunden werden. Läufer und Anker sind demnach in Reihe geschaltet, und beide Maschinen infolgedessen auch elektrisch gekuppelt. Der Einankerumformer erhält wiederum Selbsterregung.

35. Die Arbeitsweise des Kaskadenumformers.

a) **Die Drehzahl und die Spannungsverhältnisse.** Um die Arbeitsweise des Kaskadenumformers näher kennen zu lernen, soll auf die elektrischen Verhältnisse etwas ausführlicher eingegangen werden. Zunächst sei erwähnt, daß der Asynchronmotor in seiner Bauart nicht

wesentlich von der normalen abweicht. Es besteht nur insofern ein Unterschied, als der Läufer 9, 12 oder noch mit mehr Phasen gewickelt wird. Die Reihenschaltung des Läufers mit dem Anker des Umformers bezeichnet man als Kaskadenschaltung, wie das für die elektrische Kupplung zweier Drehstrommotoren bereits auf S. 70 erwähnt worden ist, und hiernach hat der Umformer auch seine Benennung.

Der dem Ständer des Asynchronmotors zugeführte Drehstrom erzeugt ein Drehfeld, das mit einer Drehzahl:

$$n_1 = \frac{60 \cdot c}{p_1}$$

umläuft, worin c die Periodenzahl des Drehstromes und p_1 die Polpaarzahl des Asynchronmotors bedeutet. Bezeichnet ferner c_R die Periodenzahl der im Läufer des Motors induzierten EMK., p_2 die Polpaarzahl des Einankerumformers und c_G die Periodenzahl der in der Gleichstromwicklung induzierten EMK., so ist:

$$c_R = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot c = c - \frac{p_1 \cdot n_2}{60} \quad (84)$$

und

$$c_G = \frac{p_2 \cdot n_2}{60},$$

und da naturgemäß:

$$c_R = c_G,$$

so läuft der Kaskadenumformer nicht mit der durch die Frequenz des zugeführten Drehstromes und die Motorpolzahl bedingten Drehzahl, sondern man findet durch Umrechnung, daß:

$$n_2 = \frac{60 \cdot c}{p_1 + p_2}, \quad (85)$$

d. h. also die Umlaufzahl ist umgekehrt proportional der Summe der Polpaarzahlen des Asynchronmotors und der Gleichstrommaschine. Man nennt n_2 die synchrone Drehzahl des Kaskadenumformers. Hat sowohl der Motor als auch der Einankerumformer dieselbe Polzahl, dann ist nach Gl. (85) die Drehzahl, mit der der Läufer und der Umformeranker, die auf derselben Welle sitzen, umlaufen, gleich der Hälfte des Wertes, der sich aus der Periodenzahl des primären Stromes und der Motorpolzahl ergibt. Ist nun die Ankerwicklung des Umformers derart mit der Läuferwicklung des Asynchronmotors verbunden, daß das Drehfeld in der entgegengesetzten Richtung der Welle umläuft, so bleibt dasselbe relativ zum Anker im Raume stehen, und die Maschine verhält sich dann hinsichtlich ihrer Arbeitsweise bei dieser Drehzahl wie ein Synchronmotor. Wenn der Asynchronmotor und der Umformer nicht dieselbe Polzahl besitzen, so läuft das Aggregat mit einer Geschwindigkeit, die sich zu der durch die primäre Periodenzahl bedingten verhält wie die Polzahl des Motors

zu der Summe der Polzahlen von Motor und Umformer, also nach Gl. (85):

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{p_1}{p_1 + p_2};$$

infolgedessen ist dann:

$$n_2 = \frac{p_1}{p_1 + p_2} \cdot n_1. \quad (86)$$

Die dem Motor zugeführte elektrische Energie wird teilweise in mechanische Arbeit und teilweise in elektrische Energie umgesetzt, und zwar läßt Gl. (86) erkennen, daß der $\frac{p_1}{p_1 + p_2}$ te Teil in mechanische Arbeit übergeht, und der $\frac{p_2}{p_1 + p_2}$ te Teil in Form elektrischer Energie vom Ständer auf den Läufer des Motors übertragen und von letzterem dem Anker der Gleichstrommaschine zugeführt wird.

Aus diesen Erörterungen geht hervor, daß man es somit in der Hand hat, die Gleichstrommaschine, also den Einankerumformer, mit der günstigsten Polzahl bauen und dadurch möglichst viel an Material sparen zu können.

Da also das Aggregat bei gleichen Polzahlen mit einer Drehzahl entsprechend der halben Periodenzahl des zugeführten Stromes arbeitet, folgt, daß die Hälfte der dem Asynchronmotor zugeführten elektrischen Energie in mechanische Arbeit umgesetzt und durch die Welle auf den Einankerumformer übertragen wird. Die zweite Hälfte der zugeführten Energie überträgt sich auf die Läuferwicklung und wird an den Umformer ebenfalls in Form von elektrischer Energie weitergegeben. Der Asynchronmotor arbeitet also in diesem Falle zur Hälfte als Motor und zur Hälfte als Transformator, und der Einankerumformer ist zur Hälfte Gleichstromgenerator und zur Hälfte Umformer.

Die Spannungsverhältnisse zwischen Drehstrom- und Gleichstromseite sind bei dem Kaskadenumformer nicht in dem gleichen Maße voneinander abhängig, wie das beim reinen Einankerumformer der Fall ist. Der Ständer des Drehstrommotors kann ohne Rücksicht auf den Gleichstromgenerator bzw. die geforderte Gleichstromspannung für die allgemein üblichen Spannungen ohne Zwischenschaltung eines Transformators gewickelt werden, und der letztere ist nur dann notwendig, wenn der Motor auch als einfacher asynchroner Motor z. B. zum Antriebe von Werkzeugmaschinen usw. infolge seiner Leistung an sich für eine vorhandene hohe Netzspannung nicht mehr gebaut werden könnte. Der Ständer des Motors weicht demnach in seiner Ausführung von demjenigen normaler Asynchronmotoren nicht ab, und das ist ein nennenswerter Vorteil gegenüber dem Einankerumformer, weil eben Motoren normaler Fabrikation verwendet und dieselben unmittelbar mit Hochspannung betrieben werden können.

Die Zuführung des Drehstromes vom Läufer des Motors zum Anker der Gleichstrommaschine erfolgt ohne Zwischenschaltung von Schleifringen in der Form, daß die Leitungen durch die hohle Welle gezogen werden. Dem Läufer kann somit ohne Schwierigkeit eine große Phasenzahl gegeben werden. Im allgemeinen wickelt man denselben für etwa 9 oder 12 Phasen. Diese große Phasenzahl hat, wie bereits früher gesagt, für den Einankerumformer die Vorteile, daß die Verluste durch Stromwärme geringer ausfallen, dadurch also der Wirkungsgrad wesentlich erhöht wird, und die synchronisierende Kraft wächst.

Auch mit Rücksicht auf die Leistung kann man bei den Kaskadenumformern eine recht nennenswerte Gewichtersparnis erzielen. Er wird daher immer viel billiger als beispielsweise ein Motorgenerator gleicher Leistung und Drehzahl, abgesehen davon, daß sein Wirkungsgrad besser als derjenige der Motorgeneratoren ist (siehe Tab. VIII). Die Abmessungen des Asynchronmotors sind nämlich in erster Linie von der primären Periodenzahl und nicht von der Drehzahl des Läufers abhängig, und weil der Motor nur

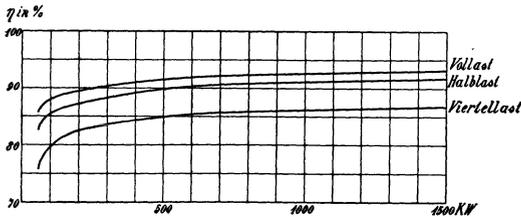


Fig. 136. Wirkungsgradkurven für einen 1500-KW-Kaskadenumformer.

die halbe mechanische Leistung abzugeben hat, wird derselbe theoretisch nur halb so groß, als wenn er bei der gegebenen Drehzahl die ganze zugeführte elektrische Energie in mechanische Leistung umsetzen müßte. Der Umformer arbeitet ferner mit einer Periodenzahl gleich der Hälfte der primären, wird somit in bezug auf die Funkenbildung am Kollektor günstiger und kann ebenfalls kleiner bemessen werden als eine gewöhnliche Gleichstrommaschine oder ein gewöhnlicher Einankerumformer. Der Kaskadenumformer ist daher bei hoher Netzfrequenz vorteilhafter als der Einankerumformer. Den funkenlosen Gang des benutzten Einankerumformers kann man schließlich noch durch den Einbau von Wendepolen sicherstellen, was dann notwendig ist, wenn starke Belastungs- und Spannungsschwankungen auftreten.

Die genannten günstigen Verhältnisse, die sowohl für die Drehstrom- als auch für die Gleichstromseite bestehen, haben naturgemäß zum Ergebnisse, daß der Kaskadenumformer neben einem geringen Gewichte auch in seinem Wirkungsgrade sehr günstig liegt, wobei noch bemerkt sein soll, daß auch mechanisch die günstigste Ausführung dadurch möglich ist, daß die beiden Maschinen unmittelbar zusammengebaut werden und die Zahl der Lager bis auf zwei herabgeht (Fig. 134). In Fig. 136 sind die Wirkungsgradkurven eines 1500-KW-Kaskadenumformers in Abhängigkeit von der Leistung dargestellt¹⁾. Nach Angaben

¹⁾ H. S. Hallo: Der Kaskadenumformer. E. T. Z. 1910, Heft 23 u. 24.

der Maschinenfabrik Oerlikon ist z. B. der Wirkungsgrad eines 1000-KW-Motorgenerators bei Vollast 89,3% (95% für den Motor, 94% für den Generator), während derselbe für einen Kaskadenumformer gleicher Leistung 92,5% beträgt, also rund 3% günstiger ist. Das ergibt bei einer Vollbelastung während 10 Stunden am Tage und 250 Betriebstagen, wenn die Kilowattstunde 5 Pf. kostet, eine Ersparnis von

$$10 \cdot 250 \cdot 0,03 \cdot 1000 \cdot 0,05 = 3750 \text{ M.}$$

Bei halber Belastung sind die Wirkungsgrade 85,5% bzw. 91%. Schließlich ist noch auf den Raumbedarf dieser Umformergattung besonders aufmerksam zu machen, der alles in allem gerechnet — also gegenüber dem Einankerumformer einschließlich Transformator — wesentlich geringer ausfällt als bei allen anderen Umformern.

b) Das Anlassen. Das Anlassen des Kaskadenumformers erfolgt in der Regel von der Drehstromseite in der gleichen einfachen Weise wie bei jedem normalen asynchronen Drehstrommotor mittels eines festen Widerstandes im Läuferstromkreise zur Vermeidung eines zu hohen Anlaufstromes. Das ist besonders dann von großer Bedeutung, wenn das Anlassen von der Gleichstromseite ausgeschlossen ist, wenn also Gleichstrom aus einer anderen Quelle nicht zur Verfügung steht. Aus dem Schaltungsschema Fig. 135 erkennt man, daß drei um 120° gegeneinander versetzte Phasen des Läufers zu Schleifringen geführt und letztere mit einem Anlasser verbunden sind; die übrigen Phasen bleiben während der Anlaufzeit offen. Da, wie eingangs bereits erwähnt, der Einankerumformer ferner mit Selbsterregung arbeitet und sich also beim Anlaufen nur langsam erregt, so hat der Asynchronmotor wie jeder gewöhnliche Drehstrommotor das Bestreben, auf die volle Synchrondrehzahl hinaufzulaufen. In der Schaltung als Kaskadenumformer läuft er indessen nur mit der halben der normalen Drehzahl, und er kann somit ohne weiteres in den dann festgelegten Synchronismus hineinlaufen. Überschreitet er seine normale Drehzahl, die demnach dem halben Synchronismus entspricht, um etwa 20 bis 25%, dann hat sich die Gleichstrommaschine vollständig erregt, und die Drehzahl des Motors beginnt wieder zu fallen. Ist die Drehzahl bis auf den normalen synchronen Wert gesunken, was man an den Schwankungen eines Spannungszeigers erkennt, der zwischen zwei Schleifringen angeschlossen wird, dann wird der Anlaßwiderstand kurzgeschlossen, die Bürsten abgehoben und gleichzeitig die Läuferwicklung im Sternpunkte kurzgeschlossen. Der Kaskadenumformer läuft wie eine Synchronmaschine weiter und wird in der bei Gleichstrommaschinen üblichen Art auf das Gleichstromnetz geschaltet. An dem erwähnten Spannungszeiger kann man die Drehzahländerungen an den Spannungsschwankungen verfolgen, die um so langsamer werden, je mehr sich die Drehzahl des Umformers der Betriebsdrehzahl nähert, denn die im Läufer und im Umformeranker induzierten EMKe. addieren sich, oder heben sich auf, je nach dem die Umdrehungen des Aggregates in die Nähe des Synchronismus kommen. In dem Augenblicke, in dem der

Zeiger durch Null geht, ist die Betriebsdrehzahl erreicht, und die Schleifringe werden durch einen besonderen dreipoligen Hebelschalter *Sch.* kurzgeschlossen. Zu beachten ist noch, daß der Nebenschlußregler der Gleichstromseite des Einankerumformers nicht ausschaltbar eingerichtet werden darf, damit bei jeder neuen Inbetriebsetzung die Erregung der Gleichstrommaschine mit Sicherheit wieder eintritt, denn bei offenem Erregerstromkreise versucht der Umformer auf die doppelte Drehzahl zu kommen, und es könnte dann die Magnetwicklung infolge zu hoher Spannung gefährdet werden.

Diese außerordentlich bequeme Art, den Kaskadenumformer ohne besondere Hilfsapparate und ohne umständlich synchronisieren zu müssen, von der Drehstromseite in Gang zu setzen, ist mit einer der Hauptvorzüge desselben gegenüber dem Einankerumformer und dem synchronen Motorgenerator. Außerdem kommt noch die große Einfachheit seiner Anlaßapparate hinzu.

Steht ein Gleichstromnetz zur Verfügung, so steht natürlich nichts dagegen, den Kaskadenumformer auch von der Gleichstromseite anzulassen. In empfindlichen Netzen kann dann auch der Asynchronmotor noch besonders synchronisiert werden (S. 137). Diese Art der Inbetriebsetzung kommt indessen wohl kaum zur Anwendung.

c) Die Spannungsregelung. Eine Regelung der Gleichstromspannung kann bei den Kaskadenumformern bis auf etwa $\pm 10\%$ ohne das Vorschalten von Drosselspulen, Streutransformatoren oder besonderen Zusatzmaschinen allein durch die Änderung der Gleichstromerregung vorgenommen werden, und auch hierin liegt ein besonderer Vorzug desselben gegenüber dem Einankerumformer. Das ist möglich, weil die Reaktanz des Asynchronmotors des Umformers in ähnlicher Weise wie eine Drosselspule wirkt. Für eine Spannungsregelung auf der Gleichstromseite in weiteren Grenzen empfiehlt es sich indessen, auch diesem Umformer eine synchrone Wechselstromzusatzmaschine vorzuschalten, die auch zur Verbesserung des Leistungsfaktors benutzt werden kann. Durch Änderung der Erregung erhöht oder vermindert sich unter dem Einfluß der Reaktanz des Motors die Spannung auf der Wechselstromseite des Einankerumformers und infolgedessen auch die von ihr abhängige Gleichstromspannung. Schwächt oder verstärkt man bei konstanter Drehstromspannung an den Motorklemmen die Erregung des Kaskadenumformers, so kann auf diese Weise ebenfalls die Aufnahme eines nacheilenden oder die Lieferung eines voreilenden Stromes durch den Umformer in gewissen Grenzen geregelt werden. Betriebsstörungen infolge von Pendelungen sind durch das Aufbringen einer Dämpferwicklung auf die Hauptpole ebenfalls vermeidbar.

Schließlich sei erwähnt, daß man den Kaskadenumformer auch in Gleichstrom-Dreileiteranlagen verwenden kann, und zwar wird in diesem Falle der Gleichstromnulleiter an den Sternpunkt der Phasen des Läufers angeschlossen, weil der neutrale Punkt der Läuferwicklung zugleich der neutrale Punkt für die Gleichstromwicklung ist

(Fig. 135). Der Nulleiter darf erst, nachdem der Umformer auf synchronen Lauf gekommen ist, eingeschaltet werden. Man benutzt hierfür in der Regel eine zusätzliche Bürste, die beim Abheben der drei Bürsten für das Anlassen auf dem einen Schleifringe liegen bleibt. Bei der Dreileiterschaltung wirkt der Umformer zugleich als Ausgleichsmaschine. In der Praxis ist bereits wiederholt beobachtet worden, daß diese Ausgleichswirkung eine derart gute ist, daß, wenn eine Hälfte des Dreileitersystems ganz entlastet und die andere vollbelastet wird, der Spannungsunterschied zwischen den Mittelleitern und den Außenleitern nur wenige Prozent beträgt. Man versieht in solchem Falle den Umformer mit Wendepolen, und schaltet die Wicklung der Wendepole abwechselnd in den einen oder anderen Außenleiter, während man auf die Hauptpole eine vom Mittelleiterstrom durchflossene Hilfsrergerwicklung aufbringt.

d) Die Verwendung des Kaskadenumformers ist fast ausschließlich diejenige für Drehstrom-Gleichstromumformung, indessen ist es auch möglich, durch eine Compoundwicklung auf den Polen der Gleichstrommaschine diesen Umformer gleichzeitig zur Umformung von Gleichstrom in Drehstrom einzurichten. Man ist dann bei einer derartigen Ausführung in der Lage, zeitweise Energie aus einem Gleichstromnetze, das für gewöhnlich durch den Umformer in Verbindung mit anderen Gleichstromgeneratoren gespeist wird, in das Drehstromnetz zu überzuleiten.

Hinsichtlich der Arbeitsweise bei Einphasen-Wechselstrom gelten sinngemäß die Ausführungen über die Induktionsmotoren im I. Abschnitte und die Einankerumformer auf S. 171. Dasselbe ist der Fall für den Parallelbetrieb, und zwar ist auch für den Kaskadenumformer ein Zentrifugalkurzschließer erforderlich, wenn die Frequenz des zugeführten Wechsel- bzw. Drehstromes nicht konstant ist, und der Umformer induktiv belastet wird.

In Fig. 137 sind noch die charakteristischen Kurven eines 370-KW-Kaskadenumformers abgebildet; Kurve I zeigt die Leerlaufcharakteristik als Umformer, Kurve II die Stromentnahme aus dem Drehstromnetze bei veränderlicher Erregung und konstanter Statorspannung von 5000 Volt; Kurve III stellt die Leerlaufcharakteristik des Gleichstromgenerators als Motor bei offenem Motorstromkreise dar.

Die praktische Ausführung eines solchen Umformers in der Bauart der E. A. vorm. Kolben & Co., Prag, zeigt die Fig. 138. Man kann deutlich die Kurzschluß- und Bürstenabhebvorrichtung erkennen, die mittels eines angebauten Handgriffes zu bedienen ist. Der Motor leistet 100 PS bei einer Betriebsspannung von 350 Volt, 40 Perioden in der

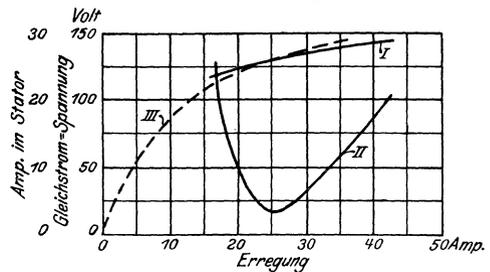


Fig. 137. Charakteristische Kurven eines 370-KW-Kaskadenumformers.

Sekunde und 600 minutlichen Umdrehungen. Der Läufer ist neunphasig gewickelt. Der Gleichstromgenerator liefert 70 KW bei 300 Volt Spannung. Beide Maschinen sind auf derselben Grundplatte aufgebaut. Der

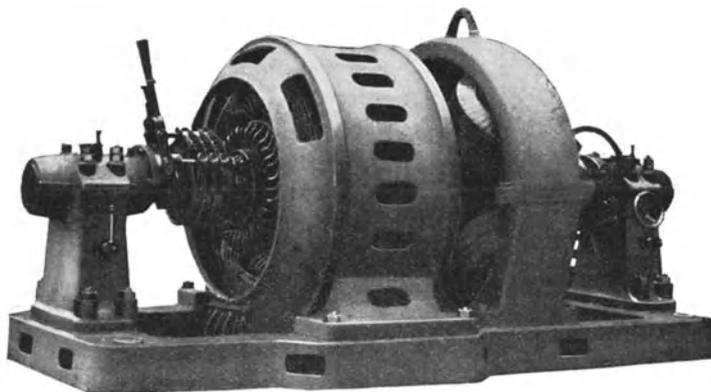


Fig. 138. 370-KW-Kaskadenumformer.

Wirkungsgrad des Umformers wurde bei Vollast zu 85% gemessen, ein Wert, der bei den relativ kleinen Maschinen als günstig angesehen werden muß. Da die zugeführte Drehstromspannung eine Höhe von

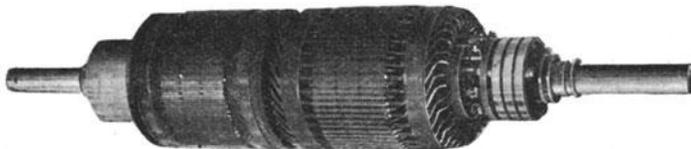


Fig. 139. Armatur des 370-KW-Kaskadenumformers.

10 000 Volt hat, mußte ein Transformator zwischengeschaltet werden. In Fig. 139 sind ferner noch die beiden auf eine gemeinsame Welle aufgezogenen Anker dieses Maschinensatzes abgebildet, deren elektrische Verbindung unmittelbar vorgenommen worden ist.

36. Ausgeführte Umformeranlagen.¹⁾

Bevor nun zur Beschreibung einiger ausgeführter Umformerstationen übergegangen wird, soll dem projektierenden Ingenieur zunächst an Hand eines praktischen Beispieles ein Überblick gegeben werden, wie sich die verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten eines Umformers hinsichtlich der Baulänge, der Wirkungsgrade, Gewichte usw. zueinander verhalten. Der Betrachtung ist ein 1000-KW-Drehstrom-Gleichstromumformer zugrunde gelegt worden. In der Tab. VIII sind alle Werte

¹⁾ Wenn bei der Besprechung vollständiger Umformerwerke auch auf Transformatoranschaltanlagen usw. kurz eingegangen worden ist, so geschieht das, um im III. Abschnitte auf diese praktischen Beispiele verweisen zu können.

von besonderer Bedeutung zusammengestellt¹⁾. Ganz allgemein sei bemerkt, daß bei der angenommenen und in Deutschland fast durchweg anzutreffenden Frequenz von 50 Perioden in der Sekunde die Drehzahlen der einzelnen Umformergattungen so gewählt worden sind, wie sie mit Rücksicht auf einen Vergleich der Abmessungen und Preise und der Leistung von 1000 KW an sich am günstigsten liegen. Für die sich hieraus ergebenden Motormodelle wurde die Spannung in ihrem Grenzwerte, also mit einer solchen Höhe angegeben, wie sie mit Ausnahme des Einankerumformers noch ohne Zwischenschaltung eines Transformators für die Ständerwicklungen zugelassen werden kann. Die Gleichstromspannung wurde zu 550 Volt gewählt. Eine besondere Regelung derselben sei nicht erforderlich, so daß also zusätzliche Apparate oder Maschinen wie Drosselspulen, drehbare Zusatztransformatoren, synchrone Zusatzmaschinen usw. unnötig sind. Das Anlassen soll von der Gleichstromseite möglich sein.

Ferner sind sämtliche Maschinensätze in ihrem elektrischen Aufbau so günstig wie nur möglich ausgeführt, d. h. die Gleichstrommaschinen erhalten Wendepole, die Drehstrommaschinen bzw. der Einankerumformer Wendepole und Dämpferwicklung, und schließlich ist der letztere sowohl wie der Kaskadenumformer mit der vorteilhaftesten Phasenzahl im Läufer gewickelt.

Aus der Gegenüberstellung der Einzelgewichte können Schlüsse gezogen werden über den gemeinsamen Grundrahmen bei Mehrlagermaschinen, die Gewichtsabnahme bei Verminderung der Zahl der Lager, und mit Zuhilfenahme der am Kopfe der Tabelle VIII eingetragenen Maßzeichnungen ist ein Vergleich der mechanischen Ausführungen leicht möglich.

Der Synchron - Motorgenerator ist in drei verschiedenen Bauarten angegeben. Der Unterschied in den Abmessungen zwischen der Vierlager- und Zweilagertype beträgt 1290 mm und derjenige der Gewichte 3190 kg. Das sind Zahlen, die bei Anlagen mit beschränkten Raumverhältnissen, z. B. dort, wo die Umformer etwa im I. Stockwerke eines Gebäudes untergebracht werden müssen, außerordentlich beachtenswert sind. Die Wirkungsgrade bei den verschiedenen Teilbelastungen sind naturgemäß schlechter als die des Einanker- und Kaskadenumformers. Wenn daher keine Gleichstrom-Spannungsregelung in weiten Grenzen und die Verbesserung des Leistungsfaktors des Netzes verlangt werden, so wird man wohl in der Mehrzahl der Fälle den Synchron-Motorgenerator nicht wählen.

Ist der Synchronmotor nicht auf den Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ einreguliert, so ist sein Wirkungsgrad und damit natürlich auch derjenige des Motorgenerators um durchschnittlich 1,5 % schlechter, ein Umstand, der dann besonders zu beachten ist, wenn die zugeführte elektrische Energie an einen fremden Unternehmer zu bezahlen ist.

¹⁾ Die Unterlagen für die Tabelle VIII wurden dem Verfasser von den Siemens-Schuckert-Werken freundlichst zur Verfügung gestellt.

Um jederzeit bequem an den Kommutator, die Schleifringe und die Erregermaschine sowie, die Lager gelangen zu können, also einer guten Wartung und Aufsicht wegen, stehen bei der großen Leistung die Maschinen nicht vollständig auf dem Maschinenhausfußboden, sondern sie sind zum Teil in diesen eingelassen. In einem solchen Falle ist dann mit Rücksicht auf eine bessere Lageraufstellung ein geschlossener Grundrahmen sehr zu empfehlen.

Der Asynchron-Motorgenerator unterscheidet sich hinsichtlich seiner Baulänge, wenn man von dem Fortfall der Erregermaschine absieht, nur unwesentlich von dem Synchron-Motorgenerator. Ist für letzteren indessen die Erregermaschine z. B. infolge des Fehlens einer anderen Gleichstromquelle unbedingt erforderlich, dann allerdings ist der asynchrone Maschinensatz bedeutend kürzer, weil unter Umständen auch noch der Anwurfsmotor für die Synchronmaschine hinzukommt.

Die Wirkungsgrade sind selbst bei dem Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,91$ bei Vollbelastung um ein geringes besser als beim Synchron-Motorgenerator. Das trifft allerdings nur bei großen Aggregaten in diesem Maße zu, weil sich dann der Asynchronmotor sehr vorteilhaft bauen läßt. Berücksichtigt man ferner die leichtere Inbetriebsetzung von der Drehstromseite aus, so sind die Vorzüge des Asynchron-Motorgenerators nicht ohne weiteres von der Hand zu weisen.

Der Einankerumformer ist, wie deutlich erkennbar, naturgemäß der vorteilhafteste Umformer aus der ganzen Zusammenstellung, und zwar sowohl in bezug auf den Wirkungsgrad als auch hinsichtlich der Baulänge und der Gewichte. Nicht zu vergessen ist aber bei dem Vergleiche, daß der Transformator notwendig ist, und daß die Schaltanlage, die Leitungen auf der Unterspannungsseite des Transformators infolge der großen Stromstärken und die Spannungsregelung recht umständlich und durch die zusätzlichen Vorrichtungen teuer sind, zumal wenn wie beim Synchron-Motorgenerator noch die Synchronisierapparate erforderlich werden. Hier wird infolgedessen nur eine sorgfältige Preisgegenüberstellung der Gesamtanlage und die Ermittlung der jährlichen Ersparnis an Stromkosten zu einem sicheren Vergleichsergebnisse führen.

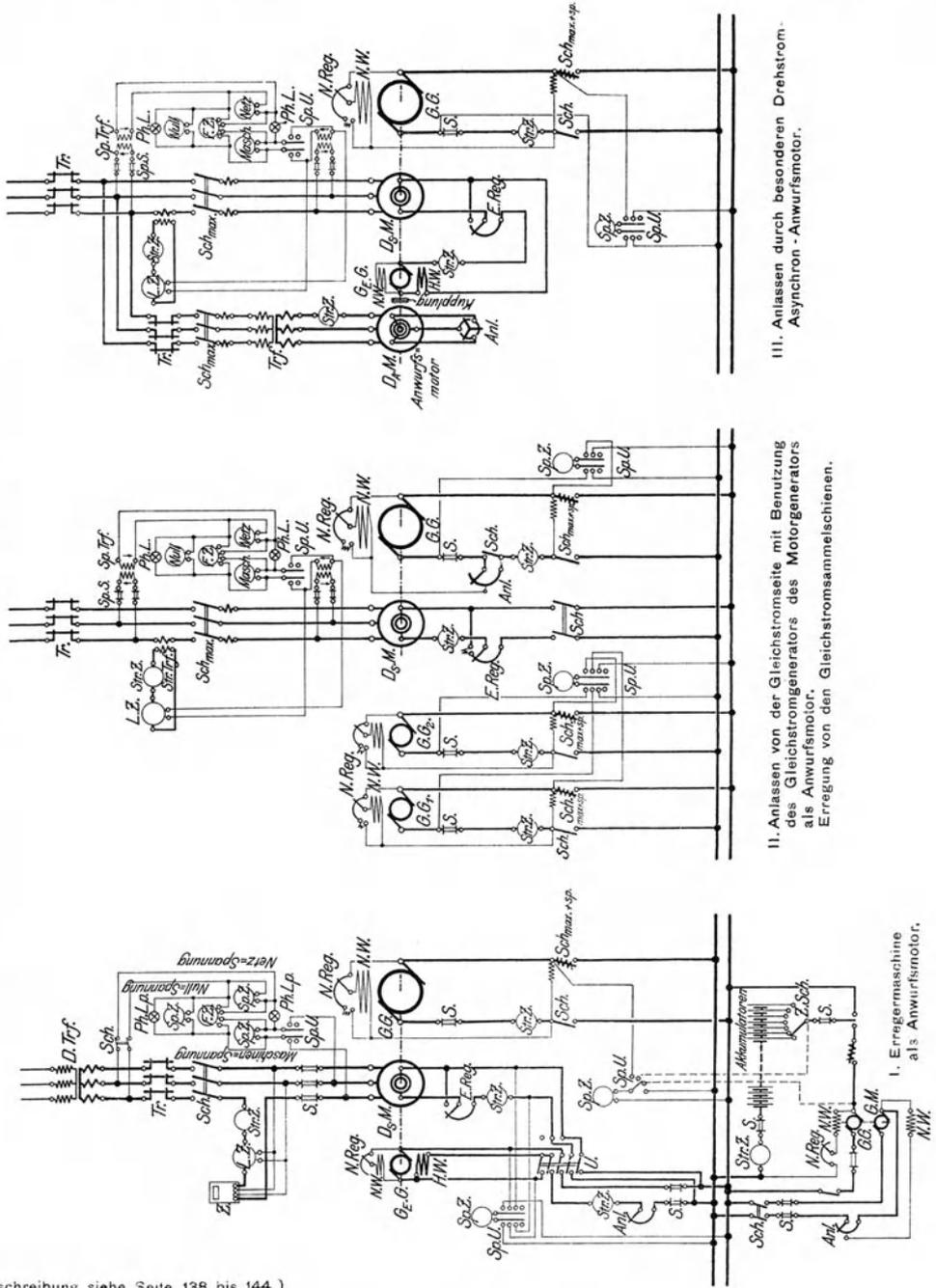
Zu der Bodenfläche für den Umformer selbst ist ferner auch noch diejenige für den Transformator hinzuzurechnen, die für den der Tabelle VIII zugrunde gelegten Fall etwa 3 qm beträgt unberücksichtigt des Raumes für die Leitungen usw.

Der Kaskadenumformer schließlich steht zwischen dem Asynchron-Motorgenerator und dem Einankerumformer sowohl im Wirkungsgrade, als auch im Gewichte und in der Baulänge. Über die Unterschiede in elektrischer Beziehung ist früher bereits ausführlich gesprochen worden, so daß hier darauf verwiesen werden kann.

Nur kurz sei noch erwähnt, daß dieser Umformer, wie die Maßzeichnung erkennen läßt, eine besondere Luftführung zwischen beiden Maschinen erhalten hat (S. 120), um die Verluste durch Luftreibung so weit irgend möglich zu vermindern. Eine solche Ausführung besitzt der

Schaltungsschemata für Synchron - Motorgeneratoren.

(Beschreibung siehe Seite 138 bis 144.)



II. Anlassen von der Gleichstromseite mit Benutzung des Gleichstromgenerators des Motorgenerators als Anwurfsmotor. Erregung von den Gleichstromsammlerschienen.

III. Anlassen durch besonderen Drehstrom-Asynchron-Anwurfsmotor.

I. Erregemaschine als Anwurfsmotor.

Umformer Fig.138 nicht. Man wählt sie in der Regel nur bei größeren Leistungen.

Von ausgeführten Umformeranlagen ist in Fig. 140 zunächst diejenige des Elektrizitätswerkes Zürich für die Lieferung von Gleichstrom an die Straßenbahn abgebildet, die von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaut worden ist, und in der drei Motorgeneratoren von je 300 KW zur Aufstellung gekommen sind. Jeder Motorgenerator besteht aus einem Drehstrom-Synchronmotor für 5700 Volt verkettete Spannung und 50 Perioden in der Sekunde, der mittels einer elastischen Lederbandkupplung mit einem Gleichstromgenerator für 600 Volt gekuppelt ist. Die Drehzahl des Vierlageraggregates beträgt 370 in der Minute. Von der Verwendung einer gußeisernen, gemeinsamen Grundplatte bzw. eines Grundrahmens ist abgesehen worden, weil die Bauhöhe der beiden Maschinen noch ohne weiteres eine gute Aufsicht und Bedienung aller Teile zuläßt, und man kann nicht behaupten, daß eine solche Montage unschön wirkt.

Vor jedem Motorgenerator ist eine Schaltsäule aufgestellt, die die Meßinstrumente für die Synchronmaschinen trägt. Links neben den Säulen sind die Handräder für die Erregerregulatoren, rechts die Handhebel für die Hauptschalter installiert. Auf diese Weise wird erreicht, daß der hochgespannte Drehstrom von der Gleichstrom-Schalt- und Verteilungsanlage vollständig ferngehalten ist. Die Gleichstrom-Schalttafel ist in Fig. 140 nicht mehr abgebildet. Sie steht zu ebener Erde vor den Schaltsäulen und ist von diesen durch einen breiten Bedienungsgang getrennt. Der Maschinenwärter hat somit die Möglichkeit, beide Schaltanlagen leicht zu übersehen und bequem bedienen zu können.

Ein anderes Umformerwerk ist in den Fig. 141 und 142 im Grundrisse und Querschnitt, und zwar aus der Kraftübertragungsanlage der Indianapolis, New Castle and Toledo Electric Railway¹⁾ zur Darstellung gebracht. Diese Gesellschaft erzeugt elektrische Energie in Form von Drehstrom mit 25 Perioden in der Sekunde und einer Fernleitungsspannung von 45 000 Volt für die Versorgung eines ausgedehnten Bahnnetzes. Die im Kraftwerke benutzten Transformatoren sind als Einphasentransformatoren zu je 3 in Dreieck geschaltet, während ein vierter in Reserve steht (s. S. 263).

Ein Unterwerk nach der Bauart der Fig. 141 ist im Kraftwerke selbst eingerichtet, und auf der Strecke befinden sich 3 weitere derartige Stationen, die alle vollkommen übereinstimmend gebaut sind. Auf eine leichte und bequeme Erweiterungsfähigkeit ist von vornherein Rücksicht genommen worden. Der Ausbau der Anlagen ist, man möchte sagen, typisch amerikanisch, denn eine besondere Raumeinteilung mit Querwänden für die Hochspannungstransformatoren, die Schalt- und Meßinstrumente und den Umformer ist in der Weise, wie er in Deutschland nach den Sicherheitsvorschriften der V. D. E. notwendig ist, nicht getroffen worden. Auch z. B. die Hörnerfunkenstrecken, die in

[Forts. siehe S. 188.]

¹⁾ Siehe E. K. B. 1911. Heft 20, S. 397.

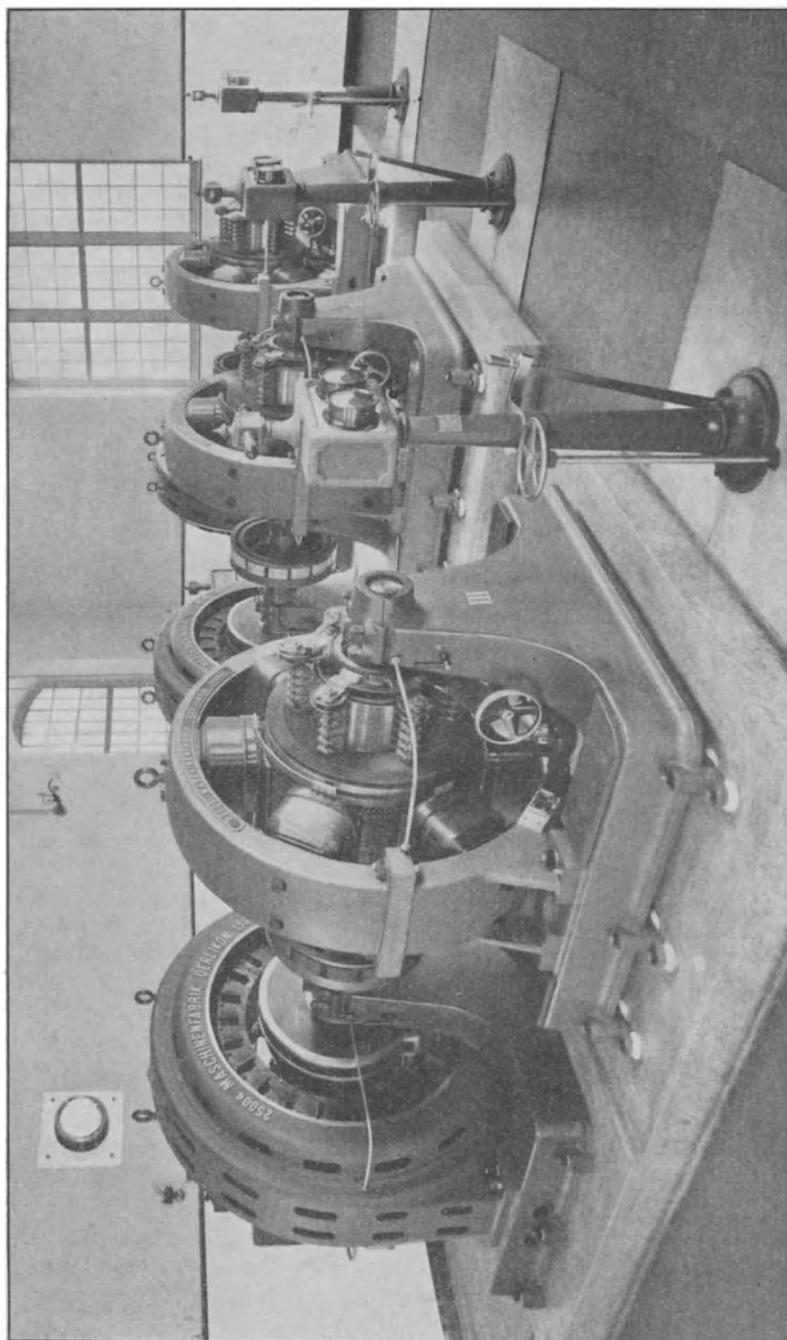


Fig. 140. Umformerstation des Elektrizitätswerkes Zürich mit 3 Synchron-Motorgeneratoren.

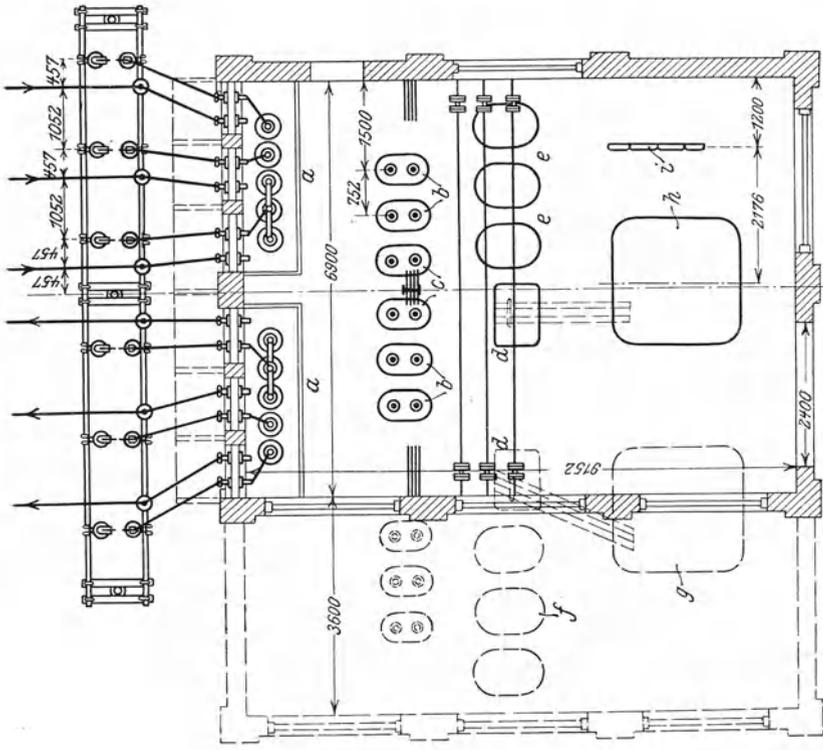


Fig. 141. Umformerwerk der Indianapolis, New Castle and Toledo Electric Railway.

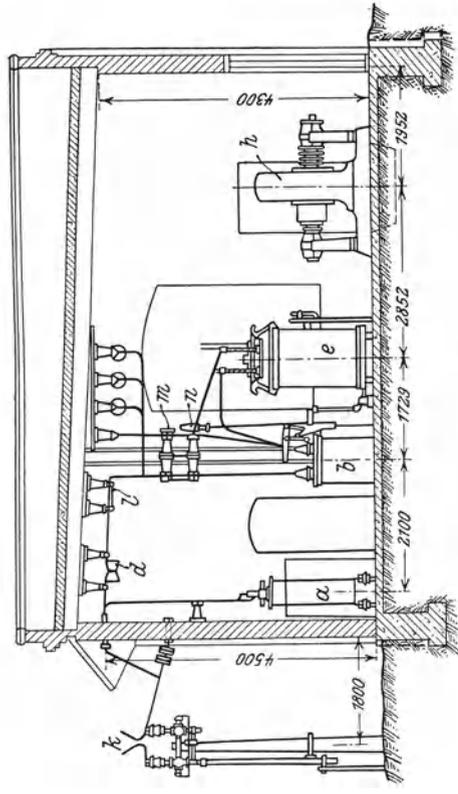


Fig. 142.

- a* und *k* Überspannungsschutzapparate,
- d* Überspannungsschutz (Drosselpulen),
- l* Trennschalter,
- m* Stromzeiger,
- b* und *c* Dreikessel-Ölschalter,
- n* Relais für die Ölschalter,
- e* und *f* Einphasentransformatoren,
- d* Drosselpulen für die Spannungsregelung,
- g* und *h* Einankerumformer,
- i* Gleichstromschalttafel.

europäischen Anlagen fast ausnahmslos innerhalb des Gebäudes installiert werden (S. 294), sind hier auf Masten außerhalb des Werkes angeordnet.

Für die Umformer sind durchweg die gleichen Typen, und zwar Einankerumformer von je 300 KW Leistung gewählt, denen der Drehstrom über je 3 wiederum zu einem Drehstromtransformator zusammengeschalteten ölisierten Einphasentransformatoren mit einer Leistung von je 110 KW zugeführt wird.

Die Fig. 141 und 142 lassen nun den Ausbau eines solchen Umformerwerkes erkennen. Die ankommenden Leitungen treten durch isolierende Mauerdurchführungen in das Gebäude ein, führen über Drossel-

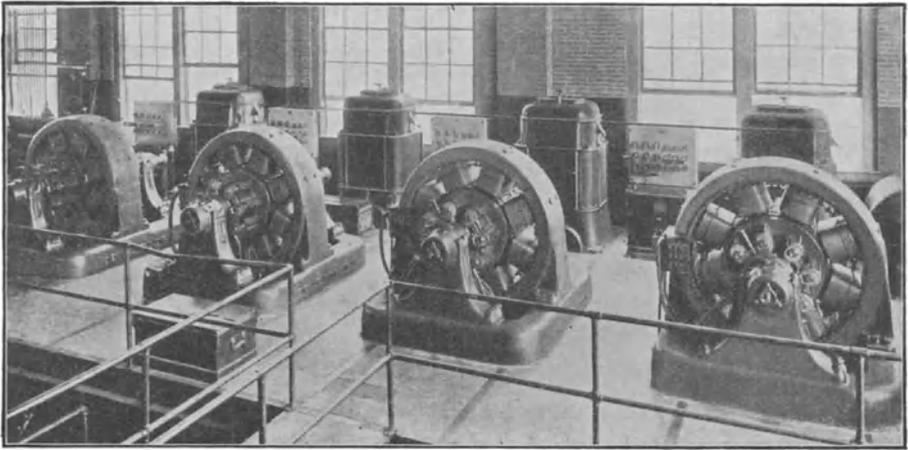


Fig. 143. Einankerumformer auf der Galerie in einem Kraftwerke der Union El. Pow. Co.

spulen¹⁾ zu Trennschaltern, von dort zu dem Hauptölschalter für 45000 Volt und 100 Amp. (Dreikesselschalter) mit Zeitrelais und für Handeinschaltungen nach den Transformatoren. Der Einankerumformer steht in unmittelbarer Nähe der letzteren und ist mit der Unterspannungsseite über Drosselspulen für die Spannungsregelung verbunden. Für die abgehenden Gleichstrom-Verteilungsleitungen ist eine kleine Schalttafel vorgesehen.

Die ankommende Hochspannungsleitung verläßt die Umformerstation wieder. Ein besonderer Ölschalter ist auch in die abgehende Linie eingebaut worden.

Da die ganze Kraftübertragungsanlage in einem Gebiete liegt, das im Sommer sehr heiß ist, so ist das Dach jedes Umformerwerkes sehr stark gehalten und besonders gebaut, um die Außenwärme möglich

¹⁾ Die Erläuterung der erwähnten Blitz- und Überspannungsschutzapparate ist im III. Abschnitte auf S. 294 u. f. zu finden.

von dem Innenraume fernzuhalten. Die Belüftung solcher Stationen ist im III. Abschnitte ausführlich behandelt worden.

Wie außerordentlich bequem die Einankerumformer infolge ihres geringen Gewichtes aufzustellen sind, und wie wenig Raum sie selbst mit Berücksichtigung der zugehörigen Transformatoren beanspruchen, zeigt deutlich die Fig. 143. Auf der Galerie in einem Dampfturbinen-Kraftwerke der Union El. Pow. Co. in Dubuque, Iowa¹⁾ haben vier

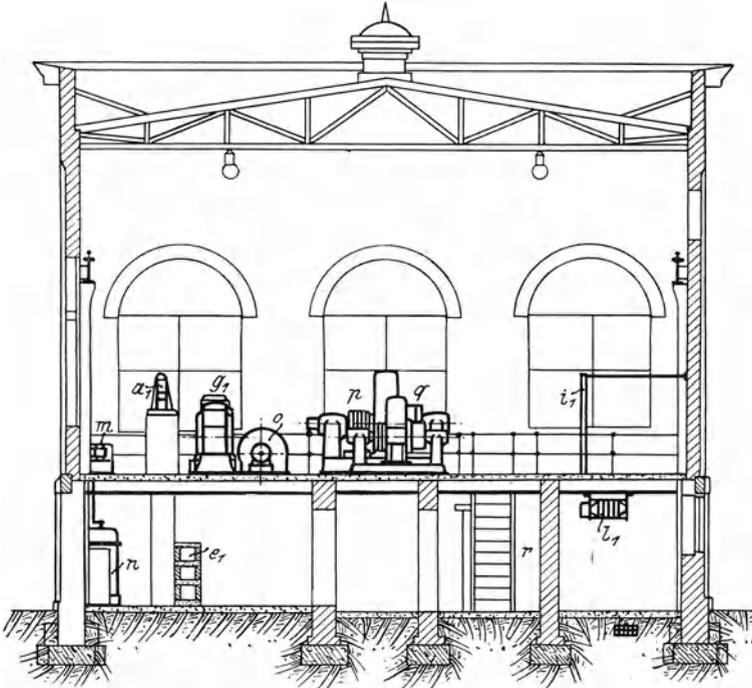


Fig. 144. Bahnkraftwerk der Schenectady Straßenbahn- und Beleuchtungsgesellschaft mit Einankerumformern.

a_1 automatischer Ölschalter, g_1 Transformator, m Luftkompressor und n Luftbehälter für eine Staubsaugevorrichtung zum Reinigen der Maschinen, o Zentrifugalventilator, p 600-KW-Einankerumformer, q 300-KW-Einankerumformer, i_1 Gleichstromschalttafel, l_1 Widerstand eines Magnetreglers, e_1 Hochspannungs-Sammelschienenanlage, r Treppe zum 1. Stockwerke.

300 KW, 60-Perioden-Einankerumformer Platz gefunden. Sie liefern Gleichstrom mit 600 Volt für Bahnbetriebe. Bei jedem Umformer befindet sich ferner der erforderliche Drehstromtransformator (Trockentransformator) und eine Regeldrosselpule mit darüber angeordnetem dreipoligen Hebelschalter. Diese Umformer werden von der Drehstromseite, und zwar durch Spannungserhöhung (Stufen bei $\frac{1}{3}$ und $\frac{2}{3}$ der Betriebsspannung) angelassen.

¹⁾ Siehe E. Eichel: Amerikanische Umformerpraxis, E. K. B. 1909. Heft 11.

In den Fig. 144 und 145 sind schließlich noch die Querschnitte von zwei Umformerwerken der Schenectady¹⁾ Straßenbahn- und Beleuchtungsgesellschaft zur Darstellung gebracht. In dem einen derselben (Fig. 144), das zum Umformen von 10 000 Volt, 40-Perioden-Drehstrom in 600-Volt-Gleichstrom dient, sind insgesamt 13 Einankerumformer mit Leistungen von 240 bis 1000 KW aufgestellt. Die Trans-

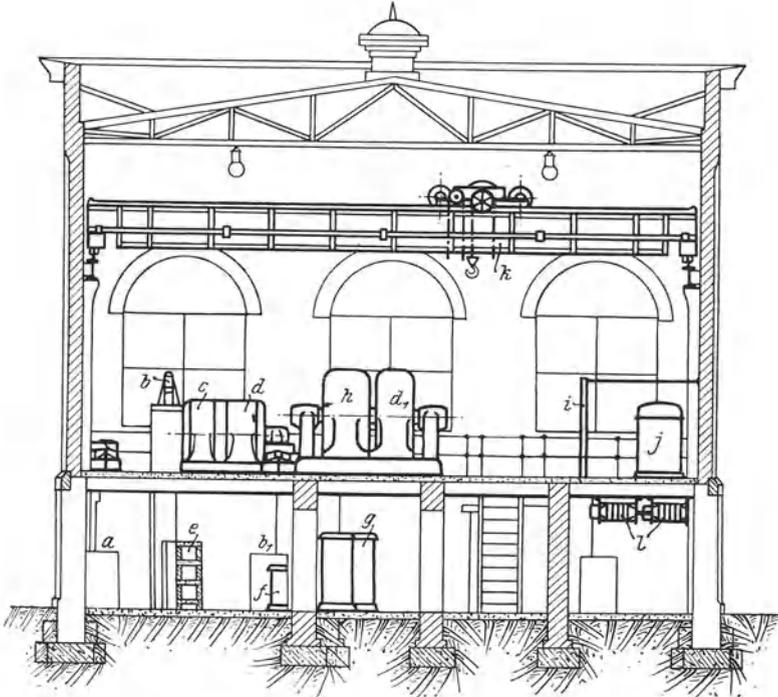


Fig. 145. Licht- und Kraftwerk der Schenectady Straßenbahn- und Beleuchtungsgesellschaft mit Periodenumformern.

h und *d*₁ 500-KW-Periodenumformer, *c* und *d* 275-KW-Periodenumformer, *b* und *b*₁ automatischer Ölschalter, *e* Hochspannungs-Sammelschienenanlage, *j* Kompressor für eine Staubsaugevorrichtung zum Reinigen der Maschinen, *a* Luftbehälter, *l* Widerstände des Magnetreglers, *i* Gleichstromschalttafel, *j* Transformator für die Stationsbeleuchtung, *k* 15-t-Handkran.

formatoren sind als luftgekühlte Trockentransformatoren ausgeführt und erhalten ihre Frischluft durch besondere Zentrifugalventilatoren (siehe III. Abschn., S. 228 und 236). Auch hier ist eine räumliche Trennung von Transformatoren, Hochspannungsschaltern und Umformern nicht durchgeführt; nur die Sammelschienen, deren jede Phase in einem besonderen aus Beton hergestellten Kanale liegt, sind im Untergeschoß des Gebäudes montiert.

¹⁾ Siehe E. Eichel: Amerikanische Umformerpraxis, E. K. B. 1909. Heft 11.

Die Fig. 145 zeigt ein Unterwerk derselben Gesellschaft, das zur Stromlieferung für Licht und Kraftzwecke dient und die Aufgabe hat, den 40-Perioden-Drehstrom von 10000 Volt in solchen mit 60 Perioden und 2300 Volt umzuformen. Hierfür sind als Motor und Generator Synchronmaschinen gewählt worden. Derartige Umformer bezeichnet man als Periodenumformer. Das Anlassen derselben erfolgt wiederum von der Drehstromseite durch Spannungserhöhung nach Seite 128.

Solche Periodenumformer geben zu manchen Betriebsstörungen Veranlassung, und zwar dann, wenn die Felder der beiden gekoppelten Maschinen nicht vollkommen genau übereinstimmen, weil ein Pendeln des Stromes eintritt und die Übernahme der Energielieferung bei Parallelbetrieb mehrerer Umformer Schwierigkeiten macht. Die General Electr. Comp., die Erbauerin dieser Anlagen, hat daher eine besondere Ausführung der Maschinensätze in der Form gewählt, daß sie einen Ständer jedes am Parallelbetriebe beteiligten Umformers drehbar anordnete und dadurch bei der Inbetriebsetzung leicht ein richtiges Einstellen der Felder vornehmen konnte.

An Hand der in der Fig. 145 eingetragenen Buchstabenbezeichnung und der Erklärung derselben wird man den Ausbau der Station leicht verfolgen können, so daß eine besondere Erläuterung unnötig ist. Kurz zu erwähnen ist noch, daß jeder abgehende Konsumenten-Stromkreis einen drehbaren Zusatztransformator erhalten hat, der selbsttätig durch Relais gesteuert wird, die sowohl auf Spannungsänderungen als auch auf Änderungen des Leistungsfaktors ansprechen.

III. Abschnitt.

Die Transformatoren.

G. Die Gleichstromtransformierung.

a) **Motorgenerator.** Soll Gleichstrom einer gegebenen Spannung in Gleichstrom mit anderer Spannung umgewandelt oder, wie man sagt, „transformiert“ werden, so benutzt man hierzu

entweder Akkumulatoren oder Motorgeneratoren. Erstere sind des geringeren Wirkungsgrades, der Bedienung, Beaufsichtigung, Ladung usw. wegen für diese Zwecke weniger zu empfehlen, zumal sie auch noch einen besonderen Raum erfordern, und sie werden daher nicht ständig, sondern nur vorübergehend z. B. für den Nachtbetrieb zur Transformierung verwendet. Kurz sei bemerkt, daß man eine Akkumulatorenbatterie zur Teilung der Spannung in Dreileiteranlagen in dessen häufiger vorfindet.

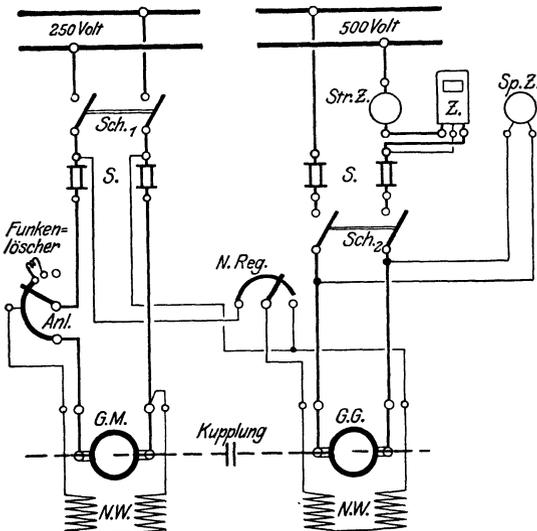


Fig. 146. Schaltungsschema der Gleichstromtransformierung mittels Motorgenerators.

Akkumulatoren an sich wird jedoch erst im II. Bande ausführlicher eingegangen werden. Wirtschaftlicher sind die Motorgeneratoren, wenn es sich um eine dauernde Gleichstromtransformierung handelt, wenn also ein Gleichstromnetz nicht nur zeitweise von einem anderen mit unterschiedlicher Spannung mit Strom versorgt werden soll.

In Fig. 146 ist das Schaltungsschema eines solchen Gleichstrom-Gleichstrom-Motorgenerators mit Fremderregung des Generators ab-

gebildet. Es werden zwei Maschinen miteinander gekuppelt, von denen die eine die verlangte Spannung mit der gewünschten Stromstärke abgibt, also als Stromerzeuger (*G. G.*) arbeitet, während die andere als Motor läuft (*G. M.*) und aus dem vorhandenen Netze gespeist wird. Der Nachteil einer solchen Ausführung liegt darin, daß jede Maschine für die volle Energie, die zu übertragen ist, bemessen sein muß. Ob man dem Generator Fremderregung oder Selbsterregung gibt, hängt von den Betriebsverhältnissen sowohl in dem neuen, als auch in dem vorhandenen Netze ab. Treten stark schwankende Belastungen auf, und ist in dem den Motor speisenden Netze die Spannung konstant, dann empfiehlt sich Fremderregung, um Spannungsänderungen infolge von Drehzahlschwankungen hervorgerufen durch die wechselnde Energieabgabe des Generators zu verhüten. Der Anschluß der Generatorerregung an den Motorstromkreis hat so zu erfolgen, daß nach Öffnen des Hauptschalters *Sch.*₁ auch der Magnetstromkreis des Stromerzeugers unterbrochen wird. Bei normalem Betriebe wählt man indessen häufig und mit gutem Resultate auch die Selbsterregung. Die der Fig. 146 zugrunde gelegten Spannungen erlauben die Benutzung von zweipoligen Momenthebelschaltern *Sch.*₁, *Sch.*₂ und Sicherungen *S.* Außerdem ist im Generatorstromkreise noch ein Spannungszeiger *Sp. Z.*, ein Zähler *Z.* und ein Stromzeiger *Str. Z.* vorgesehen.

b) Teilweise Transformierung. Wesentlich vorteilhafter ist das folgende zuerst von der E. A. G. vorm. Schuckert & Co., Nürnberg, angegebene System der sog. teilweisen Transformierung. Das Schaltungsschema zeigt Fig. 147. Soll z. B. die Spannung von 500 Volt auf 250 Volt transformiert werden, so benutzt man einen Generator für die verlangte Spannung, aber nur für die halbe geforderte Stromstärke, und kuppelt diesen mit einem Motor, der bei der Differenz der zu transformierenden und der vorhandenen Spannung, also $500 - 250 = 250$ Volt, die zum Betriebe des Generators notwendige Drehzahl besitzt und mit einer solchen Stromstärke arbeitet, daß von dem Generator die volle verlangte Leistung abgegeben werden kann. Bei einer Transformierung von z. B. 25 KW von 500 auf 250 Volt ist der

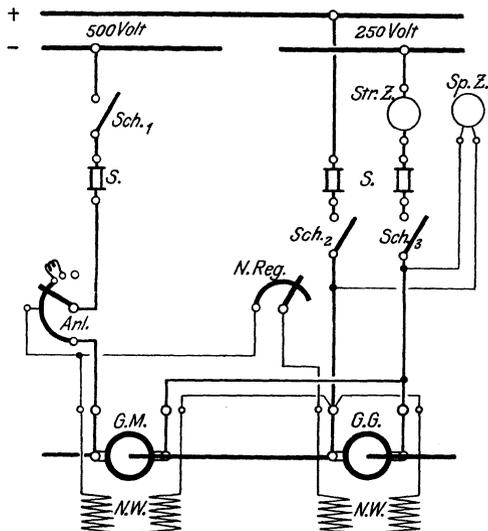


Fig. 147. Schaltungsschema der teilweisen Gleichstromtransformierung.

Generator also nicht für 100 Amp., sondern nur für 50 Amp. und 250 Volt, und der Motor gleichfalls für 50 Amp. zu bemessen. Der sekundäre Strom, der in diesem Falle entsprechend der verlangten Energie von 25 KW 100 Amp. beträgt, setzt sich bei der Schaltung nach Fig. 147 zusammen aus 50 Amp., erzeugt von dem Generator *G.G.*, und 50 Amp., die zum Betriebe des Motors *G.M.* dienen, während von der Spannung von 500 Volt beim Durchgehen durch den Motor 250 Volt verbraucht werden, und sie dadurch auf die verlangte sekundäre Höhe von 250 Volt gebracht wird. Um die Addition der Stromstärken zu erhalten, ist es, wie wohl ohne Schwierigkeit einzusehen, notwendig, einen Pol des vorhandenen Netzes mit dem des Generators zu verbinden, und zwar ist das in Fig. 147 der Pluspol. Aus dieser Strom- und Spannungsverteilung geht hervor, daß bei dem System der teilweisen Transformierung wesentlich kleinere Maschinen benutzt werden können als bei der Verwendung von Motorgeneratoren. So zeigt das Beispiel, daß bei der Transformierung auf die halbe Spannung zwei Maschinen erforderlich sind, die jede nur für die halbe Stromstärke bei der verlangten Spannung zu wählen ist gegenüber dem Motorgenerator mit Maschinen, die in diesem Falle je die doppelte Größe haben müßten.

Die Inbetriebsetzung des Aggregates ist in folgender Weise vorzunehmen: Zuerst ist der Motor bei geöffnetem Schalter *Sch.*₃ durch Schließen von *Sch.*₁ und *Sch.*₂ zu erregen, und dann der Anlasser *Anl.* einzuschalten. Sobald letzterer kurzgeschlossen ist, wird der Generator auf Spannung gebracht und dann *Sch.*₃ geschlossen. Das Stillsetzen erfolgt in umgekehrter Reihenfolge.

Die Spannungsregelung ist mittels des Nebenschlußreglers *N.Reg.* selbständig für den Generator möglich.

Die Vorteile dieses Systems gegenüber dem Motorgenerator sind somit: geringere Anschaffungskosten und kleinerer Raumbedarf; letzterer und auch der Gesamtwirkungsgrad des Maschinensatzes kann natürlich unter Berücksichtigung des über die mechanische Ausführung von Motorgeneratoren im II. Abschnitte Gesagten durch Verringerung der Zahl der Lager noch weiter herabgesetzt bzw. verbessert werden. Der Wirkungsgrad eines Maschinensatzes in dieser Schaltung ist an sich außerdem günstiger als der eines normalen Motorgenerators, weil hier nur mit Maschinen von halber Leistung zu rechnen ist. Das ist darin begründet, daß man zur Umformung von 25 KW durch einen Motorgenerator die Verluste von zwei je 25-KW-Maschinen zu decken hat, die jedenfalls zusammengenommen wesentlich größer sind als bei zwei je 12,5-KW-Maschinen, wenn teilweise Transformierung angewendet wird. So würde der Wirkungsgrad des Maschinensatzes bei dem gewählten Beispiele in normaler Ausführung als Motorgenerator etwa 83% und bei teilweiser Transformierung etwa 90% betragen. Diesen Vorzügen gegenüber besitzt aber das System auch einen Nachteil, der darin liegt, daß beide Netze einen Pol gemeinsam haben. So nimmt bei einem Erdschlusse in dem nicht gemeinsamen Pole auf der Seite der höheren Spannung der gemeinsame Pol des Netzes mit

niedriger Spannung die höhere Spannung gegen Erde an, was unter Umständen recht unerwünscht ist, und eine entsprechende Isolierung der Apparate, Leitungen usw. auf der Sekundärseite notwendig macht.

Die teilweise Transformierung kann mit den gleichen Vorzügen und Nachteilen naturgemäß auch für die umgekehrte Übersetzung der Spannungen verwendet werden.

H. Die Wechselstromtransformierung.

37. Die Arbeitsweise der Transformatoren im allgemeinen.

Soll Wechselstrom einer gegebenen Spannung und Frequenz in solchen einer anderen — höheren oderniedrigeren — Spannung, aber der gleichen Frequenz transformiert werden, so bedient man sich hierfür im Gegensatze zur Gleichstromtransformierung eines ruhenden Apparates, eines sog. Transformators. Erst mit der fortschreitenden Durchbildung dieses Transformators hat die Elektrizität ihre Bedeutung für die Kraftübertragung auch auf die weitesten Entfernungen gewonnen, denn durch ihn können nicht nur Wechselstromkreise der verschiedensten Spannungen mit fast verschwindend kleinen Verlusten und mit verhältnismäßig geringen Beschaffungskosten für die Einrichtungen zum Zusammenarbeiten gebracht werden, was bei Gleichstrom — wenn überhaupt ausführbar — in gleich günstiger Weise unmöglich ist, sondern auch die Höhe der Spannung an sich bietet für die praktische Herstellung der Transformatoren keinerlei Schwierigkeiten mehr. So sind heute schon Anlagen mit 100 000 Volt im Betriebe¹⁾, und für Laboratoriumszwecke sind Transformatoren bis 500 000 Volt²⁾ bereits gebaut worden. Ob man noch wesentlich höher als 100 000 Volt für die Zwecke der Kraftübertragung gehen wird, scheint selbst unter Berücksichtigung größter Leistungen und Entfernungen nicht besonders gerechtfertigt, obgleich die General Electric Co. eine Leitungsanlage mit 200 000 Volt³⁾ bereits in Betrieb gesetzt hat. Erfahrungen über die Benutzung dieser unverhältnismäßig hohen Spannung liegen heute in vollständig ausreichendem Maße indessen wohl kaum vor. Die Nachteile derartig hoher Spannungen bestehen einmal in der Schwierigkeit, die zugehörigen Apparate wie Schalter und Meßtransformatoren betriebssicher und noch für wirtschaftliche Preise bauen zu können. Ferner überschreiten, soweit bisher festgestellt worden ist, die Verluste in der Fernleitung durch Ausstrahlung und Ableitung die noch wirtschaftlich zu nennende

¹⁾ The 100 000 Volt Steel Tower Line of the Grand Rapids-Muskegon Power Comp.: El. World, 2 November 1907, S. 850. — Great Western Power Comp. in Kalifornien: The Electrician, Bd. 60, 1908, S. 885. — Die Hydro-Electric Power Com. of Ontario Canada: E. T. Z. 8. April 1909, S. 328. — Die Kraftübertragung der A. G. Lauchhammer in Deutschland: E. T. Z. 1911 und 1912.

²⁾ E. K. B. 1909, Heft 12, S. 235.

³⁾ E. K. B. 1909, Heft 16, S. 320.

Grenze, wenn der elektrische Strom nicht zu sehr geringen Selbstkosten hergestellt werden kann, z. B. bei Ausnutzung der Gase in großen Grubenkokereien, der Abfallkohlen auf denselben, billiger und leicht zu fassender Wasserkräfte, Rohöllagern usw. Die Herstellung der Leitungsdurchführungen von Gebäuden ins Freie und der Isolatoren der Freileitung — denn solche kann überhaupt nur benutzt werden — sind außerordentlich schwierig, und die Gefahr der Beschädigung

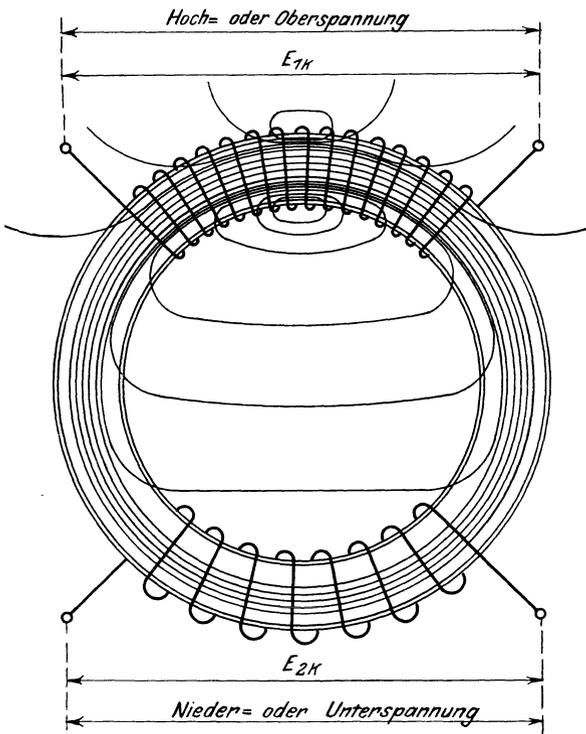


Fig. 148. Schematische Darstellung eines Wechselstromtransformators.

der Apparate und Transformatoren durch Überspannungen hervorgerufen durch atmosphärische oder Betriebsvorgänge ist naturgemäß eine recht beträchtliche. Ob daher die dauernde Betriebssicherheit solcher Anlagen gewährleistet ist, muß erst die Zukunft lehren.

Der Wechselstromtransformator beruht nun auf der Erscheinung, daß in den Windungen einer Drahtspule eine EMK. induziert wird, wenn sich die Anzahl der von den Windungen dieser Spule eingeschlossenen, auf irgendeine Weise erzeugten Kraftlinien ändert. Diese Änderung der Kraftlinien wird dadurch hervorgerufen, daß man die Wicklung

an eine Wechselstromquelle anschließt. Wesentlich verstärkt wird die induzierte EMK., wenn die Spule auf einen Eisenkörper (Fig. 148) aufgebracht, wenn sie also z. B. auf einen aus Eisenblechen hergestellten Ring aufgewickelt wird, weil dann bekanntlich fast der ganze Kraftfluß durch den Eisenkörper hindurchgeht. Allerdings tritt je nach dem konstruktiven Aufbau von Eisen und Wicklung auch ein geringer Teil der Kraftlinien aus dem Eisenkörper aus, der dann für die induzierte EMK. verloren geht. Man nennt dieses Austreten der Kraftlinien die Streuung. Versieht man nun nach Fig. 148 den Eisenring noch mit einer zweiten Wicklung — der sekundären gegenüber der an die Wechselstromquelle angeschlossenen mit primärer Wicklung be-

zeichneten —, so durchsetzt fast der gesamte Kraftfluß auch diese sekundäre Wicklung, induziert in derselben ebenfalls eine EMK., und man kann an den Klemmen dieser zweiten Wicklung den elektrischen Strom mit einer geänderten Spannung entnehmen.

Bezeichnet E_{a_1} die primäre, E_{a_2} die sekundäre EMK. und entsprechend w_1 und w_2 die Windungszahl der Wicklungen, so ist unter der Voraussetzung sinusförmigen Wechselstromes nach dem Faraday - Maxwell'schen Induktionsgesetze:

$$E_{a_1} = 4,44 \cdot c \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt}, \quad (87)$$

$$E_{a_2} = 4,44 \cdot c \cdot w_2 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \quad ,, \quad (88)$$

Die Division dieser beiden Gleichungen ergibt:

$$\frac{E_{a_1}}{E_{a_2}} = \frac{w_1}{w_2} = u, \quad (89)$$

oder in Worten: die von demselben Kraftflusse in den Wicklungen induzierten EMKs. verhalten sich wie die Windungszahlen. Dieses Verhältnis u nennt man das Übersetzungsverhältnis des Transformators. Dasselbe ist infolge des Spannungsabfalles in den Wicklungen desselben bei Vollbelastung ein anderes als bei Leerlauf, und es muß infolgedessen auf diesen Umstand bei der Festsetzung der Spannungen für die sekundär angeschlossenen Apparate bzw. bei der Bestellung eines Transformators ganz besonders Rücksicht genommen werden. In der Regel ist der Transformator so zu wickeln, daß eine verlangte Sekundärspannung von demselben bei Vollbelastung abgegeben wird. Dann ist also die Sekundärspannung bei Leerlauf höher als bei Vollbelastung.

Setzt man mit praktisch hinreichender Genauigkeit die Klemmenspannungen E_{k_1} bzw. E_{k_2} gleich den induzierten EMKs., so ist auch:

$$\frac{E_{k_1}}{E_{k_2}} = \frac{w_1}{w_2} = u, \quad (90)$$

und daraus folgt:

$$E_{k_2} = \frac{w_2}{w_1} \cdot E_{k_1} = \frac{1}{u} \cdot E_{k_1}, \quad (91)$$

bzw. nach dem oben Gesagten bei Leerlauf:

$$E_{k_2}^0 = E_{k_2} + \varepsilon. \quad (92)$$

(ε = Spannungsabfall im Transformator.)

Gl. (91) zeigt, daß also mittels eines solchen Apparates Wechselstrom einer gegebenen Spannung und Frequenz in solchen gleicher Frequenz, aber anderer Spannung transformiert werden kann.

Man bezeichnet die vorhandene Spannung (im Netz, an den Sammelschienen, am Generator usw.) als die Primärspannung, die transformierte Spannung als die Sekundärspannung, oder man spricht auch je nach der Höhe der Spannung von Ober- oder Hoch- und Unter- oder Nieder-

spannung, bzw. wenn z. B. bei einer Überlandzentrale dreifache Transformierung (Fig. 149) stattfindet, von Hoch- (5000/40 000), Mittel- (40 000/10 000) und Niederspannung (10 000/500 bzw. 220 Volt).

Ist der sekundäre Stromkreis offen, so fließt in demselben kein Strom, wohl aber ist ein primärer Strom vorhanden, der so groß ist, daß sein Feld in der Primärwicklung eine der Klemmenspannung entsprechende EMK. induziert. Dieser Strom ist notwendig, um das Eisen zu magnetisieren, bzw. die durch Hysterese und Wirbelströme einerseits und durch Stromwärme im Kupfer andererseits entstehenden Verluste zu decken. Die letzteren sind hierbei vernachlässigbar klein. Man nennt diesen Betriebszustand des Transformators den Leerlauf und den Strom den Leerlauf- oder auch Magnetisierungsstrom J_0 , obgleich sich beide theoretisch nicht decken.

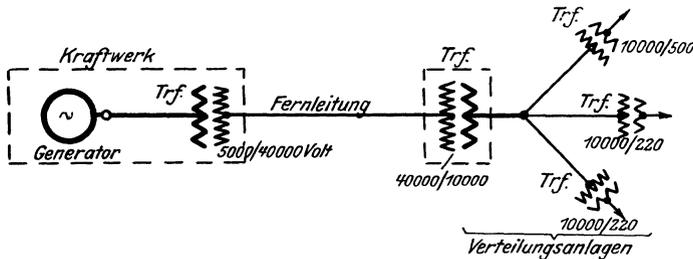


Fig. 149.

Wird der sekundäre Stromkreis durch einen äußeren Widerstand geschlossen, d. h. belastet, dann fließt in ihm ein Strom J_2 entsprechend der Belastung, und zwar ist:

$$E_{k_2} \cdot J_2 = E_{k_1} \cdot J_1,$$

also:

$$J_1 = \frac{E_{k_2}}{E_{k_1}} \cdot J_2 = \frac{1}{u} \cdot J_2, \tag{93}$$

oder entsprechend der Gl. (91):

$$J_2 = u \cdot J_1. \tag{94}$$

Die Leistung des Transformators ist bei Einphasenstrom:

$$\left. \begin{aligned} L_T &= E_{k_1} \cdot J_1 = 4,44 \cdot c \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot J_1 \cdot 10^{-8} \text{ Voltamp.} \\ &= E_{k_2} \cdot J_2 = 4,44 \cdot c \cdot w_2 \cdot \Phi \cdot J_2 \cdot 10^{-8} \text{ „ „} \end{aligned} \right\} \tag{95}$$

und bei Mehrphasenstrom, wenn mit m die Phasenzahl und mit E_p die Spannung zwischen zwei Phasen (Phasenspannung) bezeichnet wird, allgemein:

$$L_T = m \cdot E_p \cdot J = 4,44 \cdot m \cdot c \cdot w \cdot \Phi \cdot J \cdot 10^{-8} \text{ Voltamp.,} \tag{96}$$

oder:

$$= \frac{m \cdot E_p \cdot J}{1000} \text{ Kilovoltampere (KVA).}$$

Die in Voltampere oder Kilovoltampere $\left(\text{KVA.} = \frac{\text{Voltampere}}{1000} \right)$ angegebene Leistung wird die scheinbare genannt, und nur diese muß

für die Größenbestimmung eines Transformators angegeben werden. Die wirkliche Leistung findet man bekanntlich aus der scheinbaren durch Multiplikation mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi$.

Da der Transformator im Leerlauf den Strom J_0 aufnimmt, wird ihm demnach auch in diesem Betriebszustande eine gewisse Energie zugeführt, die Leerlaufenergie:

$$\text{bzw.: } \left. \begin{aligned} L_T^0 &\cong E_{k_1} \cdot J_0 \\ &\cong m \cdot E_p \cdot J_0 . \end{aligned} \right\} \quad (97)$$

Wie die Gl. (95) und (96) zeigen, ist die Leistung einer bestimmten Transformatortype auch abhängig von der Frequenz des zugeführten Stromes. Soll daher ein Netz mit einer anderen als der bisherigen Periodenzahl betrieben werden, so kann man bei kleineren Leistungen im allgemeinen annehmen, daß sich die Leistung der Transformatoren proportional der Frequenz ändert. Für größere Transformatoren trifft das nicht mehr ganz zu. So geben die Siemens-Schuckert-Werke die folgende Tabelle für die prozentuale Leistungsänderung bei einer anderen als der normalen Frequenz = 50:

Tabelle IX.

Abweichende Frequenz	Leistung in % der normalen Leistung bei $c = 50$
60 i. d. Sek.	etwa 110
45 „	„ 95
42 „	„ 90
40 „	„ 85
25 „	„ 55

Die zu wählende Leistung der Transformatoren im Kraftwerke richtet sich nach der Leistung der Generatoren, der Zahl der abgehenden Hauptleitungen, der zu transformierenden Energie usw., und es wird diese Frage daher erst bei der Behandlung der Kraftwerke im II. Bande näher erörtert werden. Die Größe der Transformatoren für die einzelnen Streckenabschnitte der Stromverteilungsanlage, die hier zu besprechen ist, hängt von dem Anschlußwerte in KVA, dem Charakter (Lampen, Motoren), der Arbeitsweise (gleichmäßiger oder starken Schwankungen unterworfenen Betrieb) und der Betriebsdauer (Dauerbetrieb, intermittierender Betrieb) der einzelnen angeschlossenen Stromverbraucher ab. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Transformatoren zur Speisung größerer Netze, aus denen gleichzeitig Strom für Beleuchtung und Kraft abgegeben wird, in der Regel nur während kurzer Zeit innerhalb eines Betriebstages (24 Stunden) vollbelastet arbeiten. Bei entsprechender Kühlung, d. h. bei Abführung der durch die Verluste erzeugten Wärmemengen mit Hilfe besonderer Mittel

(siehe S. 231 u. f.), können nun die Transformatoren in der Regel eine Überlastung von etwa 20 bis 40% während 2 bis 3 Stunden ohne Schaden vertragen, sofern sie mehrere Stunden vor Eintritt der Überlastung nicht vollbelastet gearbeitet haben. Man wählt deshalb, sobald derartige Betriebsverhältnisse vorliegen, die Leistung des Transformators in der Regel zu etwa 70 bis 75% der sich aus dem Anschlußwerte der Stromverbraucher ergebenden Höchstbelastung des Netzes oder des Netzteiles. Selbstverständlich ist bei der Bestellung des Transformators auf die verlangte Überlastbarkeit besonders hinzuweisen. Bei Motoren wird man dagegen die Transformatorleistung fast stets der Vollastleistung derselben anpassen müssen, sofern natürlich der Betrieb nicht intermittierend ist.

Weiter von Bedeutung ist der Spannungsabfall, der im Transformator bis zur Vollbelastung oder auch bei stoßweiser Überlastung auftritt. Dieser darf ein durch die angeschlossenen Stromverbraucher bedingtes Maß nicht überschreiten, damit die Spannung an denselben mit Berücksichtigung des Spannungsverlustes in den Zuleitungen insbesondere bei stoßweise auftretenden Be- und Überlastungen nicht zu stark sinkt, sofern im Kraftwerke nicht entsprechend reguliert wird. Neben unangenehmen Schwankungen des Lichtes in den angeschlossenen Glühlampen, die nebenbei bemerkt auch eine Verkürzung der Lebensdauer der Lampen zur Folge haben, können sich starke Spannungsabfälle auch in reinen Motorstromkreisen dahin ungünstig äußern, daß die Motoren nicht mehr das notwendige Drehmoment zu entwickeln imstande sind, und infolgedessen abfallen. Wie sich die einzelnen Wechselstrommotoren (Ein- und Mehrphasenmotoren) gegen solche Spannungsschwankungen verhalten, ist bereits im I. Abschnitte ausführlich besprochen worden. In welcher Weise eine Regelung der Spannung in Wechselstromnetzen mit Hilfe von Transformatoren erfolgen kann, wird weiter unten besonders erörtert werden.

Der Wirkungsgrad η_T eines Transformators ferner ist in Prozenten ausgedrückt:

$$\left. \begin{aligned} \eta_T \% &= \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}} \cdot 100 \\ &= \frac{E_{k_2} \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2}{E_{k_1} \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1} \cdot 100 ; \end{aligned} \right\} \quad (98)$$

den Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ auf der Primärseite des Transformators kann man mit hinreichender Genauigkeit gleich $\cos \varphi_2$ — dem bekannten Leistungsfaktor auf der Sekundärseite — setzen, denn der induktive Spannungsabfall beträgt nur wenige Prozente, und die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung innerhalb des Transformators kann, zumal $\cos \varphi_2$ an und für sich zumeist nur oberflächlich berechnet und dann etwas nach der ungünstigeren Seite abgerundet wird, praktisch vernachlässigt werden.

Der Wirkungsgrad der heutigen Transformatoren ist ein sehr hoher; er erreicht auch bei kleinen Typen im Mittel Werte von ca. 96 bis 98%

bei induktionsfreier Vollbelastung. Er ist somit besser als derjenige jeder anderen zur Transformierung bzw. Umformung dienenden Maschine. Bei induktiver Belastung sinkt η_T nur um ein Geringes unter den vorgenannten Wert.

Da die Transformatoren in solchen Anlagen, in denen dauernd Strom zur Verfügung stehen muß (Elektrizitätswerke, Überlandzentralen) auch dauernd unter Spannung stehen, also eingeschaltet sein müssen, nehmen sie im unbelasteten Zustande ohne praktischen Nutzen die bereits erwähnte Leerlaufenergie auf. Die jährlichen Ausgaben für die Transformierung werden demnach um die Kosten für den Leerlauf erhöht, und dieser Umstand muß bei Aufstellung einer Wirtschaftlichkeitsberechnung genügend beachtet werden. Man tut das durch Ermittlung des Jahreswirkungsgrades η_j , und zwar ist:

$$\eta_j = \frac{\text{abgegebene Leistung pro Jahr in KW}}{(\text{abgegebene Leistung} + \text{Verluste}) \text{ pro Jahr in KW}} \cdot 100 \quad \left. \vphantom{\eta_j} \right\} \quad (99)$$

$$= \frac{E_{k_2} \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2 \cdot t_B}{E_{k_2} \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2 \cdot t_B + V_K \cdot t_B + V_E \cdot t_j} \cdot 100,$$

worin:

t_B die Benutzungsstunden pro Jahr vollbelastet (bzw. auf Voll-
last umgerechnet),

t_j die gesamte Stundenzahl pro Jahr ($\cong 8750$),

V_K die Kupferverluste in KW,

V_E die Eisenverluste in KW

bezeichnet.

Dieser Jahreswirkungsgrad kann auf die Wirtschaftlichkeit unter Umständen von recht bedeutendem Einflusse sein, wie die nachstehende Rechnung zeigen wird, denn die Zeit bzw. Stundenzahl, die der Transformator voll- oder annähernd vollbelastet im Betriebe ist, ist gegenüber der Jahresstundenzahl bei dauernd eingeschaltetem Transformator oftmals außerordentlich gering. Es können daher verschiedene Transformatoren wohl den gleichen oder annähernd gleichen Wirkungsgrad haben, während die Jahreswirkungsgrade erheblich voneinander abweichen und zwar aus folgendem Grunde:

Die Verluste im Transformator setzen sich zusammen aus den Eisen- und den Kupferverlusten. Die Eisenverluste sind bei jeder Belastung, also sowohl bei Vollbelastung als auch bei Leerlauf, praktisch die gleichen, während sich die Kupferverluste $J^2 \cdot W$ mit dem Quadrate der Stromstärke ändern. Es liegt nun in der Hand des Konstrukteurs, diese beiden Verluste ihrer Größe nach im Transformator durch entsprechende Änderung der Wicklungs- oder Eisenquerschnitte bzw. durch die Form des Zusammenbaues zu verschieben, also die Eisenverluste klein und die Kupferverluste größer zu machen oder umgekehrt. Ist der Transformator für Lichtbetrieb bestimmt, demnach dauernd eingeschaltet, aber nur selten stark oder vollbelastet, so wird man die Kupferverluste, da sie nur während der Zeit der Belastung auftreten,

größer und die Eisenverluste klein nehmen, weil letztere, wie gesagt, dauernd vorhanden sind und die Leerlaufszeit gegenüber der Belastungszeit wesentlich überwiegt. Umgekehrt werden bei Transformatoren für Kraftbetrieb, die nach Stillsetzen der Motoren gleichfalls primär ausgeschaltet werden, die Kupferverluste klein und die Eisenverluste größer zu wählen sein, um billige Transformatoren mit weniger Kupfer zu erhalten und die Gesamtverluste zu verringern. Kleine Eisenverluste erzielt man durch Verwendung besonderer Bleche für den Eisenkörper (legierte Bleche), die allerdings teurer sind als die gewöhnlichen einfachen Eisenbleche. Transformatoren für sehr große Leistungen werden heute fast ausschließlich mit legiertem Blech hergestellt, da diese zumeist in solchen Anlagen zur Aufstellung kommen, die ein dauerndes „unter Spannung stehen“ der Transformatoren fordern.

Das folgende Beispiel soll zeigen, wie der Jahreswirkungsgrad für beide Fälle der Verlustverteilung im Transformator ausfällt.

Beispiel: Es sollen drei Drehstromtransformatoren mit einer Leistung von je 300 KVA dauernd eingeschaltet sein. Die Dauer der Vollbelastung betrage im Jahre $t_B = 400$ Stunden bei einem Leistungsfaktor an den Sekundärklemmen von $\cos \varphi_2 = 1$. Das Übersetzungsverhältnis sei $u = 20\,000/2000$ Volt, die Frequenz = 50.

In der Tabelle X sind die Werte für die Transformatoren selbst und die für die Ermittlung von η_j berechneten zusammengestellt:

Tabelle X.

Bezeichnung	Transformator mit	
	gewöhnlichem Blech	legiertem Blech
$\eta_T = \text{Wirkungsgrad}$ } bei $\frac{1}{1}$ Last }	97,5%	97,85%
$\varepsilon = \text{Spannungsabfall}$ } und $\cos \varphi_2 = 1$ }	1,4%	1,4%
$G_T = \text{Gewicht des Transformators mit Öl ca. kg}$	3700	3500
Preis mit Öl ca. M	5600	6000
$V_K = \text{Kupferverluste}$	1,4%	1,4%
$V_E = \text{Eisenverluste}$	1,1%	0,75%
$t_B = \text{Benutzungsdauer pro Jahr (Vollast) . Std.}$	400	400
$t_j = \text{jährliche Betriebsstunden}$	8750	8750
$V_K \cdot t_B = \text{gesamte Kupferverluste}$ KW/Std.	1680	1680
$V_E \cdot t_j = \text{gesamte Eisenverluste}$ KW/Std.	28 875	19 688
Gesamtverluste KW/Std.	30 555	21 368
$\eta_j = \text{Jahreswirkungsgrad}$ $= \frac{L_2 \cdot t_B}{L_2 \cdot t_B + V_K \cdot t_B + V_E \cdot t_j} \cdot 100 =$	80%	85%

Bei einem Strompreise von M. 0,04 pro KW-Std. (Selbsterzeugungskosten) würden somit die Ausgaben zur Deckung des Verlustes betragen:

$$\begin{aligned}
 3 \cdot 30\,555 \cdot 0,04 &= \text{M. } 3666,60 \\
 3 \cdot 21\,368 \cdot 0,04 &= \text{„ } 2564,16 \\
 \text{somit Ersparnis: } &\underline{\text{M. } 1102,44}
 \end{aligned}$$

Dieser Ersparnis steht gegenüber der höhere Anschaffungspreis mit M. 1200, der demnach schon in einem Betriebsjahre so gut wie ausgeglichen wird. Die Mehrausgaben für Verzinsung und Abschreibung des Anlagekapitals würden bei einer Gesamtquote von 12,5% im Jahre M. 150 ausmachen, so daß immerhin noch eine Ersparnis von M. 950 erzielt werden würde.

Erwägungen in der gleichen Weise sind unter Berücksichtigung der Art der Antriebsmaschinen der Stromerzeuger anzustellen. So wird man bei Dampfmaschinen und teuren Kohlenpreisen vielleicht lieber die Leerlaufverluste (Eisenverluste) der Transformatoren gering wählen, weil die Erzeugungskosten der Energie hoch sind, und die ständig zu deckenden Verluste demnach so weit wie irgend möglich vermindert werden müssen, während bei geringen Selbstkosten der KW-Stunde, z. B. bei Wasserkraftanlagen unter Umständen (d. h. wenn die Wasserbauten nicht kostspielig sind) bzw. allgemein bei billigem Betriebsmaterial (Rohöl, Koksgase, Abfallkohle usw.) das Umgekehrte der Fall sein kann.

Da sich die Verluste in Wärme umsetzen, wird der Wirkungsgrad auch dadurch verbessert werden können, daß man die Wärme genügend beseitigt, den Transformator also in allen seinen Teilen kräftig und wirksam kühlt. Es gibt hierfür eine ganze Reihe von Ausführungsformen, die auf S. 231 und 245 eingehender behandelt werden.

In den Fig. 150 und 151 sind die charakteristischen Kurven für den Wirkungsgrad, die Verluste, die Ströme und den Spannungsabfall der im Beispiele angeführten 300 KVA-Transformatoren dar-

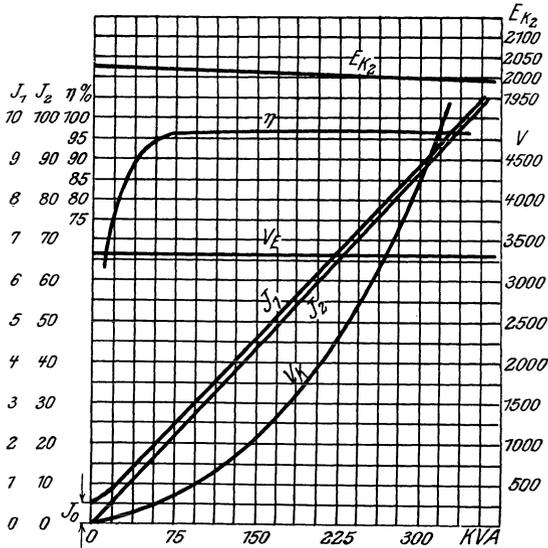


Fig. 150. Charakteristische Kurven eines 300-KVA-Drehstromtransformators mit normalen Eisenverlusten.

gestellt, und zwar einmal für einen solchen mit normalen, das andere Mal für einen solchen mit besonders geringen Eisenverlusten. Die Kurven sind ohne besondere Erklärung verständlich.

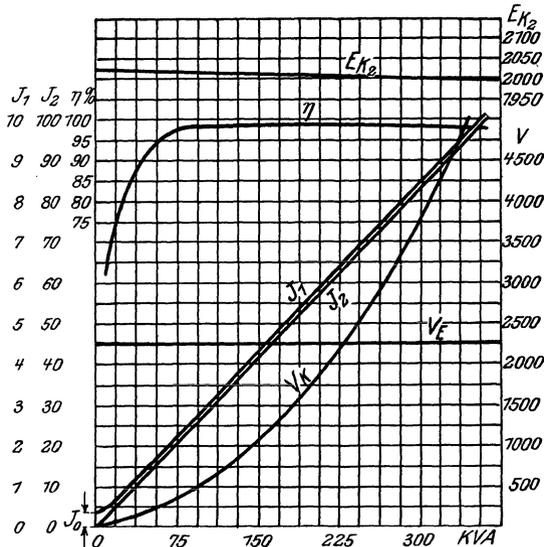


Fig. 151. Charakteristische Kurven eines 300-KVA-Drehstromtransformators mit kleinen Eisenverlusten.

38. Die Schaltung der Transformatorwicklungen im allgemeinen. (Innere Schaltung).

Man unterscheidet auch bei den Transformatoren naturgemäß zwischen solchen für Ein- und solchen für Mehrphasenstrom, und zwar kann man sich letztere als aus den Einphasentransformatoren zusammengesetzt vorstellen.

a) Der Einphasentransformator.

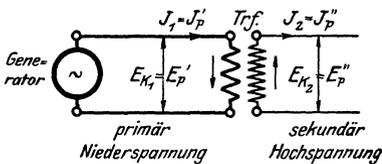


Fig. 152. Innere Schaltung des Einphasentransformators.

Über die allgemeine Schaltung der Wicklung des Einphasentransformators (Fig. 152) ist, soweit es den projektierenden Ingenieur interessiert, nichts Besonderes zu erwähnen. Die Phasenspannung E_p ist gleich der Klemmenspannung E_k , und der die Leitungen durchfließende Strom J unterscheidet sich nicht von dem Phasenstrom J_p ; das gilt natürlich

sowohl für den primären, als auch für den sekundären Teil. Es ist also:

$$J_1 = J'_p \quad \text{bzw.} \quad J_2 = J''_p,$$

$$E_{k_1} = E'_p \quad ,, \quad E_{k_2} = E''_p.$$

Beim Mehrphasentransformator dagegen können, da jede Phase eine besondere primäre und sekundäre Wicklung hat, verschiedene Schaltungen der Wicklungsenden und zwar grundsätzlicher Art vorgenommen werden, bei denen dann insbesondere die Strom- und Spannungsverhältnisse, sowie die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Phasen bei Belastungsunterschieden wissenschaftlich wertvoll sind. Ohne auf besondere theoretische Ableitungen¹⁾ einzugehen, soll das Charakteristikum der einzelnen Schaltungen kurz gekennzeichnet werden.

b) Der Zweiphasentransformator. Beim Zweiphasentransformator, der je vier Wicklungsenden $U_1 U_2 - V_1 V_2$ primär und $u_1 u_2 - v_1 v_2$ sekundär hat, kann das unverkettete und das verkettete System Anwendung finden.

Bei dem unverketteten System (Fig. 153) sind die beiden Phasen vollständig voneinander unabhängig; sie bilden also zwei ganz getrennte Stromkreise. Phasenstrom J_p und Phasenspannung E_p sind gleich dem Leitungsstrome J bzw. der Klemmenspannung E_k , also für jede Phase:

$$J_1 = J'_p \quad \text{bzw.} \quad J_2 = J''_p, \\ E_{k_1} = E'_p \quad ,, \quad E_{k_2} = E''_p.$$

Eine Unterbrechung oder ein Kurzschluß in der einen Phase beeinflusst die zweite Phase nicht, und bei Belastung nur einer Phase tritt ein Spannungsabfall nur in dieser Phase auf, während die Spannung der zweiten Phase unabhängig hiervon ist. Diesen Vorzügen der gegenseitigen Unabhängigkeit stehen die Nachteile gegenüber, daß erstens vier Leitungen notwendig sind, wodurch die Anlagekosten für das Leitungsnetz und die Apparate (Schalter, Sicherungen, Meßinstrumente, Zähler) sehr hoch ausfallen. Werden ferner aus dem Zweiphasensystem zwei selbständige Einphasenanlagen gemacht (je eine Phase z. B. zur Speisung eines Fabrikteiles), so sind, wenn der Strom für motorische Antriebe gebraucht wird, die Kollektormotoren bei verlangten hohen Anzugsmomenten zu verwenden, oder im anderen Falle die umständlicheren asynchronen Induktionsmotoren, die beide bei gleicher Leistung, Drehzahl und Frequenz teurer sind, und ferner einen schlechteren Wirkungsgrad und Leistungsfaktor besitzen als die Drehstrom-Asynchron- bzw. Kollektormotoren. Handelt es sich um reine Lichtanlagen, so werden wohl die Transformatoren an sich billiger, indessen ist das Leitungsnetz bei größerer Ausdehnung teurer, weil die Stromstärken in jedem Netzteile des Zweiphasensystems größer sind als beim Dreiphasensystem. Auf diese Verhältnisse wird im II. Bande bei der Beschreibung der Leitungsanlagen ausführlicher eingegangen werden.

Verkettet man die beiden Stromkreise des Transformators primär und sekundär in der Form, daß man die Wicklungsenden der beiden

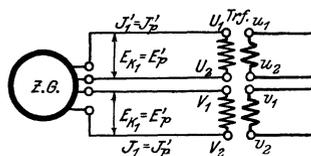


Fig. 153. Innere Schaltung des Zweiphasentransformators (unverkettetes System).

¹⁾ Siehe E. Arnold und J. L. Cour: Die Wechselstromtechnik, Bd. II.

Phasen U_2 und V_1 bzw. u_2 und v_1 (Fig. 154) zusammenschaltet, so gilt trotzdem hinsichtlich der Unabhängigkeit der beiden Phasen voneinander das gleiche wie beim unverketteten System. Diese Schaltung nennt man die offene Dreieck- oder V-Schaltung. Wenn hier auch der Nachteil des vierten Leiters primär und sekundär vermieden ist, so ist die Schaltung dennoch nur bedingt brauchbar und zwar, weil die Spannungen einmal zwischen einem Außenleiter und dem Mittelleiter und das andere Mal zwischen den beiden Außenleitern voneinander abweichen. Es ist infolge der Phasenverkettung nämlich die letztere um den $\sqrt{2}$ -fachen Betrag höher als die erstere. Ferner unterscheiden sich auch die Ströme in den Außenleitern von demjenigen, der im Mittelleiter fließt, und der ebenfalls um den $\sqrt{2}$ -fachen Betrag höher ist als der Strom in einem Außenleiter.

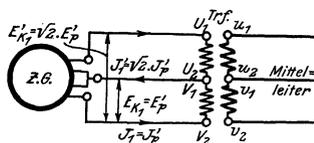


Fig. 154. Innere Schaltung des Zweiphasentransformators (verkettetes System [V-Schaltung]).

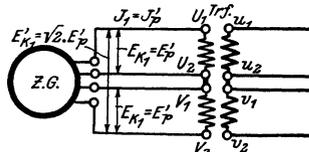


Fig. 155. Innere Schaltung des Zweiphasentransformators (verkettetes System mit 4 Leitungen).

Es ist daher nach Fig. 154:

$$\begin{aligned}
 E_{k_1} &= E'_p & (\text{zwischen } U_1(u_1) \text{ u. } U_2(u_2) \text{ u. } V_1(v_1) \text{ u. } V_2(v_2)) & E_{k_2} = E''_p, \\
 E'_{k_1} &= \sqrt{2} \cdot E'_p & (\text{zwischen } U_1(u_1) \text{ und } V_2(v_2)) & E'_{k_2} = \sqrt{2} \cdot E''_p, \\
 J_1 &= J'_p & \text{in jedem Außenleiter} & J_2 = J''_p, \\
 J'_1 &= \sqrt{2} \cdot J'_p & \text{im Mittelleiter} & J'_2 = \sqrt{2} \cdot J''_p.
 \end{aligned}$$

Wenn man nun auch infolge der höheren Spannung zwischen die Außenleiter z. B. alle Motoren größerer Leistung schalten könnte, weil die Stromstärke um $\sqrt{2}$ kleiner wird, und demzufolge die Leitungen geringeren Querschnitt erhalten würden, so müßte man dann aber Einphasenmotoren benutzen, die in vielen Fällen nicht erwünscht sind. Schließlich hat das System noch die Nachteile, daß infolge der höheren Mittelleiterstromstärke je besondere Apparate für Außenleiter und Mittelleiter notwendig werden, und zwar für verschiedene Stromstärken eingestellte automatische Schalter, verschieden bemessene Sicherungen, Meßtransformatoren usw., und daß auch der Querschnitt für den Mittelleiter stärker ausfällt als für die Außenleiter.

Schließlich kann eine Verkettung der Phasen noch nach Fig. 155 vorgenommen werden, die indessen keine besonderen Vorzüge gegenüber den Schaltungen nach Fig. 153 und 154 aufweist.

Der geschilderten Nachteile wegen und in der Hauptsache aus dem Grunde, weil die Zweiphasenmotoren gegenüber den Drehstrommotoren sowohl im Preise, wie in den Abmessungen und auch in ihrer Arbeits-

weise (dem Anlassen und der Drehzahlregelung) nicht günstiger sind, ist das Zweiphasensystem in der Praxis heute nicht mehr gebräuchlich, und Transformatoren kommen nur noch als Ersatz- oder Nachlieferungen für alte Betriebe zur Ausführung. Neuanlagen werden unter Benutzung von Zweiphasenstrom wohl kaum mehr gebaut, wie überhaupt diese Stromart nur so lange in Gebrauch war, bis der Drehstrom erfunden wurde, der dann das Zweiphasensystem vollständig verdrängt hat.

c) Der Dreiphasen- oder Drehstromtransformator. Die inneren Schaltungen der Primär- und Sekundärwicklung eines Dreiphasentransformators sind schematisch in der Fig. 156, und mit Angabe der Strom- und Spannungsverhältnisse in den Fig. 157 bis 159

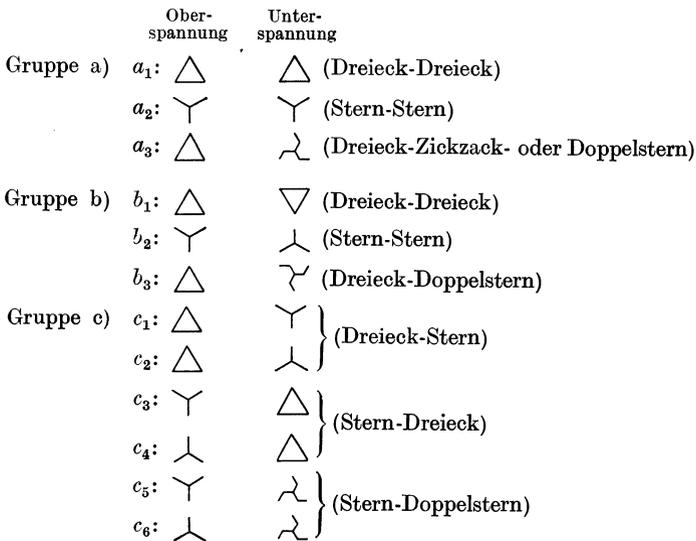


Fig. 156. Schematische Darstellung der verschiedenen inneren Schaltungen bei Drehstromtransformatoren.

dargestellt. Man unterscheidet für die Primär- und Sekundärwicklungen getrennt: die Dreieck-, die Stern- und die Doppelstern- oder Zickzackschaltung. Diese Grundschaltungen werden nun nach

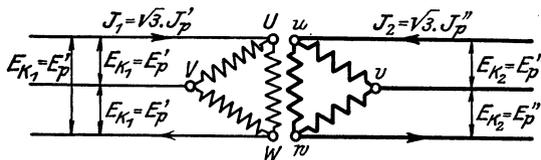


Fig. 157. Innere Schaltung des Drehstromtransformators (Dreieck-Dreieckschaltung).

Fig. 156 den jeweiligen Betriebsverhältnissen entsprechend primär und sekundär benutzt. Bei der Dreieckschaltung sind die Wicklungs-enden so miteinander verbunden, daß die Spannungsvektoren in der,

in der Wechselstromtechnik üblichen diagrammatischen Darstellung gezeichnet, die Form eines gleichseitigen Dreieckes¹⁾ miteinander bilden. Die Stromzuführung bzw. -abnahme erfolgt an den drei Ecken des Dreiecks. Bei der Sternschaltung sind die einen Enden der drei Wicklungen zu einem gemeinsamen Punkte — dem Stern- oder Nullpunkte — zusammengeschlossen, und der Leitungsanschluß erfolgt an den freien zweiten Enden. Die Doppelstern- oder Zickzackschaltung wird in der Regel nur für die sekundäre Seite des

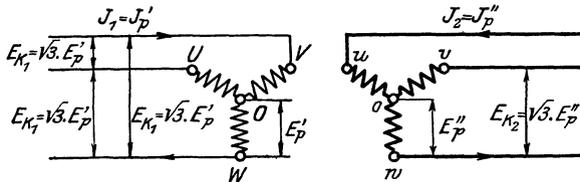


Fig. 158. Innere Schaltung des Drehstromtransformators (Stern-Sternschaltung).

Transformators d. h. nach früherem für den Teil, von dem die transformierte Spannung abgenommen wird, benutzt. Die Wicklungen jeder Phase werden in zwei Hälften unterteilt und die Wicklungsteile verschiedener Transformatorsäulen miteinander in Sternschaltung verbunden, was Fig. 161 erkennen läßt.

Je nachdem nun die Primär- und Sekundärwicklung eines Dreiphasentransformators die gleiche oder eine abweichende innere Schaltung aufweist, bezeichnet man die erstere als eine reine (in Fig. 156 z. B.

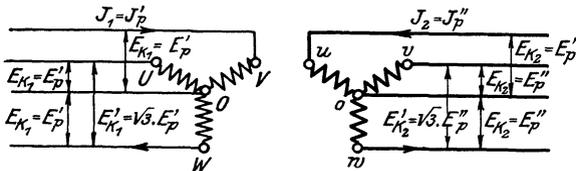


Fig. 159. Innere Schaltung des Drehstromtransformators (Stern-Sternschaltung mit beiderseitigem Nulleiter).

Dreieck-Dreieck oder Stern-Stern), letztere als eine gemischte Schaltung (in Fig. 156 z. B. Dreieck-Stern oder Stern-Doppelstern).

Da in Drehstromnetzen mit vorwiegender Energielieferung für Beleuchtungszwecke zumeist nicht erreicht werden kann, daß die drei Phasen stets vollständig gleichmäßig belastet, sondern in der Regel recht bedeutende Unterschiede in der Phasenbelastung vorhanden sind, so soll zunächst untersucht werden, welche innere

¹⁾ Der bequemeren Vorstellung wegen sind auch die Wicklungen in den Fig. 157 bis 159 entsprechend gezeichnet, während die praktische Anordnung der Eisenkerne im Transformator keineswegs in Form eines Dreieckes oder Sternes erfolgen muß. So zeigt Fig. 186 einen Drehstromtransformator in Stern-Sternschaltung der Wicklungen, bei dem die Eisenkerne nebeneinander stehen. Die Fig. 160 bis 163 bringen dieses letztere ebenfalls zum Ausdruck.

Schaltung des Transformators für diese Fälle die vorteilhafteste ist. Des leichteren Verständnisses wegen wird der Betrachtung die reine Sternschaltung zugrunde gelegt.

Liegt die Belastung nur zwischen den Phasen u und v (Fig. 158), während der Transformator primär an ein Netz mit konstanter Spannung angeschlossen ist, so ist das System sekundär einphasig, und die Spannung E_k , entspricht ungefähr der doppelten Phasenspannung E_p'' , da die Wicklungen uo und ov hintereinander geschaltet sind. Die Wicklungen werden demnach von einem Einphasenwechselstrome durchflossen, der höher ist als der normale, und der einen großen Spannungsabfall in der Wicklung zur Folge hat. Die Energieaufnahme des Transformators primär ist naturgemäß abhängig von den sekundären Verhältnissen, und zwar bedingt durch die Rückwirkung der sekundären Amperwindungen auf den primären Stromkreis. Da nun in der Wicklung ow kein Strom fließt, also von dieser auch keine Amperwindungen erzeugt werden, muß die primäre Wicklung OW ebenfalls stromlos bleiben. Dazu kommt ferner noch, daß bei einer gleichmäßigen Belastung aller drei Phasen die Spannung in uo gegenüber derjenigen in ov und ow um 120° in der Phase versetzt ist. Man sieht also aus diesem allerdings ungünstigsten Falle, daß bei unsymmetrischer Belastung eines mit reiner Sternschaltung versehenen Transformators die Klemmenspannung der belasteten Phase infolge des Spannungsabfalles stark sinkt, während sie in der unbelasteten Phase erhöht wird. Die Klemmenspannungen können somit je nach der Stärke der Unsymmetrie in der Belastung recht bedeutend voneinander abweichen, und das nicht nur sekundär, sondern auch primär.

Da nun in der Mehrzahl der Fälle an die Transformatoren Beleuchtungsstromkreise angeschlossen sein werden, so ist ohne weiteres einzusehen, daß die Stern-Sternschaltung für Betriebe dieser Art nicht geeignet ist, sofern also starke Unsymmetrien in der Phasenbelastung zu befürchten sind, und diese nicht durch Umschaltung einzelner Stromkreise, z. B. der Beleuchtung größerer Transformatorstationen, oder durch andere Einrichtungen im eigenen Betriebe wenigstens zum größten Teile behoben werden können. Es muß natürlich in Beleuchtungsanlagen konstante Spannung bei allen Belastungsverschiedenheiten gewährleistet sein, da anderenfalls neben der Unannehmlichkeit des flackernden Lichtes auch die Lebensdauer der Glühlampen stark beeinflußt wird.

Den Nachteil der Spannungsverschiebung bei unsymmetrischer Phasenbelastung haben auch die anderen inneren Schaltungen nach Fig. 156 mit Ausnahme der Dreieck-Sternschaltung mit sekundärem Nulleiter (Fig. 160) und der Stern-Doppelsternschaltung (Fig. 161).

Wird in Fig. 160 die Phase wo allein belastet, so fließt nur in dieser sekundär ein Strom, während die Phasen vo und uo stromlos bleiben. Der Wicklungsteil $WZwz$ des Transformators arbeitet als Einphasentransformator, weil die Rückwirkung von wo nur auf WZ eintritt

und die anderen Phasen unbeteiligt sind. Diese Schaltung ist in Beleuchtungsanlagen infolgedessen die günstigste, und sie wird deshalb auch am häufigsten angewendet. Außerdem hat sie noch den weiteren Vorteil, daß man auch an den Nullpunkt o der Wicklungen eine Leitung anschließen kann. Es sind dann sekundär zwei Spannungen vorhanden und zwar $E'_{k_2} = E''_p$ zwischen Phase und Nulleiter und $E'_{k_2} = \sqrt{3} \cdot E''_p$ zwischen zwei Phasen (Fig. 159). Erstere wird für die Beleuchtung benutzt, z. B. 210 Volt, und die zweite für den Betrieb von Motoren, z. B. 380 Volt. Um den Querschnitt des Nulleiters gering bemessen zu können, ist auch hier naturgemäß die Belastung möglichst gleich auf alle drei Phasen zu verteilen. Bei der Bestellung eines Drehstromtransformators mit Nullpunktsanschluß muß aber immer die Belastung des Mittelleiters möglichst genau bekannt sein, da sich hiernach die Größe des Transformators richtet.

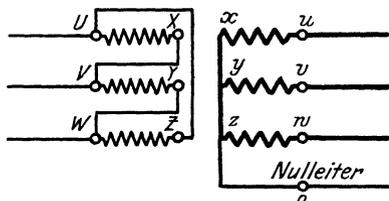


Fig. 160. Drehstromtransformator in Dreieck-Sternschaltung mit Nulleiter.

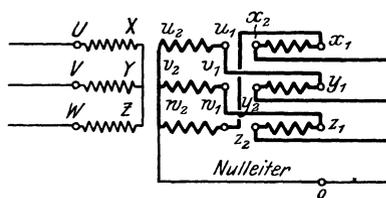


Fig. 161. Drehstromtransformator in Stern-Zickzackschaltung mit Nulleiter.

Bei der Stern-Doppelsternschaltung (Fig. 161) ist die Wicklungshälfte $u_1 u_2$ mit der Wicklungshälfte $y_1 y_2$ hintereinander geschaltet und zwar in einer solchen Weise, daß die resultierende Spannung den Wert $\frac{E}{2} \cdot \sqrt{3}$ hat. Versieht man auch hier den Nullpunkt mit einer besonderen Leitung, und belastet nur die Phase $x_1 x_2 w_1 w_2 o$, so wirken die Amperewindungen der Spulenhälften x und w auf die beiden Hochspannungswicklungen UX und WZ . Infolge dieser Rückwirkung auf zwei Spulen wird der Verkettungspunkt auch der Spannungsnullpunkt des Systems. Es kann infolgedessen trotz unsymmetrischer Belastung keine Spannungsverschiebung eintreten. Auf die Drehstrom-Vierleiteranlagen wird weiter unten nochmals zurückgekommen werden.

Die Sternschaltung auf der Hochspannungsseite des Transformators bietet ferner den Vorteil, daß die Hochspannungsspulen nur für die unverkettete, also die Phasenspannung zu isolieren sind gegenüber der $\sqrt{3}$ fach höheren Spannung bei Dreieckschaltung (siehe auch S. 263).

Die reine Dreieckschaltung besitzt andererseits den Vorteil, daß bei Unterbrechung einer Phase dennoch alle drei Klemmen sekundär unter Spannung stehen, der Betrieb also wenigstens noch kurzzeitig aufrecht erhalten werden kann, bis z. B. die Umschaltung auf einen anderen Transformator (Reserve) oder eine Auswechslung vorgenommen ist. Hierbei arbeitet der Transformator dann als verketteter Zwei-

phasentransformator in V-Schaltung. Ein solcher Betrieb ist bei reiner Sternschaltung natürlich nicht möglich, weil bei der Verletzung einer Phase diese stromlos wird.

Zur Speisung von Drehstromnetzen mit sekundärem Nullleiter (Vierleiternetzen), die heute immer mehr ausgeführt werden, sind neben der Zickzackschaltung noch andere innere Schaltungen der Transformatorwicklungen mit Vorteil zu verwenden, und es sollen daher die einzelnen Möglichkeiten zusammengefaßt behandelt werden.

Zur Verwendung kommen:

1. primär Dreieck-, sekundär Sternschaltung,
2. „ Dreieck-, „ Zickzackschaltung,
3. „ Stern-, „ Zickzackschaltung,
4. „ Stern-, „ Sternschaltung.

Wie bereits oben erwähnt, ist die Dreieck-Sternschaltung mit Rücksicht auf die Spannungsverschiebungen bei unsymmetrischer Belastung günstig. Sie hat aber den Nachteil, daß der Transformator größer und teurer wird, weil die primäre Windungszahl um das $\sqrt{3}$ fache größer sein muß als diejenige des sekundären Teiles. Der Transformator kann demnach nicht so vollständig elektrisch ausgenutzt werden, als das seinem Materialaufwande entspricht. Benutzt man an Stelle der Sternschaltung sekundär die Doppelstern- oder Zickzack-schaltung, so kommt noch der weitere Nachteil hinzu, daß dann sekundär auch mehr Kupfer aufgewendet werden muß, oder eine Leistungsherabsetzung des Transformatormodells notwendig ist und zwar aus dem Grunde, weil die Spannungen, die bei gleicher Windungszahl bei einfacher Sternschaltung E_s und bei Doppelsternschaltung E_z seien, sich verhalten wie:

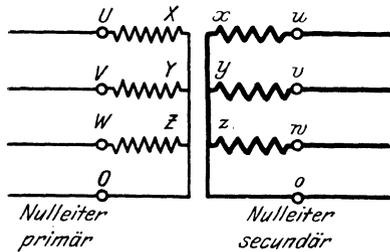


Fig. 162. Drehstromtransformator für Vierleiternetze in Stern-Sternschaltung mit beiderseitigem Nulleiter.

$$\frac{E_s}{E_z} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155.$$

Es ist also bei Zickzackschaltung die Windungszahl für die 1,155fache Spannung bei vollem Strome zu bemessen.

Die reine Sternschaltung ist nur dann für Vierleiternetze zulässig, wenn entweder auch primär der Nullpunkt mit der Maschine durch eine besondere Leitung verbunden ist (Fig. 162), oder besondere sog. Ausgleichstransformatoren verwendet werden (Fig. 163). Wird in Fig. 162 der primäre Nulleiter nicht gezogen, dann treten schon bei geringen Ungleichheiten in der Belastung der einzelnen Phasen, z. B. hervorgerufen durch ungleiche Zahl der eingeschalteten Lampen, so starke Spannungsverschiebungen auf, daß ein befriedigender

Betrieb nicht mehr durchführbar ist. Infolge der hohen Anlagekosten für die Leitungen ist diese Form daher nicht anzutreffen.

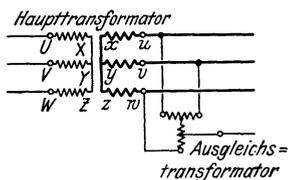


Fig. 163. Drehstromtransformator für Vierleiternetze mit Ausgleichstransformator.

Die Ausgleichstransformatoren (Fig. 163) dagegen ermöglichen auch bei ungleichmäßiger Verteilung der Belastung auf die drei Phasen Spannungsgleichheit in den Hauptleitungen gegen den Nulleiter, und gestatten weiter, die reine Sternschaltung ohne primären Nulleiter, also die Transformatoren in normaler Ausführung zu verwenden. Man kann solche Ausgleichstransformatoren auch unmittelbar dort einbauen, wo in einem Teile

der Anlage das Vierleitersystem notwendig oder gewünscht wird, während die übrigen Teile der Anlage nur Drehstrom ohne Nulleiter brauchen, und erspart dann die Kosten für den vierten Leiter bis zum Transformatorneuhause.

d) Das Parallelarbeiten. Besonderer Erwähnung bedarf noch das Parallelarbeiten der Transformatoren. Dabei ist zunächst der Unterschied zu machen erstens, ob mehrere Transformatoren aus einem gemeinsamen Primärnetze gespeist werden, ohne daß sie auch sekundär miteinander in Verbindung stehen, und zweitens, ob die Transformatoren ober- und unterspannungsseitig parallel geschaltet sind. Im ersteren Falle sind keine besonderen Bedingungen vorhanden, weil Schwierigkeiten nicht auftreten können. Bei der zweiten Schaltung dagegen müssen für alle parallelarbeitenden Transformatoren bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein, da sonst ein einwandfreier Betrieb nicht erreicht werden kann. Diese erstrecken sich sowohl auf die elektrischen Verhältnisse, als auch bei Mehrphasentransformatoren auf die innere Schaltung der Wicklungen. Ferner ist die örtliche Lage der einzelnen Transformatoren im Netz zu berücksichtigen und zwar insofern, als diejenigen, die innerhalb einer Station primär und sekundär auf gemeinsame Sammelschienen arbeiten, anders zu beurteilen sind wie diejenigen, zwischen denen eine mehr oder weniger große Leitungsstrecke liegt.

Zunächst müssen die Spannungen nach Höhe und Phase übereinstimmen (gleiches Übersetzungsverhältnis bei Leerlauf und richtiger Stromlauf in den Wicklungen). Sind Spannungsunterschiede zwischen zwei Transformatoren vorhanden, so fließen Ausgleichsströme, die je nach den Umständen einen der beiden Transformatoren mehr belasten, und die ihrer Größe nach abhängig sind von der Höhe des Spannungsunterschiedes, der Größe der Kurzschlußspannungen, sowie dem Ohmschen und induktiven Widerstande der zwischenliegenden Leitungen. Unter Kurzschlußspannung versteht man diejenige Spannung, die primär notwendig ist, um bei kurzgeschlossenener Sekundärwicklung eine bestimmte Stromstärke zu erzeugen. Häufig drückt man die Kurzschlußspannung in Prozenten der Betriebsspannung aus, wenn sekundär bei Kurzschluß die normale Vollaststromstärke vorhanden ist.

Stimmen die Phasen nicht überein, d. h. hier ist der Stromlauf in den Wicklungen der parallelgeschalteten Transformatoren falsch, so entspricht das natürlich einem unmittelbaren Kurzschlusse der betreffenden Transformatoren, der unter Umständen zur vollständigen Zerstörung derselben führen kann.

Ein guter Parallelbetrieb mehrerer Transformatoren innerhalb einer Station auf gemeinsame Sammelschienen ist ferner nur dann gewährleistet, wenn bei verschiedenen Leistungen L_{T_I} , $L_{T_{II}}$, $L_{T_{III}}$. . . derselben die Belastung sich jeweils so verteilt, daß das Verhältnis der Ströme zu den Leistungen für alle Transformatoren gleich ist, also wenn:

$$\frac{J_I}{L_{T_I}} = \frac{J_{II}}{L_{T_{II}}} = \frac{J_{III}}{L_{T_{III}}} \text{ usw.} \quad (100)$$

Das ist aber nur dann zu erreichen, wenn die Übersetzungsverhältnisse bei Leerlauf und die Kurzschlußspannungen gleich sind. Weichen die ersteren voneinander ab, so muß entweder eine Änderung der Wicklungen z. B. bei vorhandenen alten Transformatoren vorgenommen, oder es müssen Zusatztransformatoren zur Herstellung des richtigen Übersetzungsverhältnisses benutzt werden. Diese Zusatztransformatoren werden dann im allgemeinen in Sparschaltung gewickelt (S. 259), weil die Primär- und Sekundärspannung nur wenig voneinander verschieden ist. Stimmen die Kurzschlußspannungen nicht überein — Abweichungen von 10 bis 15% sind in der Regel noch zulässig —, so verteilt sich die Last auf die einzelnen Transformatoren im Verhältnisse der Kurzschlußspannungen. Um Überlastungen eines Transformators zu verhüten, ist in solchen Fällen stets vorher zu untersuchen, wie die Belastungsverhältnisse sein werden.

Sind z. B. zwei Transformatoren von 50 und 100 KVA. mit den Kurzschlußspannungen ($E_{T.K}$) von 3 und 2,5% bei Vollbelastung, also normalem Strome, zu einem vorhandenen zu installieren, der ebenfalls 100 KVA.-Leistung, aber nur 2% Kurzschlußspannung bei Vollbelastung besitzt, so darf $E_{T.K}$ für die neuen Transformatoren nicht größer sein als 2%, da sich die Belastungen der parallelgeschalteten Transformatoren auf gleiches $E_{T.K}$ einstellen, und sonst einer der Transformatoren überlastet werden würde. Werden 2,5% zugrunde gelegt, so würde der neue 100 KVA.-Transformator vollbelastet werden können, während der vorhandene im Verhältnis 2,5 : 2, also um 25% überanstrengt werden würde.

Es ergibt sich demnach die folgende Belastungstabelle:

100 KVA vorhand. Transf. bei 2% $E_{T.K}$; Leistung	100 KVA
100 KVA neuer Transf. bei 2% $E_{T.K}$; Leistung $\frac{2}{2,5} \cdot 100 =$	80 KVA
50 KVA neuer Transf. bei 2% $E_{T.K}$; Leistung $\frac{2}{3} \cdot 50 =$	<u>33,3 KVA</u>

also zulässige Gesamtbelastung der Station 213,3 KVA gegenüber der eigentlich verlangten von 250 KVA.

Um nun die letztere doch und ohne weitere Transformatoren gewinnen zu können, müßte der vorhandene Transformator um 12% überlastet werden. Dann ergibt sich:

$$100 \text{ KVA vorhand. Transf.}; \text{ neue Leistung } 100 \cdot \frac{250}{213,3} = 117 \text{ KVA}$$

$$100 \text{ KVA neuer Transf.}; \text{ neue Leistung } 80 \cdot \frac{250}{213,3} = 94 \text{ KVA}$$

$$50 \text{ KVA neuer Transf.}; \text{ neue Leistung } 33,3 \cdot \frac{250}{213,3} = 39 \text{ KVA}$$

abzugebende Gesamtenergie 250 KVA.

Weichen die Kurzschlußspannungen stark voneinander ab, so kann ein guter Parallelbetrieb bzw. eine richtige Lastverteilung durch das Einschalten von Drosselspulen in die Leitungen, die zu den Transformatoren mit geringerer Kurzschlußspannung gehören, dennoch erreicht werden. Bei Einphasenstrom ist nur in einer Leitung, bei Drehstrom dagegen in allen drei Leitungen eine Drosselspule erforderlich.

Arbeiten die Transformatoren auf gemeinschaftliche Netze parallel, sind sie aber durch längere Leitungsstrecken voneinander getrennt, so sind im allgemeinen die gleichen Bedingungen zutreffend wie vorher; der Betrieb gestaltet sich indessen insofern günstiger, als durch die Impedanz der eingeschalteten Leitungen (Ohmscher und induktiver Widerstand) der Einfluß der Verschiedenheiten im Übersetzungsverhältnisse und der Kurzschlußspannungen auf die Lastverteilung mit zunehmender Länge der Leitungsstrecke verringert wird. Im allgemeinen ist die Impedanz der letzteren so groß, daß auch noch erhebliche Abweichungen im Übersetzungsverhältnisse und in der Kurzschlußspannung statthaft sind, ohne Störungen befürchten zu müssen. Hier ist wenigstens eine annähernde Berechnung der Leitungsimpedanz erforderlich, um bei der Inbetriebsetzung nicht unangenehmen Überraschungen ausgesetzt zu sein.

Schließlich ist auf die innere Schaltung der Wicklungen bei Mehrphasenstrom besonders zu achten.

Transformatoren mit reiner Schaltung, also solche, die der gleichen Gruppe in Fig. 156 angehören, können einwandfrei parallel arbeiten; solche mit gemischter mit solchen reiner Schaltung aber nicht, weil die Klemmenspannungen der verschiedenen gewickelten Transformatoren nicht in Phase gebracht werden können. Der Parallelbetrieb zwischen \triangle/\wedge und $\wedge/\wedge/\wedge$ geschalteten Transformatoren ist hingegen möglich, da bei beiden die Phase der Sekundärspannung um $180 \mp 30^\circ$ gegen die primäre verschoben ist. Es ist also bei der Projektierung von Erweiterungen bestehender Transformatorenanlagen auf diese Verhältnisse genauestens zu achten, um Betriebsstörungen zu vermeiden.

39. Die Bauart der Transformatoren im allgemeinen.

a) **Kern- und Manteltransformatoren.** Wie aus Fig. 148 und dem bisher Gesagten hervorgeht, besteht ein Transformator in der Hauptsache aus zwei getrennten Wicklungen und einem geschlossenen, gemeinsamen Eisenkörper. Man unterscheidet hinsichtlich des konstruktiven Zusammenbaues von Wicklungen und Eisenkörper zwei besondere Formen:

den Kerntransformator
und den Manteltransformator.

Beim Kerntransformator (Fig. 164) ist der Eisenkern von den Wicklungen umgeben, bildet also einen richtigen Kern, während beim

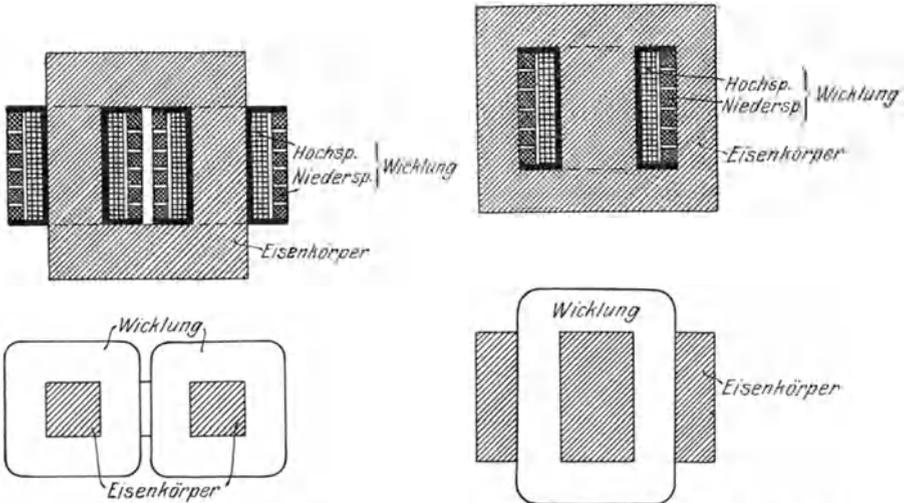


Fig. 164. Kerntransformator.

Fig. 165. Manteltransformator.

Manteltransformator die Wicklungen vom Eisenkörper umschlossen werden (Fig. 165).

Der letztere besitzt gegenüber dem Kerntransformator bei einer gegebenen Leistung mehr Eisen und weniger Kupfer und fällt infolgedessen im Preise zumeist etwas billiger aus als der Kerntransformator. Ferner kann die Befestigung der Spulen gegen Lagenveränderung durch die bei Kurzschlüssen auftretenden magnetischen Kräfte beim Manteltransformator wesentlich sicherer ausgeführt werden als beim Kerntransformator, und daher eignet sich ersterer vorteilhafter in solchen Kraftbetrieben, bei denen mit großen Transformatorleistungen, starken Überlastungen und häufigeren Kurzschlüssen (durch falsches Parallelschalten von Synchronmotoren u. dgl.) zu rechnen ist, also z. B. bei großen Motoranlagen und in ausgedehnten Kraftübertragungsanlagen.

Den genannten Vorzügen steht indessen der Nachteil gegenüber, daß die wirksame Abkühlungsfläche des Kupfers beim Mantel-

transformator naturgemäß geringer als beim Kerntransformator ist, und infolgedessen frühzeitiger als bei letzterem besondere Kühlvorrichtungen zur Anwendung kommen müssen. Auf einen weiteren Vorteil des Manteltransformators wird später noch hingewiesen werden.

Unter Berücksichtigung des auf S. 199 über die Leerlaufverluste Gesagten ergibt sich demnach, daß in Betrieben mit stark veränderlicher Belastungszeit, also z. B. in solchen mit reiner oder vorwiegender Lichtbelastung (Überlandzentralen, städtische Elektrizitätswerke), die Kerntransformatoren in der Regel günstiger sind, weil die Leerlaufenergie, also die Eisenverluste, leichter herabgedrückt werden können, als das beim Manteltransformator der Fall ist. Handelt es sich dagegen um vorwiegende Kraftanschlüsse, bei denen der Transformator während der Nachtzeit auch primär abgeschaltet wird, dann ist der Manteltransformator mehr am Platze.

Die Kerntype hat noch den Vorteil einfacherer Fabrikation und Werkstattmontage; ferner können die einzelnen Spulen der Wicklungen am Orte der Aufstellung des Transformators leichter ausgewechselt werden als beim Manteltransformator. Die Kerne werden in der Mehrzahl der Fälle vertikal angeordnet, wodurch die Grundfläche des Transformators die kleinste wird, und z. B. die Luftkühlung bei Trockentransformatoren (S. 231 Fig. 178) am intensivsten zur Wirkung kommt. Nur in besonderen Fällen findet man die horizontale Lage der Kerne.

Aus all dem geht hervor, daß nicht ohne weiteres vom projektierenden Ingenieur die Ausführung der Transformatoren bestimmt werden kann, sondern daß dieses Sache des Konstrukteurs ist, und von Fall zu Fall entschieden werden muß. Ein Hinweis auf den Charakter der Anlage, für die der Transformator Verwendung finden soll, ist indessen für den Konstrukteur stets vorteilhaft.

Auch einige besondere Gesichtspunkte für den konstruktiven Aufbau eines Transformators sollen hier der Vollständigkeit wegen schließlich noch angeführt werden:

b) Der konstruktive Aufbau. Zunächst ist es selbstverständlich, daß der Eisenkörper lamelliert, also aus einzelnen Blechen zusammengesetzt sein muß, um die Verluste durch Wirbelströme herabzudrücken. Ferner muß das Blech einer besonderen Fabrikationsmethode entstammen (Transformatorblech), denn es hängen von der Beschaffenheit desselben nicht nur die Eisenverluste (Hysterese) und demnach der Wirkungsgrad, sondern auch die Lebensdauer des Transformators selbst ab. Das Blech darf ferner seine besonderen guten Eigenschaften nicht mit der Zeit verlieren bzw. ändern, oder wie man sagt, es darf nicht altern.

Die Primär- und Sekundärwicklung soll aus einzelnen abwechselnd über- oder nebeneinander liegenden Spulen bestehen (Fig. 186), um bei Durchschlägen usw. Auswechslungen der Spulen bequemer vornehmen zu können, wodurch dann vermieden wird, den Transformator bei Reparaturen jedesmal an das Werk einzusenden. Spulenauswechslungen können durch tüchtige Monteure an Ort und Stelle ohne Schwierig-

keit ausgeführt werden, und dadurch werden Kosten und Zeit erspart, und die Lagerhaltung wird einfacher und billiger, weil bei einer Anzahl gleicher Transformortypen nur z. B. ein bis zwei Transformatoren und außerdem einige Primär- und Sekundärspulen zur Reserve zu beschaffen sind. Ferner werden durch die Unterteilung der Wicklungen auf mehrere Spulen hohe Lagenspannungen vermieden, die bei Hochspannung leicht zu Überschlägen zwischen Hoch- und Niederspannungswicklung führen können und dann das Niederspannungsnetz gefährden. Um einen Übertritt von Hochspannung nach dem Niederspannungsstromkreise für letzteren gefahrlos zu machen, wird bei Einphasentransformatoren ein Pol der Niederspannungswicklung unmittelbar oder über eine Funkenstrecke, und bei Mehrphasentransformatoren der Nullpunkt über eine Spannungssicherung oder ebenfalls über eine Funkenstrecke mit Erde verbunden. Die Funkenstrecke bzw. die Sicherung wird beim Übertritt von Hochspannung durchschlagen und dadurch sofort die Niederspannungswicklung geredet. Die Unterteilung der Wicklungen hat weiter den Vorteil, daß der Spannungsabfall durch Streuung in niedrigeren Grenzen gehalten werden kann, eine Spannungsänderung durch Hintereinander- bzw. Parallelschalten einzelner Spulen leichter durchführbar ist, und eine größere Anzahl von Kanälen zwischen den einzelnen Spulen hergestellt werden kann, wodurch die Wärmeabführung bzw. die Kühlung der Wicklungen und des Eisens günstiger wird. Bei konzentrischer Anordnung der Spulen soll die Niederspannungswicklung dem Eisenkerne zunächst liegen.

Ganz besonderer Wert muß ferner, wie bereits vorher kurz erwähnt, namentlich bei großen Transformatoren, die in ausgedehnten Netzen arbeiten, auf eine gute gegenseitige Spulenversteifung gelegt werden. In solchen Anlagen treten erfahrungsgemäß durch falsches Parallelschalten von Generatoren, Synchronmotoren u. dgl. oder sonstige Betriebsvorkommnisse, wie Leitungs- und Mastbrüche, Durchfliegen der Freileitungen von Vögeln mit großer Flügelspannweite usw., des öfteren Kurzschlüsse auf, die bei größeren Leistungen unter Umständen ganz gewaltige Verschiebungskräfte magnetischer Natur durch gegenseitiges Anziehen oder Abstoßen auf die Spulen ausüben und eine dauernde Lagenveränderung der einzelnen Spulen zueinander, der Verbindungsstücke u. dgl. verursachen können. Mechanische Beschädigungen oder Zerstörungen der Spulen, Kurzschlüsse innerhalb des Transformators und damit Betriebsstörungen können daraus die Folge sein.

c) Die Isolation des Transformators und die Kühlung im allgemeinen. Wie ferner auf S. 203 angedeutet, ist man in der Lage, den Wirkungsgrad eines Transformators durch eine besondere Abführung der erzeugten Wärme, also durch eine besondere Kühlung der Wicklungen und des aktiven Eisens, günstiger zu gestalten. Diese Kühlung spielt in erster Linie bei größeren Leistungen und höheren Spannungen, aber noch weiter insofern eine hervorragende betriebstechnische Rolle, weil durch dieselbe neben der Wirkungsgradverbesserung aus leicht erklär-

lichen Gründen auch eine Verkleinerung der Abmessungen und geringeres Gewicht des Transformators bezogen auf die Leistung und Spannung erreichbar sind und dieses dadurch, daß die magnetische bzw. elektrische Beanspruchung des Eisens und der Wicklungen höher bemessen werden kann. Ferner hängt von der geregelten Abführung der Eisen- und Kupferwärme die Sicherheit des dauernd guten Arbeitens des Transformators ab. Zusammen mit der nun folgenden Besprechung der einzelnen Kühlmethoden für die Transformatoren und deren Umgebung soll auch die Isolation der Wicklungen behandelt werden, die bei hohen Spannungen ebenfalls besonderer Beachtung bedarf.

Man unterscheidet nun sowohl hinsichtlich der Bauart als auch der Kühlung zwischen:

- a) Trockentransformatoren:
 1. ohne besondere Kühlung,
 2. mit künstlicher Kühlung;
- b) Öltransformatoren:
 1. ohne besondere Kühlung,
 2. mit künstlicher Kühlung,

und zwar richtet sich die Form des Transformators und die Art der Kühlung nach der Einzelleistung, der Höhe der Spannung, dem Aufstellungsorte und den Betriebsverhältnissen.

40. Die Trockentransformatoren.

Unter einem Trockentransformator ist ein solcher zu verstehen, bei welchem die Wicklungen frei zur Umgebung liegen. Diese einfache Ausführung im Vergleich zu derjenigen, bei welcher eine besondere Kühlung durch Ventilatorbelüftung benutzt (Fig. 177 bis 179) und der eigentliche Transformator durch ein Blechgehäuse geschützt wird, kommt nur für geringe Leistungen bis etwa 300 KVA. und verhältnismäßig niedrige Spannungen bis etwa 10 000 Volt zur Anwendung. Die für eine rasche Wärmeausstrahlung vorhandene Abkühlungsfläche ist im Verhältnis zur Leistung groß. Diese Form hat die Vorzüge, daß man den Transformator in seinem ganzen Aufbau jederzeit besichtigen, und z. B. die Auswechslung von Spulen bequem und schnell vornehmen kann. Auch dann, wenn es sich darum handelt, Transformatoren öfters auszuwechseln oder an verschiedenen Stellen zu benutzen, also sie öfters zu transportieren, wie das bei ausgedehnteren Überlandzentralen häufiger der Fall ist, z. B. bei den Transformatorenanlagen, die zur Speisung von Gemeinde-Niederspannungsnetzen, Gutsbezirken usw. dienen, ist die Verwendung von Trockentransformatoren unter bestimmten Voraussetzungen am Platze. Besondere Grenzen hierfür anzugeben, ist indessen nicht möglich; es muß vielmehr der projektierende Ingenieur von Fall zu Fall kalkulieren und unter Berücksichtigung der Preise, Gewichte und Betriebsverhältnisse seine Entscheidung treffen. Es sei hierbei auch auf das nachfolgend über Öltransformatoren Gesagte hingewiesen, das die Vorzüge des Trocken-

transformators noch weiter erkennen läßt. Der Feuchtigkeit darf ein solcher Transformator natürlich nicht ausgesetzt sein, weil unter derselben die Wicklungsisolation leidet; das gleiche gilt für unreine Luft, weil dieselbe ungehinderten Zutritt zu den Wicklungen hat. Die Aufstellung von Trockentransformatoren kann daher nur in geschlossenen Räumen, nicht aber im Freien stattfinden. Auch z. B. für die Unterbringung in Wagen (fahrbare Transformatoren S. 354) sind sie nicht geeignet, weil das Wageninnere nicht so abgeschlossen werden kann, daß die Feuchtigkeit der Luft keinen Zutritt hat. Bei häufigerem Ausschalten kann sich namentlich in kälterer Jahreszeit oder bei Nebel Kondenswasser auf den warmen Wicklungen bilden und dieses die Wicklungsisolation mit der Zeit zerstören. Auch Imprägnierungen helfen hier nur wenig.

Die Abführung der Wärme aus Wicklungen und Eisen erfolgt bei diesem Aufbau des Transformators zunächst auf natürliche Weise durch Ausstrahlung, aber nur dann, wenn genügende Luftbewegung im Aufstellungsraume vorhanden ist. Ist letzteres in ungünstig gelegenen Räumen mit beschränkten Abmessungen nicht dauernd und zuverlässig gewährleistet, z. B. bei Transformatorenhäusern und -säulen, unter Tage, in Kellern, oder wenn die Transformatoren unter dem Straßentpflaster aufgestellt werden müssen usw., dann muß die Luftbewegung künstlich erzwungen werden entweder durch besondere Belüftungsöffnungen in den Wänden des Transformatorenraumes oder durch Ventilatoren. Letztere können entweder den Transformatorenraum an sich belüften oder den Transformatoren unmittelbar die Frischluft zuführen, wobei im zweiten Falle aber dafür Sorge zu tragen ist, daß die erwärmte Luft auch aus dem Raume abziehen kann. Im Anschluß hieran soll nun, bevor zur Besprechung der Öltransformatoren übergegangen wird, zunächst die ganze Belüftungsfrage¹⁾ behandelt werden, die auch für vollständige Transformatorenanlagen von besonderer Bedeutung ist.

41. Die Wärmeentwicklung und Wärmebeseitigung in Transformatorenanlagen.

a) Die Wärmeentwicklung. Bezeichnet L_T die Leistung eines Transformators in KW und η_T den Wirkungsgrad bei Vollast in Prozenten der Gesamtleistung, so ist die abgegebene Wärmemenge eines Transformators:

$$\begin{aligned} \mathfrak{W}_1 &= 0,860 \cdot 1000 \cdot L_{T_1} \cdot \left(\frac{100 - \eta_{T_1}}{100} \right) \\ &= 860 \cdot L_{T_1} \cdot \left(\frac{100 - \eta_{T_1}}{100} \right) \text{WE (Wärmeeinheiten),} \end{aligned} \quad (101)$$

¹⁾ Über „die Wärmeentwicklung, Raumtemperatur und Wärmebeseitigung in elektrischen Betriebsräumen“ hat der Verfasser eine ausführliche Studie in E. K. B. 1911, Heft 14, 16, 18 u. 19 veröffentlicht und darüber auch im Elektrotechnischen Verein Berlin einen Vortrag gehalten. E. T. Z. 1911, S. 505, 530 die hier soweit erforderlich wiedergegeben ist.

und somit die von allen in einem Raume untergebrachten Transformatoren erzeugte Wärmemenge gleich der algebraischen Summe der einzelnen Wärmebeträge, also:

$$\mathfrak{W}_g = \mathfrak{W}_1 + \mathfrak{W}_2 + \mathfrak{W}_3 + \dots + \mathfrak{W}_n \text{ WE.} \quad (102)$$

Diese Wärmemengen, die dem Aufstellungsraume der Transformatoren zuströmen, haben eine Erhöhung der in demselben herrschenden Temperatur zur Folge. Die neue Temperatur (Mischungstemperatur) darf nun natürlich einen bestimmten Grad nicht überschreiten, da anderenfalls die Erwärmung der Transformatoren über die zulässige Grenze steigt, und die Wicklungen, das Öl usw. gefährdet werden. Es muß also auf Grund einer Rechnung die Temperaturerhöhung festgestellt, und falls sie zu hoch ist, durch besondere Mittel herabgedrückt werden. Bevor nun zur Besprechung bzw. Berechnung der Belüftungsvorrichtungen geschritten wird, muß man sich darüber schlüssig werden, welche Raumtemperatur zugelassen werden kann.

b) Die Raumtemperatur. Die Entscheidung dieser Frage hängt in erster Linie von der Gegend ab, in welcher das Transformatorenwerk angelegt werden soll, und zwar unter Berücksichtigung der im Hochsommer zu erwartenden Außentemperatur.

Die Raumtemperatur muß stets über der Außentemperatur liegen, und somit beschränkt sich die Behandlung der Frage allein auf diese Übertemperatur. Dabei ist es ferner von Wichtigkeit, wie lange eine höchste Übertemperatur herrscht, denn die Transformatoren müssen nach letzterer hinsichtlich ihrer Erwärmung berechnet werden. Allerdings sollen dabei selbstverständlich nun nicht mit großer Ängstlichkeit Annahmen gemacht werden, die dazu zwingen, reichlicher bemessene und damit teuere Transformatoren aufzustellen, denn es wird, wie auf S. 200 bereits gesagt, stets der Fall sein, daß dieselben auf ein bestimmtes Maß überlastet werden können, also vorübergehend höhere Temperaturen als die normalen aushalten müssen ohne Gefahr z. B. für die Wicklungen, das Öl, das Eisen usw.

Für Deutschland kann man im allgemeinen mit einer Außentemperatur von 25 bis 30° Cels. im Sommer rechnen, die allerdings nur an wenigen Tagen auftreten wird. Es empfiehlt sich daher, für die Gegend, in welcher ein größeres Transformatorenwerk errichtet werden soll, hierüber Erkundigungen einzuziehen, um den Rechnungen eine sichere Grundlage zu geben.

Wesentlich anders aber liegen die Verhältnisse, wenn es sich um Anlagen in heißen Gegenden (im tropischen Klima) handelt, oder wenn das Transformatorenwerk in einem geschlossenen Talkessel liegt, weil dann wesentlich höhere Außentemperaturen auftreten und sich längere Zeit hindurch halten können. Ganz besonders in solchen Fällen ist es empfehlenswert, sich von vornherein entsprechende Unterlagen über die Höchsttemperaturen der Außenluft und ihre Dauer zu beschaffen.

Oftmals wird seitens des Bestellers auch die Forderung gestellt, daß die Temperatur im Transformatorenraume eine Höhe von 25° Cels.

nicht überschreiten soll. Das ist aber eine im Hinblick auf das oben Gesagte fast unmöglich zu erfüllende Bedingung zumal dann, wenn die Außentemperatur wie in den meisten Gegenden, in denen Transformatorenwerke errichtet werden können, 25° Cels. übersteigt. Es heißt daher, bei der Anerkennung derartiger oder ähnlicher Bedingungen Vorsicht zu üben, und insbesondere bei Anlagen in heißen Gegenden sorgfältig zu prüfen, ob eine Vollbelastung der Transformatoren bei einer höheren als der Berechnung zugrunde gelegten Raumtemperatur ohne Gefahr überhaupt noch zulässig ist.

Um sicher zu gehen, ist es ratsam, mit einer Raumübertemperatur von etwa 6 bis 7° Cels. gegenüber der Außentemperatur zu rechnen, und diese Annahme auch der Bemessung der Transformatoren zugrunde zu legen, doch muß, wie wiederholt betont werden soll, diese Zahl stets nach den jeweils vorliegenden Verhältnissen geprüft und gegebenenfalls geändert werden. Die Mischungstemperatur t_x° von m kg = Q_1 cbm Luft von t_1° mit n kg = Q_2 cbm Luft von t_2° beträgt:

$$t_x^\circ = \frac{m \cdot t_1 + n \cdot t_2}{m + n} = \frac{Q_1 \cdot t_1(1 + \alpha \cdot t_2) + Q_2 \cdot t_2(1 + \alpha \cdot t_1)}{Q_1(1 + \alpha \cdot t_2) + Q_2(1 + \alpha \cdot t_1)} \quad (103)$$

$$\alpha = \text{Ausdehnungskoeffizient der Luft} = 0,003665 = \frac{1}{273}.$$

Die Beseitigung der von den Transformatoren an den Raum abgegebenen Wärmemengen kann nun einmal auf natürliche Weise durch Öffnen von Fenstern und Türen, oder durch besondere Maueröffnungen, Dachreiter u. dgl. hervorgerufen werden. Sollten diese Mittel eine genügende Abführung der erwärmten Luft und Zuführung von Frischluft auf Grund der nachfolgenden Rechnung nicht ermöglichen, dann muß die Wirkung solcher Belüftungsstellen durch den Einbau von Ventilatoren (Schraubenventilatoren) unterstützt werden (künstliche Belüftung des Raumes).

c) Die natürliche Belüftung eines Raumes. Bezeichnet:

t_a die Temperatur der einströmenden Luft (Zuluft) in ° Cels.;

t_b die höchst zulässige Raumtemperatur, mit welcher die Luft abzuführen ist, in ° Cels.,

\mathfrak{B} die stündlich durch die Lüftung abzuführende Wärmemenge in WE,

so beträgt die abzuführende Luftmenge von t_b° in cbm/Std.:

$$Q = \frac{\mathfrak{B} \cdot (1 + \alpha \cdot t_b)}{0,307 \cdot (t_b - t_a)} \quad (104)$$

für den Beharrungszustand und unter Voraussetzung, daß die abgegebene und fortzuschaffende Wärmemenge sich sofort gleichmäßig im Raume verteilt, was mit hinreichender Genauigkeit als zutreffend angenommen werden kann. In Tabelle XI ist die Größe des erforderlichen Luftwechsels bezogen auf eine durch denselben fortzuführende Wärme-

menge von 100 WE für verschiedene Raum- und Einströmungstemperaturen angegeben.

Ist z. B. die gesamte Transformatorleistung $L_T = 30\,000$ KW bei einem Wirkungsgrade jedes Transformators von $\eta_T = 98,0\%$, und wird die Bedingung gestellt, daß bei einer Außentemperatur von $t_a = 18^\circ$ Cels. die Raumtemperatur $t_b = 25^\circ$ Cels. im Höchsthalle betragen darf, dann ist zunächst die an den Raum abgegebene Wärmemenge:

$$\mathfrak{R} = 860 \cdot 30\,000 \cdot 0,02 = 516\,000 \text{ WE/Std.},$$

und mit Benutzung der Tabelle XI ergibt sich die stündlich abzuführende Luftmenge zu:

$$Q = 51 \cdot \frac{516\,000}{100} = 263\,160 \text{ cbm/Std.}$$

Man erkennt aus diesem Beispiele, daß man bei großen Anlagen oftmals mit ganz erstaunlichen Werten zu rechnen hat.

Tabelle XI.

Abzuführende Luftmenge Q in cbm/Std. zur Beseitigung einer Wärmemenge von $\mathfrak{R} = 100$ WE.

Temperatur der einströmenden Luft t_a °Cels.	Zulässige Temperatur des Raumes und der Abluft t_b °Cels.																	
	18°	19°	20°	21°	22°	23°	24°	25°	26°	27°	28°	29°	30°	31°	32°	33°	34°	35°
15°	116	87	70	59	50	44	40	36	33	30	28	26	24	23	21	20	19	18
16°	174	117	88	70	59	51	44	40	36	33	30	28	26	24	23	22	20	19
17°	348	175	117	88	71	59	51	45	40	36	33	30	28	26	24	23	22	20
18°		350	175	117	88	71	59	51	45	40	36	33	30	28	26	24	23	22
19°			351	176	118	89	71	59	51	45	40	36	33	30	28	26	25	23
20°				352	177	118	89	71	60	51	45	40	36	33	30	28	26	25

Der Betrag von \mathfrak{R} ist nun aber für die Ausführung der besonderen Belüftungseinrichtungen nicht voll in Rechnung zu stellen, denn selbst dann, wenn der Transformatorraum keine Fenster, Türen, Dachreiter usw. hätte, findet durch das Mauerwerk, den Fußboden, das Dach, die Fenster und Türen, auch wenn alles fest verschlossen ist, ein dauernder Wärmeaustausch zwischen Außen- und Innenluft statt, und zwar von Räumen höherer zu solchen niedrigerer Temperatur. Man nennt diesen natürlichen Vorgang die Wärmewanderung. Es wird demnach eine Wärmeabgabe an die dem Transformatorräume benachbarten kälteren Räume bzw. an die freie Luft, sofern das Transformatorwerk frei liegt, fortgesetzt so lange vor sich gehen, als die Temperatur letzterer unterhalb der Raumtemperatur liegt. Die Wärmewanderung hängt, wie leicht erklärlich, ganz wesentlich von dem Material, der Beschaffenheit und der Stärke der den Raum begrenzenden Flächen ab. Es empfiehlt sich aber trotzdem, die Gebäudewände möglichst wärmeundurchlässig herzustellen, und zwar aus folgenden Gründen: Um in den Sommermonaten eine genügende Wärmewanderung zu ermöglichen, müßten die Wände möglichst dünn

und aus guten Wärmeleitern ausgeführt werden. Das würde aber für die Wintermonate den Nachteil mit sich bringen, daß durch die Wärmewanderung bei kleineren Anlagen und auch bei solchen, bei denen die Transformatoren unmittelbar belüftet werden, die Betriebsräume empfindlich kalt werden könnten. Damit diese also vor Frost geschützt werden, müßten umgekehrt die Wände stark sein und aus wärmeisolierendem Material bestehen, und man wählt daher stets das letztere, um schließlich auch die Temperaturregelung besser beherrschen zu können.

Bezeichnet:

\mathfrak{W}_v den Betrag der Wärmewanderung, also die Wärmemenge, die stündlich im Beharrungszustande durch die Raumbegrenzungsflächen hindurchgeht,

F die Größe der einzelnen Flächen in qm ,

\varkappa eine von den Begrenzungsmaterialien abhängige Erfahrungsziffer (Wärmedurchlässigkeitswert),

so ist die natürliche stündliche Wärmeabgabe durch die Begrenzungsflächen:

$$\mathfrak{W}_v = \varkappa \cdot F \cdot (t_b - t_a) \text{ WE.} \tag{105}$$

Rietschel¹⁾ hat die Werte von \varkappa für die am häufigsten vorkommenden Baumaterialien ermittelt; diese sind in Tabelle XII zusammengestellt:

Tabelle XII.

Wärmedurchgangswerte für Luft bei verschiedenen Baustoffen.

I. Außenwände.

Volles Ziegelmauerwerk ohne Putz	Stärke in m	0,12	0,25	0,38	0,51	0,64	0,77	0,90	1,03	1,16	1,29
	\varkappa	2,40	1,70	1,30	1,10	0,90	0,80	0,65	0,60	0,55	0,50
Volles Ziegelmauerwerk mit Quaderverblendung	Gesamtstärke in m	0,12	0,25	0,38	0,51	0,64	0,77	0,90	1,03	1,16	1,29
	\varkappa	2,76	1,95	1,49	1,26	1,03	0,92	0,74	0,68	0,63	0,57
Volles Sandsteinmauerwerk (Quader- oder Bruchsteine)	Stärke in m	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20
	\varkappa	2,20	1,90	1,70	1,55	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,95
Kalksteinmauerwerk	Stärke in m	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20
	\varkappa	2,42	2,09	1,87	1,70	1,54	1,43	1,32	1,21	1,10	1,04
Ziegelmauerwerk mit 6 cm Luftschicht.	Mauerstärke in m	0,24	0,37	0,50	0,63	0,76	0,89	1,02	—	—	—
	\varkappa	1,22	1,00	0,90	0,72	0,64	0,57	0,51	—	—	—

Holz wand aus 0,25 bis 0,30 m starken Brettern: einfach: $\varkappa = 1,9$; doppelt: $\varkappa = 1,2$; doppelt mit Luftschicht: $\varkappa = 0,92$.

¹⁾ Rietschel: Entwurf von Lüftungs- und Heizungsanlagen.

II. Innenwände.

Volles Ziegelmauerwerk ohne Putz	Stärke in m	0,12	0,25	0,38	0,51	0,64	0,77
	z	2,20	1,60	1,20	1,00	0,90	0,70
Rabitzwand	Stärke in m	0,04	0,06	0,08	0,10	—	—
	z	3,10	2,80	2,50	2,30	—	—
Gipsdielen	Stärke in m	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	—
	z	3,20	3,01	2,90	2,80	2,64	—

Holz wand aus 0,25 bis 0,30 m starken Brettern; einfach: z = 1,9; doppelt: z = 1,2; doppelt mit Luftschicht: z = 0,92.

III. Fußböden, Decken, Fenster, Türen usw.

a) Fußböden und Decken:

Balkenlage mit einfacher Dielung	z = 1,60
„ „ unten verschalt, kalte Luft unten	z = 0,24
„ „ „ „ „ oben	z = 0,48
Ziegelgewölbe mit Lager- } kalte Luft unten	z = 0,35
hölzern und Holzdielung } „ „ oben	z = 0,70
Gewölbe mit massivem Fußboden	z = 1,00
Einfache Tannenholzdielung als Decke	z = 0,32
„ „ „ Fußboden	z = 0,47
Massive Fußböden über Erdreich	z = 1,40

b) Dächer:

Ziegeldach ohne Schalung	z = 4,80
Wellblech auf „	z = 6,00
„ ohne „	z = 9,00
Teerpappe, Zink oder Schiefer auf Schalung	z = 2,15

c) Fenster und Türen:

Einfaches Fenster	z = 5,30
Doppelfenster	z = 2,24
Einfaches Oberlicht	z = 5,64
Doppeltes Oberlicht	z = 2,35
Fichtenholztür { Dicke des Holzes in m	0,02 0,03 0,04 0,05 0,06
{ innen } z { 2,12 1,73 1,46 1,26 1,11	
{ außen } z { 2,25 1,80 1,52 1,31 1,15	
Eichenholztür { innen } z { 2,84 2,51 2,25 2,03 1,90	
{ außen } z { 3,10 2,70 2,40 2,15 1,94	

Zu dem mit diesen Werten für z berechneten \mathfrak{B}_v sind je nach der Lage der Räume im Gebäude und zur Himmelsrichtung Zuschläge zu machen, und zwar etwa:

- für alle nach O, NO, N und NW liegenden Flächen 10%,
- für alle dem Windanfalle besonders ausgesetzten Flächen 10%.

Es bleibt somit nur noch eine Wärmemenge:

$$\mathfrak{B}_e = \mathfrak{B} - \mathfrak{B}_v$$

$$= 860 \cdot \Sigma \left(L_T \cdot \frac{100 - \eta_T}{100} \right) - \Sigma z \cdot F \cdot (t_b - t_a) \text{ WE} \tag{106}$$

mittels besonderer Belüftung zu beseitigen. Die Gl. (104) geht infolgedessen in die Form über:

$$Q = \frac{\mathfrak{B}_e \cdot (1 + \alpha \cdot t_b)}{0,307 (t_b - t_a)} \text{ cbm/Std.} \tag{107}$$

Die Luftmenge ferner, die zur Einhaltung einer bestimmten Raumtemperatur t_b von außen zu entnehmen ist, ist:

$$Q_a = Q \frac{1 + \alpha \cdot t_a}{1 + \alpha \cdot t_b}. \quad (108)$$

Die Fig. 166 zeigt die Druckverhältnisse in einem Raume, dessen Temperatur höher ist als diejenige seiner Umgebung. Bekanntlich ist die warme Luft leichter als die kalte, und steigt im Raume nach oben, während die kalte Luft am Fußboden eintritt. Soll nun, abgesehen von der Wärmewanderung, eine Luftbewegung innerhalb des Raumes stattfinden, so ist es notwendig, zwei Öffnungen herzustellen, von denen die am Boden befindliche für den Frischlufteintritt und diejenige an der Decke oder im Dach für den Austritt der erwärmten Luft dient. Aus Fig. 166 erkennt

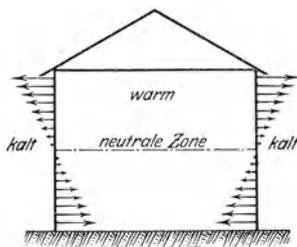


Fig. 166.

man ferner, daß es im Raume eine Zone gibt, in welcher weder Frischluft ein-, noch warme Luft austritt. Man nennt diese die neutrale Zone. Um daher festzustellen, an welchen Stellen Belüftungsöffnungen anzulegen sind, muß die Lage der neutralen Zone bekannt sein, und die Luftbewegung wird um so wirksamer werden, je weiter die Öffnungen von der neutralen Zone entfernt sind. Die Lage der

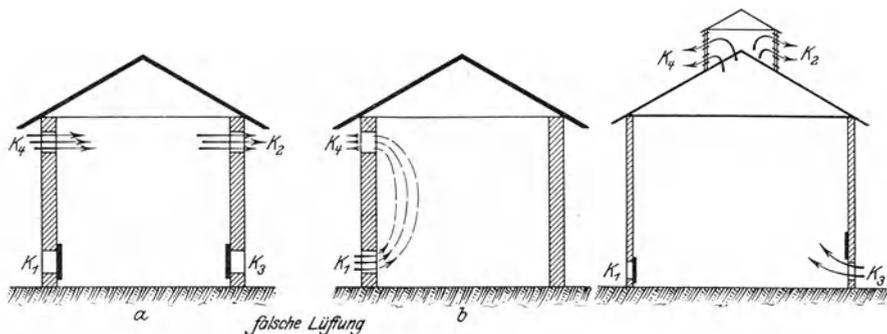


Fig. 167.

Fig. 168.

neutralen Zone kann man für die hier zu behandelnden Fälle mit hinreichender Genauigkeit in der Mitte des Transformatorenraumes bzw. des Stockwerkes, in welchem die Transformatoren stehen, annehmen. Nur dann, wenn die Höhe des Raumes gegenüber der Höhe der Transformatoren sehr gering ist (z. B. Transformatorenwerke unter Straßenoberfläche, in Gruben u. dgl.), wird sich die Lage der neutralen Zone beachtenswert verschieben.

In den Fig. 167 bis 170 sind verschiedene Lüftungsanordnungen abgebildet. Die zur Lüftung erforderlichen Öffnungen sind stets so

anzulegen, daß der Frischluftstrom durch den ganzen Raum und zwar soviel wie möglich in diagonaler Richtung streicht. Verfehlt wäre es, eine Luftbewegung nur durch wagrecht oder senkrecht

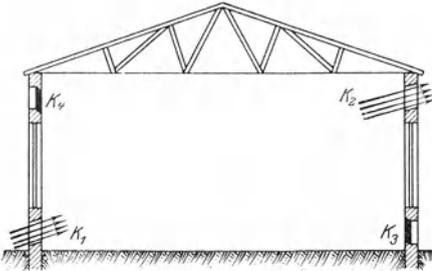


Fig. 169.

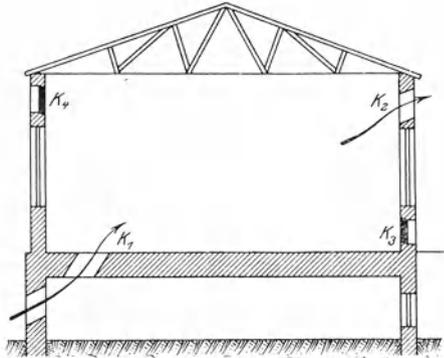


Fig. 170.

gegenüberliegende Öffnungen bewirken zu wollen, weil dann nach Fig. 167 der Frischluftstrom durch den Raum gehen würde, ohne auch die Transformatoren genügend zu bestreichen und die um diese gelagerte warme Luft zu zerstreuen. Letzteres ist aber eine Hauptbedingung für eine gute Belüftung.

Als einfachstes, aber auch unsicherstes und unvollkommenes Mittel zur Erzielung des Luftwechsels wird das Öffnen von Türen und Fenstern angewendet. Soll hierdurch eine nur einigermaßen zuverlässige Belüftung erreicht werden, so setzt dieses zunächst voraus, daß die Witterungsverhältnisse günstige sind. Bei Windstille ist dieses Mittel so gut wie unwirksam. Man sollte sich daher, sofern die Rechnung nun einmal einen besonders zu erzeugenden Luftwechsel ergeben hat, nicht auf derartig untechnische Maßnahmen verlassen, sondern von vornherein eine der folgenden Anordnungen wählen. Als Hauptbedingung gilt hierbei, daß der Luftwechsel jederzeit und vor allen Dingen zuverlässig erreicht werden muß, und daß man die Belüftung je nach den herrschenden Witterungs- und Temperaturverhältnissen regeln kann.

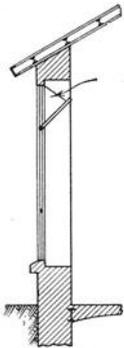


Fig. 171.

Wie wenig gut für große Anlagen das Mittel der Belüftung durch einfaches Öffnen der Fenster ist, ist aus Fig. 171 ohne Schwierigkeit zu erkennen. Die Klappenfenster haben z. B. den Nachteil, daß die Austrittsöffnung wesentlich verringert wird, weil die geöffnete Fensterfläche nicht vollkommen vorhanden ist, sondern zum Teil durch das vorliegende Fenster selbst geschlossen wird. Wenn bei einer derartigen Belüftungsvorrichtung nicht auch gleichzeitig die Türen oder andere tiefer liegende Fenster geöffnet sind, ist das Mittel vollkommen

unwirksam, weil das Entweichen der erwärmten Luft nur langsam von-statten geht, und zwar nur so stark, wie Frischluft durch Spalten usw. zuströmt, denn andernfalls würde der Raum von Luft entleert werden, was natürlich unmöglich ist. In alleinstehenden Transformatoren-häusern, die keine ständige Aufsicht haben, kann natürlich eine Be-lüftung durch das Öffnen der Türen und Fenster nicht angewendet werden.

Bei Transformatorenwerken kleineren Umfanges sind, wenn von einer Belüftung in der obengenannten Form abgesehen wird, besondere Maueröffnungen oftmals schon genügend, um den gewünschten Luftwechsel hervorzurufen. Macht man dieselben noch verschließbar (Fig. 168 bis 170), so hat man dadurch die Möglichkeit, den Luftein- und -austritt nach der jeweils herrschenden Windrichtung durch Be-nutzung der Klappen K_1 und K_2 bzw. K_3 und K_4 zu regeln, ein Vorteil, den man nur ungern wird missen wollen.

Für die Eintrittsöffnungen kann wohl in den häufigsten Fällen Platz gefunden werden, für die Austrittsöffnungen ist dies in den Mauer-wänden oftmals schwierig; man muß diese dann im Dache herstellen und mit sog. „Dachreitern“ überdecken (Fig. 168).

Die Querschnitte für die Ein- und Austrittsöffnungen sind nun folgendermaßen zu berechnen:

Bezeichnet q in qm den Querschnitt der Maueröffnung, h in m die Höhe von der neutralen Zone bis zur Mitte der Austrittsöffnung und v die Luftgeschwindigkeit in $m/Sek.$, so ist für die stündlich zuzuführende Luftmenge Q von der Temperatur t_a ein Durchströmungsquerschnitt not-wendig von:

$$q = \frac{Q}{3600 \cdot v} \text{ qm}; \tag{109}$$

die Luftmenge Q ist nach Gl. (107) festzustellen.

Für verschiedene Höhen h und Temperaturunterschiede $t_u = t_b - t_a$ hat Rietschel¹⁾ die Werte für v ermittelt, die in Tabelle XIII zu-sammengestellt sind:

Tabelle XIII.

h in m	v in $m/Sek.$ für			
	$t_u = 2^\circ \text{ Cels.}$	$t_u = 4^\circ \text{ Cels.}$	$t_u = 6^\circ \text{ Cels.}$	$t_u = 8^\circ \text{ Cels.}$
1	0,08	0,13	0,17	0,19
2	0,16	0,25	0,30	0,33
3	0,23	0,34	0,42	0,47
4	0,29	0,42	0,51	0,59
5	0,34	0,49	0,59	0,69
6	0,39	0,55	0,67	0,77
7	0,43	0,60	0,73	0,83
8	0,47	0,65	0,77	0,88
9	0,50	0,68	0,82	0,93
10	0,52	0,72	0,87	0,98

¹⁾ a. a. O.

d) Die künstliche Belüftung eines Raumes. Kann der erforderliche Luftwechsel durch Maueröffnungen nicht mehr mit voller Zuverlässigkeit erreicht werden, weil entweder die Abmessungen für diese oder die Dachreiter zu groß werden, oder will man die Belüftungsvorrichtung von allen Witterungsverhältnissen unabhängig machen, sie also vollständig beherrschen, dann muß der Luftwechsel künstlich mittels besonderer Ventilatoren hervorgerufen werden. Diese Form der Belüftung besteht demnach ihrem besonderen Merkmale nach darin, daß der Luftwechsel erzwungen wird.

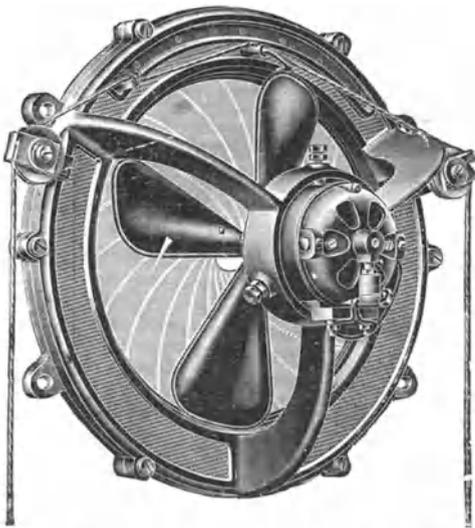


Fig. 172. Schraubenventilator mit Irisverschluß und angebautem Elektromotor.

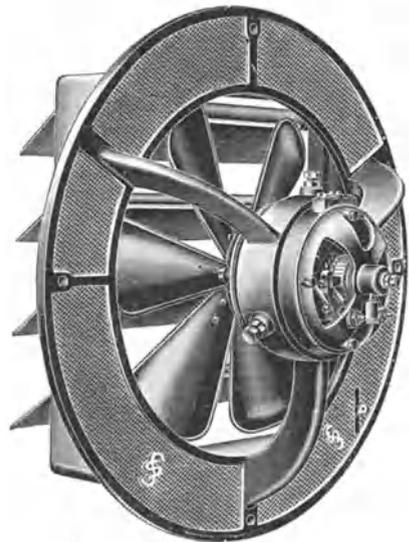


Fig. 173. Schraubenventilator mit Jalousieverschluß und angebautem Elektromotor.

Die Ventilatoren können in ihrem konstruktiven Aufbau als bekannt vorausgesetzt werden. In Fig. 172 ist ein solcher Wandventilator mit Irisverschluß und in Fig. 173 mit Jalousieverschluß der Siemens-Schuckert-Werke dargestellt, dessen Flügelrad in der Regel durch einen angebauten, gekapselten Elektromotor angetrieben wird.

Je nach der Ausführung der Schaufeln können die Ventilatoren als Druck- oder Saugventilatoren arbeiten, und zwar soll dieses vom Betriebsraume aus betrachtet so verstanden werden, daß ein Druckventilator Frischluft in den Raum fördert, während ein Saugventilator die erwärmte Luft aus letzterem entfernt. (Überdruck bzw. Unterdruck im Raume.) Ob beide Arten von Ventilatoren gleichzeitig verwendet werden müssen, oder ob man nur mit einem Saug- bzw. Druckventilator auskommt, muß die Rechnung ergeben, und zwar aus den Querschnitten für die Ein- und Austritts-

öffnungen unter Zugrundelegung einer bestimmten Luftgeschwindigkeit, oder aus den Abmessungen der Ventilatoren selbst, bei denen natürlich eine Unterteilung der zu fördernden Luftmenge auf mehrere Ventilatoren bei größeren Anlagen leicht erklärliche Vorteile bietet.

Es empfiehlt sich im allgemeinen, Saugventilatoren zu verwenden, und zwar weil sie in ihrem zweckentsprechenden Arbeiten weniger von den Witterungsverhältnissen abhängig sind. Druckventilatoren müssen fast immer bei Regen und Schnee außer Betrieb gesetzt werden. Bei starker Staubentwicklung in der Umgebung des Transformatorenhouses sind sie ebenfalls unbrauchbar, weil sie, wenn die

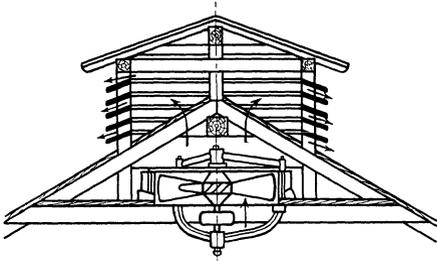


Fig. 174. Saugventilator in einem Dachreiter.

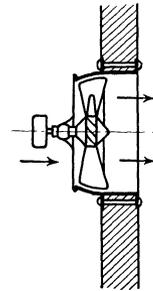


Fig. 175. Saugventilator an einer horizontalen Wand.

Luft nicht vorher durch Filter gereinigt wird, die unreine Luft in den Raum fördern, und eine Verschmutzung herbeiführen, die unter Umständen recht unangenehm für die Apparatenanlage, vorhandene Motoren usw. sein kann bzw. mindestens umständliche Reinigungsarbeiten zur Folge hat. Andererseits ist aber auch die Ansicht berechtigt, daß der Druckventilator die Wärmebeseitigung durch die Wärmewanderung begünstigt, dadurch, daß er einen gewissen Überdruck im Betriebsraume erzeugt. Alles dieses muß bei der Wahl der Ventilatoren berücksichtigt werden.

Der Einbau der Ventilatoren (Fig. 174 bis 176) hat nach den gleichen Gesichtspunkten zu erfolgen, wie diese für das Anlegen von Maueröffnungen bereits erörtert worden sind. Werden nur Druck- oder nur Saugventilatoren eingebaut, so ist nicht zu vergessen, daß auch die zweiten Öffnungen mit entsprechendem Querschnitte vorhanden sein müssen, denn andern-

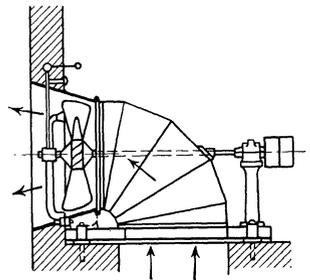
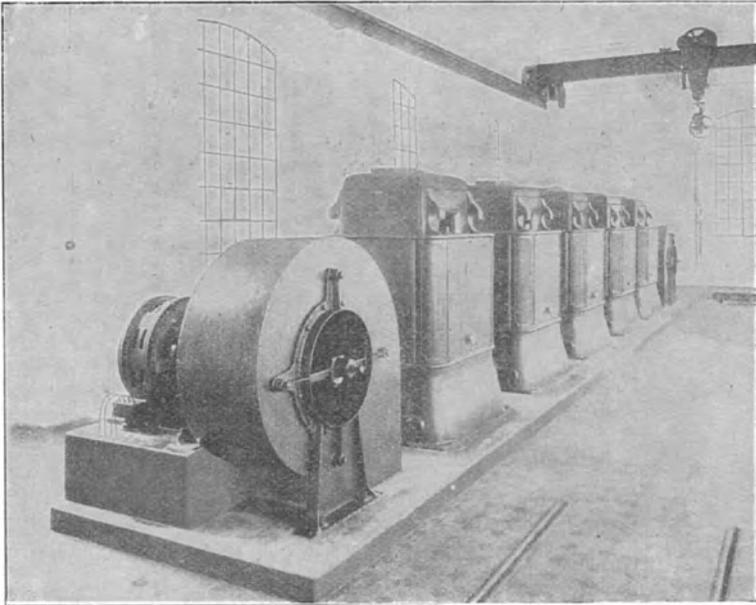


Fig. 176. Saugventilator mit Rohranschluß.

falls ist auch hier aus den bereits erwähnten Gründen ein Luftwechsel nicht erzielbar. Die zweiten Luftdurchlaßstellen etwa durch das Öffnen von Fenstern zu ersetzen, ist nur dann zugänglich, wenn die Bahn des Luftstromes in die notwendige Form gezwungen wird.

Als Ventilatoren für derartige Belüftungszwecke sind, wie schon angedeutet, nur Schraubenventilatoren (Fig. 172 und 173) zu verwenden, weil diese sich besonders dazu eignen, große Luftmengen gegen geringe Widerstände bis zu 20 mm WS zu fördern. Sie haben die beste Wirkung, wenn keine Kanäle oder Leitungen angeschlossen werden. Sind solche nicht zu umgehen, so muß deren Querschnitt mindestens gleich oder besser größer als der Flügeldurchmesser des Ventilators



Druckventilator

Saugventilator

Fig. 177. Belüftung von Trockentransformatoren durch Zentrifugalventilatoren.

sein. Für eine bestimmte zu fördernde Luftmenge i . d. Sekunde muß dieser Flügeldurchmesser:

$$D = 1,3 \sqrt{\frac{Q}{v}} \text{ m} \quad (110)$$

betragen; wird D zu groß, dann muß eine Unterteilung auf mehrere Ventilatoren vorgenommen werden. Die Geschwindigkeit v kann man etwa bis max. 2,5 m/Sek. annehmen. Als Verschlüsse des Luftzu- bzw. Austrittes für die Ventilatoren dienen Iris- und Jalousieverschlüsse.

Der Antrieb der Ventilatoren erfolgt in der Regel durch einen unmittelbar angebauten oder mittels elastischer Kupplung verbundenen, gekapselten Elektromotor. Bei reinen Transformatorstationen werden nur Drehstrom-Kurzschlußankermotoren in Frage kommen.

Die Antriebskraft berechnet sich zu:

$$L = \frac{Q \cdot H}{75 \cdot \eta_V} \text{ PS} \quad (111)$$

η_V = Wirkungsgrad des Ventilators (im Durchschnitt 0,20 bis 0,30);
 H = zu erzeugender Pressungsunterschied (Pressung in mm WS).

e) Die künstliche Belüftung der Transformatoren selbst. Von ganz anderen Gesichtspunkten ist die Belüftung zu behandeln, wenn den Transformatoren unmittelbar die Frischluft zugeführt werden soll. Das ist dann notwendig, sobald entweder die Belüftung des Raumes nicht mehr wirksam genug gestaltet werden kann (z. B. bei sehr großen Anlagen in heißen Gegenden), oder die Abkühlungsflächen der Transformatoren (Trockentransformatoren) nicht mehr ausreichen, um bei großen Leistungen die in Wärme umgesetzten Verluste durch die Oberflächen allein abzuführen, ohne die Konstruktion erheblich zu verteuern. Es spielt dann die Entwicklung der Wärme innerhalb der Transformatoren selbst und ihre genügende Beseitigung die Hauptrolle, um, wie früher bereits gesagt, den günstigsten Wirkungsgrad und die kleinsten Abmessungen zu erhalten. Es soll daher auch über die Belüftung der Transformatoren mittels besonderer Ventilatoren und die hierzu erforderlichen Anlagen und Einrichtungen das Notwendige erörtert werden.

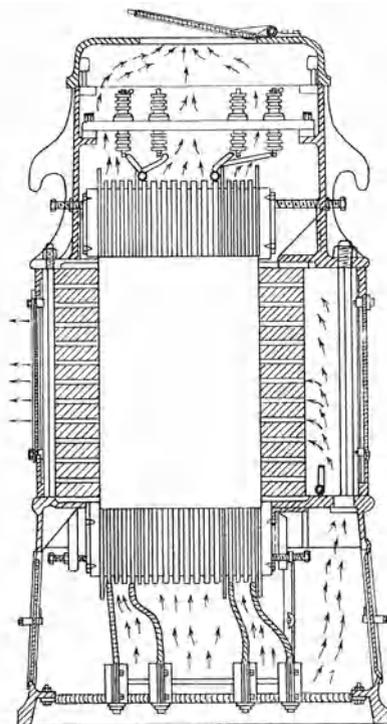


Fig. 178. Luftführung innerhalb eines Trockentransformators.

In Fig. 177 ist eine solche Belüftungsanordnung¹⁾ und in Fig. 178 die Luftführung innerhalb eines solchen Transformators abgebildet. Die Transformatoren in Fig. 177 stehen über einem im Fußboden angelegten Kanale, der an einen Druckventilator angeschlossen ist. Die erwärmte Luft wird ebenfalls von einem besonderen Ventilator abgesaugt, kann aber auch aus den Transformatoren durch Klappen im Blechgehäuse frei in den Raum austreten. Im letzteren Falle sind zum Zwecke der genügenden Belüftung

¹⁾ Ausgeführt von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin, für die Sillwerke; 5 Drehstromtransformatoren von je 500 KVA, 10000/2000 Volt, Freq. = 50.

des Raumes unter Verzicht auf das Öffnen der Fenster unter Umständen noch besondere Maueröffnungen oder Ventilatoren in den Begrenzungsmauern anzulegen.

Für die Berechnung der Kanalanlage und zur Bestimmung der Größe der Ventilatoren müssen bekannt sein: die notwendige Luftmenge für jeden Transformator und die Luftpressung innerhalb des Transformators. Im allgemeinen soll die Luftzufuhr derart geregelt sein, daß die Temperaturerhöhung der ausgeblasenen Luft nicht mehr als etwa 20° Cels. beträgt. Eine höhere Erwärmung würde auf die Zuführung ungenügender Luftmengen hinweisen, die durch zu niedrigen Druck oder durch Verstopfung der Kanäle verursacht sein könnte. Um bei derartigen Störungen in der Belüftung die Transformatoren wegen zu hoher Erwärmung nicht außer Betrieb setzen zu müssen, empfiehlt es sich, die für die Luftführung vorhandene Verkleidung entweder wie oben gesagt mit leicht zu öffnenden Klappen zu versehen, oder sie so auszuführen, daß sie leicht entfernt werden kann, um der umgebenden Luft freien Zutritt zu gestatten. In Fig. 179 ist ein derartig ausgeführter Transformator der Westinghouse Comp. abgebildet (äußere Ansicht des Transformators Fig. 178).

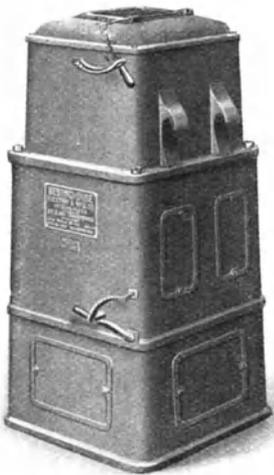


Fig. 179. Fremdbelüfteter Trockentransformator (äußere Ansicht).

Die Kanäle werden in Transformatorstationen, bei denen eine besondere Unterkellerung des Betriebsraumes zumeist nicht vorhanden ist, unmittelbar im Fußboden hergestellt und dienen dann unter Umständen gleichzeitig als Kabelkanäle. Sind die Platzverhältnisse beschränkte oder müssen die Kanäle erst durch umfangreiche Sprengungen gewonnen werden (Felsboden), so kann man sich dadurch helfen, daß man den Frischluftkanal auf dem Fußboden anlegt und ihn gleichzeitig zur Aufstellung der Transformatoren selbst benutzt. Die Wahl der Wege hat sich daher nach dem zur Verfügung stehenden Platze zu richten.

Als allgemeine Gesichtspunkte für die Ausführung einer Kanalanlage gelten in erster Linie, daß die Kanäle unbedingt dicht gegen die Außenluft, gegebenenfalls gegen Grundluft und Grundwasser sein müssen und, sofern sie unmittelbar im Fußboden ausgespart werden, sauber auszuputzen oder am zweckmäßigsten mit glasiertem Material auszukleiden sind, um den Reibungswiderstand der Luft an den Wandungen auf ein geringstes Maß herabzudrücken. Die Fugen sollen möglichst eng sein und gut verstrichen werden, um nicht den

Vorteil der glasierten Wandbekleidungen zum Teil aufzuheben. Richtungsänderungen, die als wesentliche Widerstände gegen die Luftbewegung anzusehen sind, werden zumeist nicht vorkommen, weil man die Transformatoren fast stets in einer Reihe ähnlich der Fig. 177 aufstellen kann. Ist dieses nicht möglich, so sollen die Richtungsänderungen sanft und im Bogen mit möglichst großem Radius angelegt werden, während jede scharfkantige oder plötzliche Richtungsänderung ganz vermieden werden muß, denn, wie weiter unten angegeben ist, erhöht sich der Widerstand gegen die Luftbewegung durch diese um ein beträchtliches. Ebenso wie die Richtungsänderungen sind alle Querschnittsverengungen oder -erweiterungen in den Kanälen allmählich vorzunehmen, um Stoßverluste und Wirbelbildungen der Luft zu vermeiden.

Kann die Lage der Kanäle nicht so getroffen werden, daß jede Wasseransammlung ausgeschlossen ist, dann sind Wasserabscheider etwa in Form von Sammeltröpfen einzubauen, die sich, sofern Krümmer vorhanden sind, vor diesen befinden müssen. Ferner sollen die Kanäle wenn irgend möglich begehbar oder beschlupfbar oder, wenn dies infolge der Abmessungen nicht erreichbar ist, wenigstens leicht zugänglich sein, um sie bequem reinigen zu können.

Die den Ventilatoren zuzuführende Frischluft wird bei Transformatorstationen in der Regel aus dem Betriebsraume entnommen, und daher soll über die Entnahmestellen für die Frischluft nichts weiter gesagt werden. Selbstverständlich ist, daß die Frischluft von Staub und von chemischen Beimengungen, die die Isolation angreifen könnten, frei sein muß.

f) Die Berechnung der Belüftungskanäle. Ist nun die Kanalanlage entworfen und in die Gebäudezeichnung eingetragen, dann erst kann man zur Berechnung der Kanalquerschnitte und daraus der Größenbestimmung der Ventilatoren übergehen.

Nach Gl. (109) war der Querschnitt für einen Frischlufteinlaß:

$$q_F = \frac{Q}{3600 \cdot v} \text{ qm},$$

und für einen Abluftauslaß ist derselbe entsprechend:

$$q_A = \frac{Q \cdot (1 + \alpha \cdot t_2)}{3600 \cdot v \cdot (1 + \alpha \cdot t_1)}, \quad (112)$$

wenn die Geschwindigkeit der Luft in beiden Fällen gleich angenommen wird.

Die Luftmengen Q für jeden an die Belüftungsanlage anzuschließenden Transformator muß, wie bereits gesagt, von dem Konstrukteur angegeben werden und zwar gleichzeitig mit der Pressung in Meter Luftsäule oder in Millimeter WS, die innerhalb des Transformators auftritt. Die Geschwindigkeit v muß gewählt werden. Man wird diese zunächst klein annehmen, um, wie weiter unten gezeigt werden wird, den Verlust an Geschwindigkeitshöhe möglichst herabzusetzen. Wenn

durch die Platzverhältnisse erreichbar, sollte mit v nicht über 6 bis 8 m/Sek. gegangen werden. Keinesfalls sind aber höhere Werte für v als 10 bis 12 m/Sek. im Maximum zu wählen. Bei beschränktem Raume für die Kanäle wird es aber oftmals nicht angängig sein, für v von vornherein einen bestimmten Wert zugrunde zu legen und daraus q zu berechnen, sondern man muß umgekehrt verfahren und nach einer Überschlagsrechnung unter Annahme einer beliebigen Luftgeschwindigkeit zunächst die Querschnitte ermitteln, die, falls zu groß, den zur Verfügung stehenden Raumverhältnissen angepaßt werden. Mit diesen neuen Querschnitten ist dann rückwärts v zu berechnen.

Dem Durchstreichen der Luft durch die Kanäle setzen sich nun naturgemäß Widerstände entgegen, die hervorgerufen werden durch die Reibung der Luft an den Kanalwandungen, durch Krümmer, Querschnittsänderungen u. dgl. Die Widerstände haben einen Verlust an Geschwindigkeits- und Widerstandshöhe zur Folge und müssen für jede Kanalstrecke gesondert berechnet werden.

Dieser Verlust¹⁾ ist für jede Kanalstrecke:

$$V_{rl} = \frac{v_n^2}{2 \cdot g (1 + \alpha \cdot t_n)} \cdot (R_n + \Sigma \zeta_n), \quad (113)$$

oder wenn der Kanal ins Freie mündet:

$$V'_{rl} = \frac{v_n^2}{2 \cdot g (1 + \alpha \cdot t_n)} \cdot (1 + R_n + \Sigma \zeta_n), \quad (114)$$

worin:

v_n in m/Sek. die Luftgeschwindigkeit in den einzelnen Teilstrecken,

R_n die Reibungswiderstände in den einzelnen Kanälen,

ζ_n die einmaligen Widerstände in den einzelnen Kanälen bezeichnet.

Wie aus Gl. (113) und (114) ersichtlich, wachsen die Strömungswiderstände mit dem Quadrate der Luftgeschwindigkeit, und aus diesem Grunde sollte man mit v tunlichst nicht über die oben angegebenen Werte gehen.

Durch:

$$\frac{v_n^2}{2 \cdot g (1 + \alpha \cdot t_n)}$$

wird der Verlust an Geschwindigkeitshöhe berücksichtigt.

Der Reibungswiderstand R ist für einen rechteckigen Kanalquerschnitt:

$$R_{\square} = \frac{\rho \cdot l \cdot u}{g}, \quad (115)$$

für einen runden oder quadratischen Querschnitt:

$$R_{\circ, \square} = \frac{4 \rho \cdot l}{d} \quad (116)$$

¹⁾ Die Ableitung dieser Gleichungen siehe Rietschel: a. a. O.

in m Luftsäule, worin:

- ϱ eine Erfahrungsziffer (Reibungskoeffizient),
- l die Gesamtlänge in m,
- u den Umfang in m
- q den Querschnitt in qm
- d den Durchmesser oder die Seite in m

} des Kanales

bedeutet.

Nach Versuchen von Rietschel kann ϱ für Kanäle bis herab zu 48 cm gefunden werden aus der Gl. (117):

$$\varrho = 0,0065 + \frac{0,0604}{u - 48}, \tag{117}$$

worin u in cm einzusetzen ist. In Tabelle XIV sind einige Werte für ϱ für gemauerte Kanäle angegeben:

Tabelle XIV.

$u =$	0,50	0,52	0,54	0,56	0,59	0,65	0,72 bis 0,95	0,96 bis 1,99	2,00 bis 12,50
$\varrho =$	0,035	0,020	0,017	0,014	0,012	0,010	0,009	0,008	0,007

Unter der Summe der Widerstände $\Sigma \zeta_n$ für die einzelnen Kanalstrecken sind alle diejenigen Widerstände zu verstehen, die sich nur einmal der Luftbewegung entgegensetzen. Zu solchen sind zu rechnen diejenigen, die von Richtungsänderungen, Schiebern, Klappen und Querschnittsänderungen herrühren.

Es kann angenommen werden für Richtungsänderungen bei gemauerten Kanälen:

- für ein rechtwinkliges, scharfes Knie $\zeta = 1,5$
- für ein rechtwinkliges, abgerundetes Knie (Bogen) . $\zeta = 1,0$
- für ein Knie von 135° $_ /$ $\zeta = 0,6$
- für eine allmählich verlaufende Richtungsänderung . $\zeta = 0$

ferner:

- für geöffnete Schieber und Klappen, sofern der Rahmen mit dem Mauerwerke bündig liegt $\zeta = 0$
- für Querschnittsänderungen bei allmählichem Übergange $\zeta = 0$
- für plötzliche Querschnittsänderungen (Übergang v_1, q_1

$$\text{in } v_2, q_2): \zeta = \left(\frac{q_1}{q_2} - 1\right)^2.$$

Die erforderliche Druckhöhe H des Ventilators berechnet sich nun zu:

- $H = \Sigma K + \Sigma H_T$ in m Luftsäule,
- ΣK = Summe aller Geschwindigkeits- und Widerstandshöhen der Kanalanlage,
- ΣH_T = Summe aller Pressungen innerhalb der Transformatoren,

oder wie in der Praxis üblicher in mm WS ausgedrückt zu:

$$\left. \begin{aligned} H &= 1,293 (\Sigma K + \Sigma H_T) \\ &= 1,293 \left[\Sigma \frac{v_n^2}{2 \cdot g (1 + \alpha \cdot t_n)} (R_n + \Sigma \zeta_n) + \Sigma H_T \right] \end{aligned} \right\} \quad (118)$$

bzw.:

$$H = 1,293 \left[\Sigma \frac{v_n^2}{2 \cdot g (1 + \alpha \cdot t_n)} (1 + R_n + \Sigma \zeta_n) + \Sigma H_T \right]. \quad (119)$$

g) Die Ventilatoren. Für die getrennt aufzustellenden Ventilatoren kommen nur Zentrifugalventilatoren in Frage. Hier auf Einzelheiten der Konstruktion und Wirkungsweise ausführlicher einzugehen, ist nicht möglich.

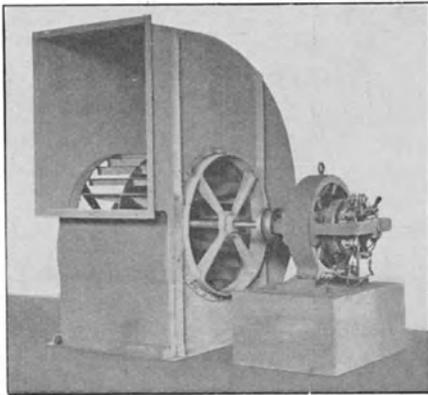


Fig. 180. Zentrifugalventilator, nach vorne blasend, mit angebauem Motor.

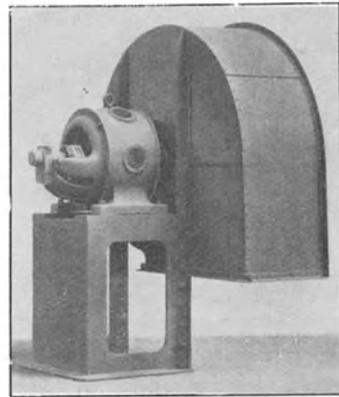


Fig. 181. Zentrifugalventilator, nach unten blasend, mit angebauem Motor.

Die Zentrifugalventilatoren bestehen in der Regel aus einem Blechgehäuse, in welchem sich ein Flügelrad mit parallel zur Achse stehenden Schaufeln dreht (Fig. 180). Die Saugöffnung ist rund und liegt in der Achse des Flügelrades. Die Ausblaseöffnung kann in den verschiedenen Richtungen gewählt werden. So zeigt die Fig. 180 dieselbe nach oben und vorne, während der Ventilator in Fig. 181 nach unten bläst entsprechend einer Aufstellungsart nach Fig. 177.

Der Antrieb erfolgt vorteilhaft durch einen direkt gekuppelten Elektromotor. Diese Anordnung gibt einen besseren Wirkungsgrad und gestattet bei entsprechender Wahl des Motors eine Steigerung der Umdrehungszahl des Ventilators je nach den obwaltenden Betriebsverhältnissen. Die Luftmenge nimmt dabei annähernd proportional mit der Umdrehungszahl zu. Ist ein Transformatorenwerk zunächst nur teilweise ausgebaut, und wird der Ventilator, falls nur einer überhaupt zur Aufstellung kommen soll, von vornherein für die Luftmenge, die

bei vollem Ausbau notwendig ist, bemessen, dann kann etwa in folgender Weise verfahren werden. Zunächst treibt man den Ventilator durch einen in seiner Größe der augenblicklich zu fördernden Luftmenge angepaßten Motor mittels Riemen an und ersetzt den Motor dann bei vollem Ausbau durch einen der Maximalleistung entsprechenden direkt gekuppelten neuen Motor.

Eine andere, jedenfalls zweckmäßigere und darum mehr zu empfehlende Lösung solcher auf Erweiterungen Rücksicht nehmender Fälle ist die, daß man einen direkt angetriebenen Ventilator aufstellt, der selbst und dessen Motor und Regulator aber von vornherein so bemessen werden, daß eine Leistungssteigerung des Ventilators durch Drehzahlerhöhung möglich ist. Dabei ist zu beachten, daß die notwendige Antriebskraft L proportional mit der dritten Potenz der Umdrehungszahl wächst, und zwar weil die

Pressung H mit dem Quadrate der Umdrehungszahl und die Luftmenge proportional mit H ist. Diese Möglichkeit der Steigerung der zu fördernden Luftmenge hat, sofern sie dann auch bei später aufzustellenden Ventilatoren vorgesehen wird, den weiteren Vorteil, daß bei Aufstellung eines zweiten Ventilators die Betriebssicherheit der gesamten Belüftungseinrichtung erhöht wird. Bei unfreiwilligem Stillsetzen eines Ventilators ist der zweite imstande, die gesamte notwendige Luftmenge oder wenigstens annähernd das erforderliche Luftquantum zu fördern, und die Energieabgabe der Transformatoren braucht nicht eingeschränkt zu werden.

Bei großen von vornherein voll ausgebauten Anlagen wird diese Unterteilung der Belüftungsmaschinen jedenfalls das Vorteilhafteste und Sicherste sein, wenn nicht andererseits etwa infolge Platzmangels die Aufstellung eines besonderen Reserveventilators unmöglich ist. Letzteres ist naturgemäß das Ratsamste und, falls zugänglich, der anderen Anordnung vorzuziehen.

Über die Arbeitsverhältnisse des Zentrifugal-Ventilators selbst sei noch folgendes kurz angegeben¹⁾.

Die Charakteristik eines Ventilators mit vorgekrümmten Schaufeln ist in Fig. 182 dargestellt, und zwar die nutzbare Druck-

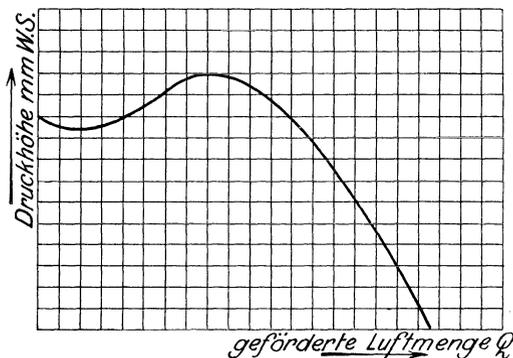


Fig. 182. Allgemeine Charakteristik eines Zentrifugalventilators mit vorgekrümmten Schaufeln.

¹⁾ Näheres siehe Hütte: I. Teil und R. Biel: Die Wirkungsweise der Kreiselpumpen und Ventilatoren. Versuchsergebnisse und Betrachtungen. Z. Ver. deutsch. Ing. 1907, Heft 42 der Mitteilungen über Forschungsarbeiten.

höhe H über der Fördermenge Q bei gleichbleibender Umdrehungszahl. Die Charakteristik ist im normalen Arbeitsbereiche eine ansteigende d. h. eine solche, die ihren Scheitelpunkt nicht bei Leerlauf, sondern erst bei einer gewissen Fördermenge erreicht. Wie die Untersuchungen von R. Biel zeigen, darf man annehmen, daß die meisten Zentrifugalventilatoren eine ansteigende Charakteristik besitzen. Ist diese für eine bestimmte Umdrehungszahl bekannt, so kann man sie nach dem Proportionalitätsgesetze Punkt für Punkt auf eine beliebige andere Drehzahl umrechnen und zwar bei unverändertem Wirkungsgrade. Zeichnet man diese Charakteristiken auf (Fig. 183), so erhält man eine Schar ähnlicher Kurven, aus der man sämtliche zueinander gehörige Umlaufszahlen, Druckhöhen und Fördermengen ablesen kann. H ändert sich bei $n = \text{const.}$ zwangläufig mit Q , und eine Regelung hat demnach nicht nach H , sondern nach Q zu erfolgen.

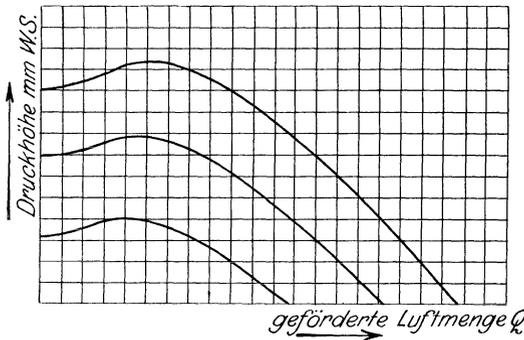


Fig. 183. Charakteristische Kurven eines Zentrifugalventilators bei verschiedenen Drehzahlen.

Die Ventilatoren passen sich in ihrer angesaugten Luftmenge ohne nennenswerten Überschuß der jeweils erforderlichen Luftmenge an, und es ist diese Fähigkeit des Zentrifugalventilators bei der Möglichkeit, die Leistung durch wechselnde Ausströmungsquerschnitte innerhalb weiter Grenzen zu ändern unter Aufrechterhaltung eines nicht sehr wesentlich schwankenden Wirkungsgrades ein besonderer Vorteil. Bei vollständig geschlossener Ausblaseöffnung kann der Ventilator laufen, ohne daß in demselben eine gefährliche Druckstauung auftritt. Ein Sicherheitsventil ist daher nicht notwendig, denn die fortwährend angesaugte Luftmenge kann bei vollständig geschlossenem Ausblas durch den Apparat und zwar an der Saugöffnung wieder zurückströmen. Der Kraftverbrauch sinkt, wenn die Drehzahl konstant ist, mehr oder weniger, je nachdem die Ausblasemündung mehr oder weniger verengt wird.

Das schließlich in Fig. 184 abgebildete vollständige Diagramm eines Hochdruck-Zentrifugalventilators von G. Schiele & Co., Frankfurt a. M.-Bockenheim, veranschaulicht die sehr verschiedenen Leistungsverhältnisse eines solchen bei wechselndem Ausströmungs- bzw. Kanalquerschnitte (Drosselung), aber unveränderlicher Umdrehungszahl, für fünf verschiedene Querschnitte. Bei $\frac{1}{5}$ Öffnung verbraucht der Ventilator etwa 4 PS und bei $\frac{5}{5}$ Öffnung 18 PS an Antriebskraft. Dieser Umstand findet, wie bereits gesagt, in den jeweils gelieferten Luft-

Die Ventilatoren passen sich in ihrer angesaugten Luftmenge ohne nennenswerten Überschuß der jeweils erforderlichen Luftmenge an, und es ist diese Fähigkeit des Zentrifugalventilators bei der Möglichkeit, die Leistung durch wechselnde Ausströmungsquerschnitte innerhalb weiter Grenzen zu ändern unter Aufrechterhaltung eines nicht sehr wesentlich schwankenden Wirkungsgrades ein besonderer Vorteil. Bei vollständig geschlossener Ausblaseöffnung kann der Ventilator laufen, ohne daß in demselben eine gefährliche Druckstauung auftritt. Ein Sicherheitsventil ist daher nicht notwendig, denn die fortwährend angesaugte Luftmenge kann bei vollständig geschlossenem Ausblas durch den Apparat und zwar an der Saugöffnung wieder zurückströmen. Der Kraftverbrauch sinkt, wenn die Drehzahl konstant ist, mehr oder weniger, je nachdem die Ausblasemündung mehr oder weniger verengt wird.

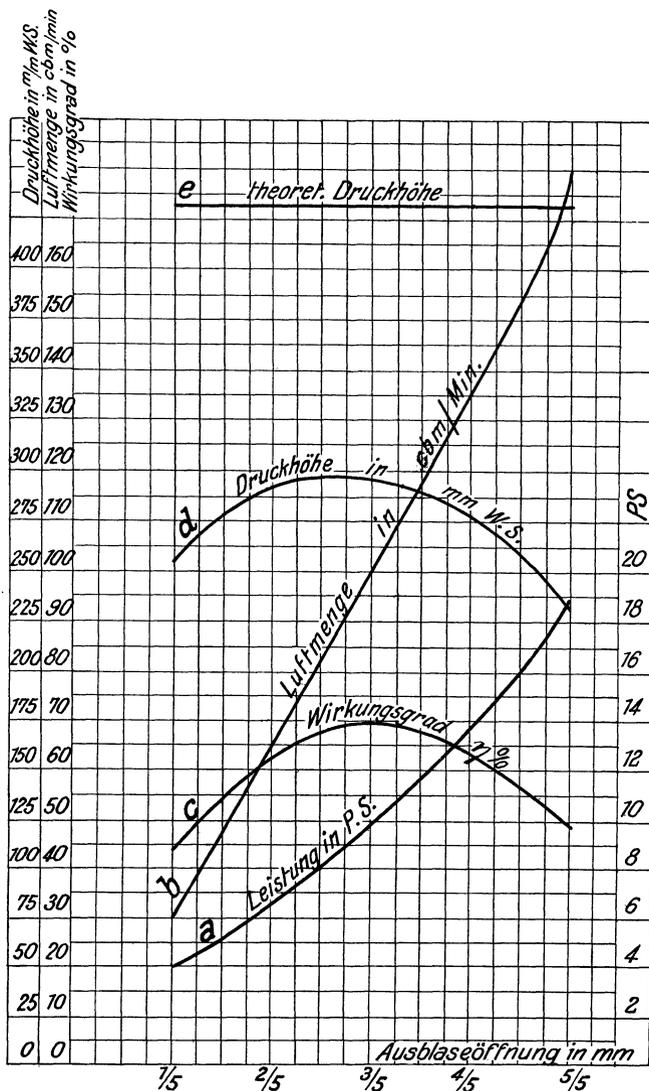


Fig. 184. Diagramm eines Hochdruck-Zentrifugalventilators.

- $n = 1500$ i. d. Min.; Ausblaseöffnung 250 mm Durchmesser; Flügeldurchmesser 750 mm.
 Kurve $a =$ Pferdestärken in PS;
 „ $b =$ gelieferte Luftmenge in cbm/Min.;
 „ $c =$ mechanischer Wirkungsgrad in %;
 „ $d =$ erreichte Druckhöhen in mm WS;
 „ $e =$ theoretische Druckhöhen in mm WS bei $+15^\circ$ Cels. und 750 mm Barometerstand.

mengen seine Erklärung; es beträgt nämlich die geförderte Luftmenge im ersteren Falle, also bei $1/5$ Öffnung, etwa 30 cbm i. d. Minute, im letzteren Falle für die gleiche Zeiteinheit etwa 178 cbm.

Die Kurven der erreichten Druckhöhen und mechanischen Wirkungsgrade weisen im Diagramm nicht einen im selben Sinne sich ändernden Verlauf auf. Die günstigste Druckwirkung und Leistung liegt z. B. bei diesem Ventilator zwischen $\frac{2}{5}$ und $\frac{3}{5}$ Öffnung. Die Druckhöhe von 230 mm WS bei voller Ausblaseöffnung steigt auf etwa 295 mm WS bei $\frac{3}{5}$ und $\frac{2}{5}$ Öffnung an und sinkt bei weiterer Verengung auf $\frac{1}{5}$ Öffnung auf etwa 255 mm WS herab.

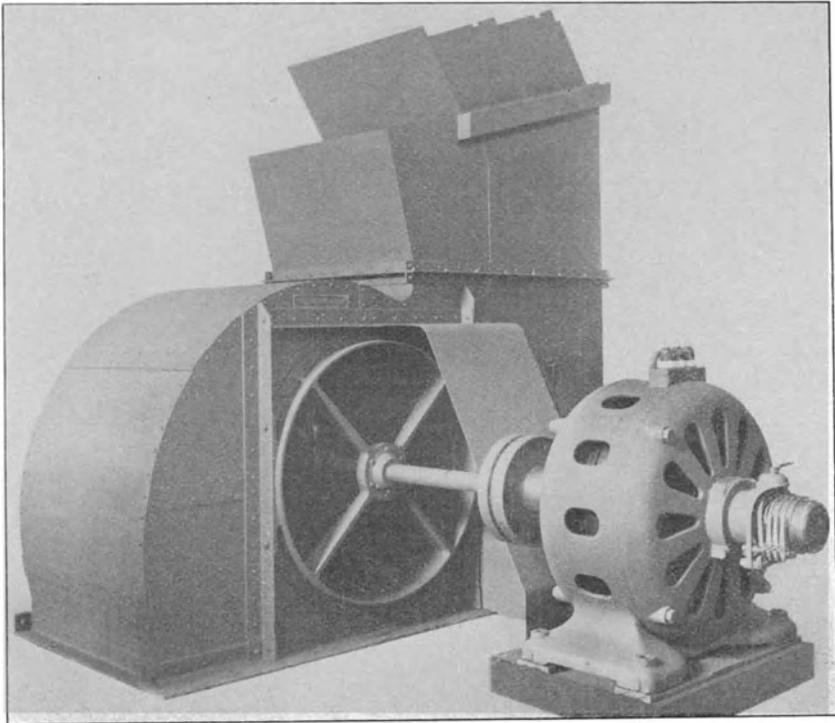


Fig. 185. Zentrifugalventilator mit veränderlicher Ausströmungsöffnung.

Der mechanische Wirkungsgrad beträgt bei mittleren Querschnittsverhältnissen 0,70, ist also außerordentlich günstig. Mit voller Ausblaseöffnung arbeitet dagegen ein Ventilator bei dem hier vorliegenden Falle überhaupt nicht, da der Anschluß der Kanäle einer Querschnittsverminderung gleichkommt.

In Fig. 185 ist ein solcher Ventilator mit veränderlicher Ausblaseöffnung dargestellt, wie er zur Kühlung großer Transformatoren für die Carbidfabrik Hafslund (Norwegen) von den Siemens-Schuckert-Werken ausgeführt worden ist.

Selbstverständlich müssen, wenn mehrere Ventilatoren auf einen gemeinschaftlichen Sammelkanal arbeiten, dieselben

sämtlich mit Abschlußklappen versehen sein, um zu verhüten, daß bei Außerbetriebsetzung eines derselben die von den übrigen geförderte Luft teilweise durch den stillstehenden Ventilator entweicht.

Die Antriebskraft für einen Ventilator ist:

$$L = \frac{Q \cdot H}{75 \cdot \eta_V}.$$

Der Wirkungsgrad η_V schwankt für große Ventilatoren zwischen 0,4 bis 0,7 und für kleine Ventilatoren zwischen 0,3 bis 0,5.

Die Pressung H ergibt sich als Summe aller einzelnen Druckhöhen in mm WS aus den Gl. (118) und (119).

Die Benutzung von Trockentransformatoren und besonderen Ventilatoren zu ihrer Kühlung ist in Deutschland weniger, in Amerika dagegen häufig anzutreffen. So sind z. B. die Transformatorstationen der New York City Elektrizitätswerke, deren Leistung mehr als 400 000 KW umfassen, mit den in Fig. 178 und 179 abgebildeten Trockentransformatoren ausgerüstet. Sie wird dann zur Notwendigkeit, wenn Kühlwasser in genügenden Mengen und in geeigneter Beschaffenheit zur Kühlung der nunmehr zu behandelnden Öltransformatoren bei größeren Einzelleistungen nicht oder nur unzuverlässig zur Verfügung steht.

42. Die Öltransformatoren im allgemeinen und das Öl.

Handelt es sich um höhere Spannungen und größere Leistungen, dann können Trockentransformatoren aus konstruktiven Gründen und besonders des hohen Preises wegen nicht mehr gebaut werden, sondern man muß zu den unter b) auf S. 218 genannten Öltransformatoren übergehen. Bei dieser Bauform wird der ganze fertig gewickelte Transformator in einen aus Eisenblechen zusammengenieteten oder besser geschweißten Kessel gestellt, der vollständig mit Öl gefüllt ist. Die Gründe für diese Ausführungen liegen darin, daß mit steigender Spannung die Isolierung der Wicklungen und bei größeren Leistungen die wirtschaftliche Dimensionierung bzw. die damit zusammenhängende Wärmebeseitigung auf natürliche Weise und mit der notwendigen Schnelligkeit immer schwieriger wird. Da nun Öl — naturgemäß aber nur solches besonderer Beschaffenheit — nicht nur eine sehr hohe Isolations-, sondern auch eine sehr gute und bessere Wärmeaufnahmefähigkeit als die Luft besitzt, so begegnet man den genannten Schwierigkeiten dadurch, daß man den Transformator in ein Ölbad stellt. In Fig. 186 und 194 sind solche Transformatoren mit den zugehörigen Ölkesseln dargestellt, wie sie von der A. E. G. geliefert werden. Man erkennt aus diesen Figuren auch die Schichtung der Hoch- und Niederspannungsspulen und die Herstellung der einzelnen Verbindungen. Transformatoren in dieser Form sind heute für die höchsten Spannungen und größten Leistungen nach jeder Richtung betriebssicher zu bauen.

Zunächst ist es, wie schon angedeutet, Hauptbedingung, daß für das Öl nicht irgendeine beliebige Sorte verwendet werden darf, sondern daß dasselbe ganz bestimmten Forderungen genügen muß. Als solche sind zu nennen: sehr hoher Entflammungspunkt, damit eine Entzündung auch bei den stärksten vorkommenden Durchschlägen zwischen den Wicklungen oder zwischen Wicklungen und Eisen nicht eintreten kann; säurefrei, damit das Kupfer, die Isolation und auch der Blechkessel nicht angegriffen werden; Düninflüssigkeit, damit es sich leicht durch die Luftschlitze zwischen den Wicklungen bewegen kann, und schließlich Beständigkeit in diesen Eigenschaften auch bei jahrelangem Betriebe und trotz der mit der Belastung fast fortwährend wechselnden Temperatur.

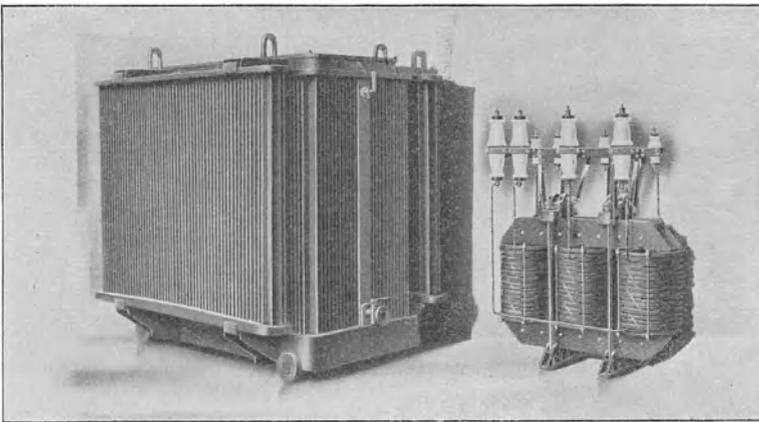


Fig. 186. Drehstromtransformator mit fahrbarem Ölkessel.

Die bessere Wärmeabführung mit Hilfe des den Transformator umspülenden Öles wird dadurch hervorgerufen, daß dasselbe bei eingeschaltetem Transformator in Bewegung kommt, und zwar dauernd in einen Kreislauf gebracht wird. Infolge des Temperaturgefälles zwischen dem erwärmten Transformator und den kalten Gefäßwandungen steigt das Öl an ersterem in die Höhe und sinkt an letzteren langsam wieder herab. Dabei wird die vom Transformator erzeugte Wärme vom Öle aufgenommen, an die Gefäßwandungen abgegeben und von diesen an die Umgebung ausgestrahlt. Genügen glatte Kesselwände für die Wärmeabgabe nicht, dann versieht man zur Vergrößerung der Ausstrahlungsfläche die Außen- oder Innenseite des Blechgefäßes häufig noch mit besonderen Kühlrippen (Fig. 186), oder man fertigt den Kessel auch aus Wellblech an.

Infolge dieser Ölisolierung und Ölkühlung kann der Transformator, wie bereits erwähnt, in seinen Abmessungen gedrängter gebaut werden als ein Trockentransformator gleicher Leistung und für gleiche Spannungen. Ein weiterer ganz bedeutender

Vorzug dieser Ausführung liegt aber ferner noch darin, daß in elektrischer Beziehung neben einem besseren Wirkungsgrade ein derart gekühlter Transformator wesentlich unempfindlicher gegen Überlastungen ist, als der Trockentransformator, und zwar weil das Öl eine große spezifische Wärme besitzt und sehr bedeutende Wärmemengen aufnehmen kann, ohne daß seine Temperatur erheblich steigt. Infolgedessen steigt auch die Temperatur des Transformators bei Überlastungen nur verhältnismäßig langsam. Die Erwärmungskurve eines Öltransformators ist in Fig. 187 wiedergegeben, und man ersieht aus dem Verlaufe derselben, in welcher Zeit bei Vollbelastung die Temperatur bis auf den Wert von 46° Cels. Übertemperatur ansteigt. Die vom Öle bedeckten Wicklungen sind schließlich gegen die Oxydationswirkungen der Luft geschützt und können nicht brüchig werden, was beim Trockentransformator als ein besonderer Übelstand bezeichnet wurde.

Nachteile besitzt der Öltransformator aber auch, und zwar liegen dieselben darin, daß die Raumbeanspruchung insgesamt, also einschließlich Kessel, recht bedeutend ist. Ferner sind Untersuchungen bzw. Reparaturen des Transformators selbst umständlicher und zeitraubender als beim Trockentransformator, weil für die Vornahme solcher Arbeiten das Öl

jedesmal abgelassen, oder der Transformator aus dem Kessel herausgehoben werden muß. Vor der erneuten Inbetriebsetzung ist dann stets der ganze Transformator mit Ölfüllung entweder durch Erwärmung der Wicklungen im Kurzschluß oder unter Zuhilfenahme besonderer Vorrichtungen so lange auf eine derart hohe Temperatur zu bringen, bis das Öl die aus der Luft aufgesaugte Feuchtigkeit vollständig wieder abgegeben hat. Man nennt diesen Vorgang das Auskochen des Transformators. Ist das Öl nicht vollständig wasserfrei, so wird auch schon durch den geringsten Wassergehalt die Isolierfähigkeit und die Durchschlagsfestigkeit desselben außerordentlich stark vermindert, wie das die Werte der Tabelle XV zeigen. Ferner kann durch

das Wasser im Öle nicht nur die Isolation der Wicklungen angegriffen und zerstört werden, sondern es besteht auch die Gefahr, daß sich Gase innerhalb des Ölkessels bilden, die unter Umständen zur Explosion

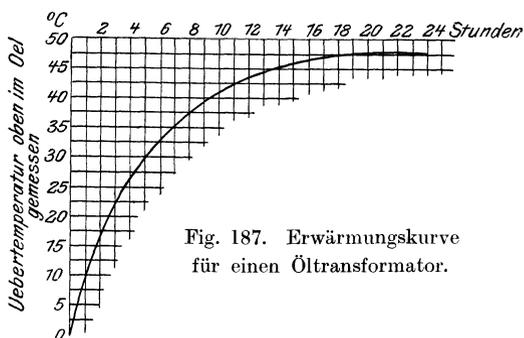


Fig. 187. Erwärmungskurve für einen Öltransformator.

Tabelle XV.

Wassergehalt des Öles in Prozenten	Durchschlagsfestigkeit in Volt
0	10000
0,01	7000
0,02	6000
0,04	5200
0,06	5000
0,10	4900
0,12	4800
0,16	4700
0,20	4000

führen können. Letzteres läßt sich natürlich dadurch vermeiden, daß man den Kessel mit einem Sicherheitsventile versehen; dieses hat aber andererseits den Nachteil, daß bei nicht vollständig dicht schließendem Ventilkegel Luft und damit Feuchtigkeit in den Kessel eindringen kann. Eine noch weiter ungünstige Erscheinung, die gegen die Verwendung von Sicherheitsventilen spricht, ist das sog. „Atmen“ des Transformators. Geht die Belastung zurück, so kühlt sich die über dem Ölspiegel befindliche Luft im Kessel ab, zieht sich infolgedessen zusammen, und Außenluft tritt durch Fugen u. dgl. ein. Steigt die Belastung wieder, so muß erwärmte Luft austreten, und dieses Spiel wiederholt sich fortgesetzt bei jeder Belastungsänderung. Somit ist es notwendig, das Sicherheitsventil besonders auszubilden, und man baut daher über demselben ein Gefäß auf den Deckel des Kessels, das mit Chlorcalcium gefüllt wird. Dieses Mineral saugt die Feuchtigkeit der Luft vollständig

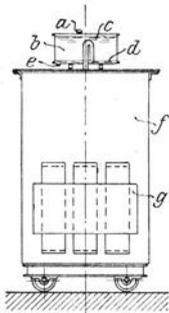


Fig. 188.

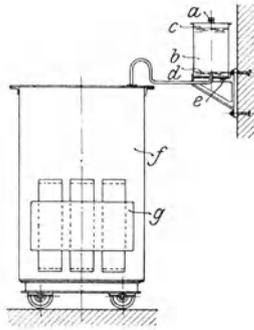


Fig. 189.

Öltransformator mit Ölkonservator
für kleine Leistungen für große Leistungen.

auf. Selbstverständlich ist es aber erforderlich, dasselbe von Zeit zu Zeit zu erneuern, um eine sichere Wirkung zu gewährleisten.

Die neueste Konstruktion der Siemens-Schuckert-Werke zur Vermeidung dieses Übelstandes beruht darauf, die Außenluft mit dem Öle überhaupt nicht in Berührung treten zu lassen, und zwar wird das dadurch erreicht, daß der Ölbehälter hermetisch gegen die

Außenluft abgeschlossen wird. Es wird ein zweiter, getrennt vom Transformator-kessel aufgestellter Kasten, das Ölausdehnungsgefäß oder der Konservator, benutzt, der mit ersterem durch ein U-förmig gebogenes Rohr nach Fig. 188 für kleinere und nach Fig. 189 für große Leistungen verbunden ist. Transformator-kessel und Kasten werden dann so weit mit Öl gefüllt, daß selbst beim kalten Transformator in der Rohrverbindung noch Öl steht. Da das heiße Öl des Transformator-kessels infolge der Zwischenschaltung des U-förmigen Rohres, abgesehen von Änderungen des Volumens, nicht nach dem Konservator hinübertreten kann, so bleibt das Öl in letzterem kalt und bildet somit den Abschluß des heißen Öles gegen die Luft. Das kalte Öl des Konservators wird von der Luft, wie durch ausgedehnte Versuche festgestellt worden ist, praktisch nicht angegriffen. Ändert sich das Volumen des Öles infolge stärkerer Erwärmung, dann tritt allerdings heißes Öl in den Konservator, wird dort aber, da die Ausdehnung nur sehr langsam vor sich geht, infolge des Durchganges durch das Knierohr bereits fast vollständig abgekühlt ankommen.

Der Konservator der Siemens-Schuckert-Werke bietet für den Transformator noch den weiteren sehr bedeutenden Vorteil, daß Kondenswasserbildungen innerhalb des Transformatorbessels, die dadurch hervorgerufen werden, daß infolge der schwankenden Erwärmung und der damit verbundenen Änderung des Ölvolumens kalte Luft in den Transformatorbessel gesaugt und dort an den warmen Blechwänden bzw. dem Deckel niedergeschlagen wird, nicht stattfinden können. Durch die Verbindung zwischen Rohr und Konservator wird erreicht, daß Wasser, welches sich im Konservator etwa ansammeln sollte, nicht in das Verbindungsrohr gelangen kann, bevor der Wasserstand im Konservator eine bestimmte Höhe erreicht hat. Eine Ablassschraube am Boden des Konservators ermöglicht, jederzeit die untere Flüssigkeitsschicht zu prüfen. Auch die Aufnahme von Sauerstoff aus der Luft durch das erwärmte Öl, die ebenfalls den guten Zustand desselben und damit die Betriebssicherheit des Transformators stark vermindert, wird durch diese Vorrichtung vermieden.

Handelt es sich um höhere Leistungen und Spannungen, oder müssen die Transformatoren unter ungünstigen Raum- und Temperaturverhältnissen arbeiten wie z. B. in Bergwerksanlagen unter Tage, im heißen Klima u. dgl., dann ist es oft nicht mehr möglich, den Wärmeaustausch an den Wandungen des Ölkessels lebhaft genug zu gestalten, um die erforderliche Abkühlung zu erzielen. Eine Vergrößerung der Kesselflächen ist in solchen Fällen mit Rücksicht auf die Herstellungskosten und den Raumbedarf ebenfalls nicht durchführbar abgesehen davon, daß hierdurch in der Regel nicht mehr viel erreicht werden kann. Man muß dann vielmehr wiederum zu einer künstlichen Kühlung übergehen.

43. Die künstliche Kühlung der Öltransformatoren.

Für diese ist eine ganze Reihe von Formen im Gebrauch, deren Benutzung sich nach den jeweilig vorliegenden örtlichen Verhältnissen richtet. Es kommt in Frage:

- a) die besondere Belüftung des Transformatorraumes durch Maueröffnungen ohne oder mit Ventilatoren;
- b) die Kühlung des Öles durch Berieselung der Kesselwände;
- c) die Kühlung des Öles durch wasserdurchflossene Kühlschlangen im Kessel oder durch Zirkulation des Öles in Kühlschlangen außerhalb des Kessels.

a) Die besondere Belüftung des Transformatorraumes entspricht im allgemeinen der bei den Trockenformatoren bereits eingehend behandelten Ausführung. Unzulässig hohe Raumtemperaturen wirken weniger auf das Material, als auf das Öl ungünstig ein, denn dasselbe hat die Eigenschaft, einen schlammigen Niederschlag abzusetzen, sobald seine Temperatur während längerer Zeit höhere als die zugelassenen Werte aufweist. Wenn diese Niederschläge auch weniger die Isolierfähigkeit beeinträchtigen, so vermindert die Verdickung des Öles und

infolgedessen die schlechtere Zirkulation doch auf die Dauer die Betriebssicherheit des Transformators.

Wird verlangt, daß die Ventilatoren jederzeit beaufsichtigt und untersucht werden können, ohne den eigentlichen Transformatorraum dazu immer betreten zu müssen, dann ordnet man dieselben in der in Fig. 190¹⁾ zur Darstellung gebrachten Weise an. Hier sind die Transformatoren aus Gründen, die später auf S. 304 besonders besprochen werden, in allseitig geschlossene Zellen aus feuerfestem Material eingebaut, und die

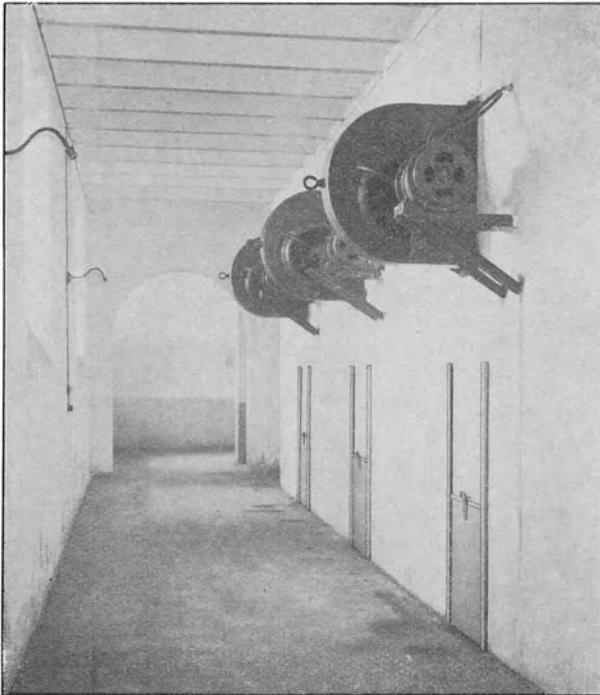


Fig. 190. Belüftung von Transformatorzellen durch außerhalb derselben angebrachte Niederdruck-Zentrifugalventilatoren (120 cbm/Min. 2,5 PS).

Ventilatoren (in diesem Falle der größeren Pressung wegen Niederdruck-Zentrifugalventilatoren) außen im Bedienungsgange an den Zellen angebracht. Auf die richtige Luftführung ist dabei nach früher Gesagtem besonders zu achten. Man kann, um aus den vielen Ausführungsmöglichkeiten eine besonders beachtenswerte herauszugreifen, z. B. so verfahren, daß man jede Transformatorzelle durch einen unmittelbar ins Freie mündenden allseitig geschlossenen, feuerfesten Kanal mit der Außenluft in Verbindung bringt, und das Zelleninnere durch

¹⁾ Von der Maschinenfabrik Oerlikon für die Kraftübertragung Castelnovo-Valdarno gebaut.

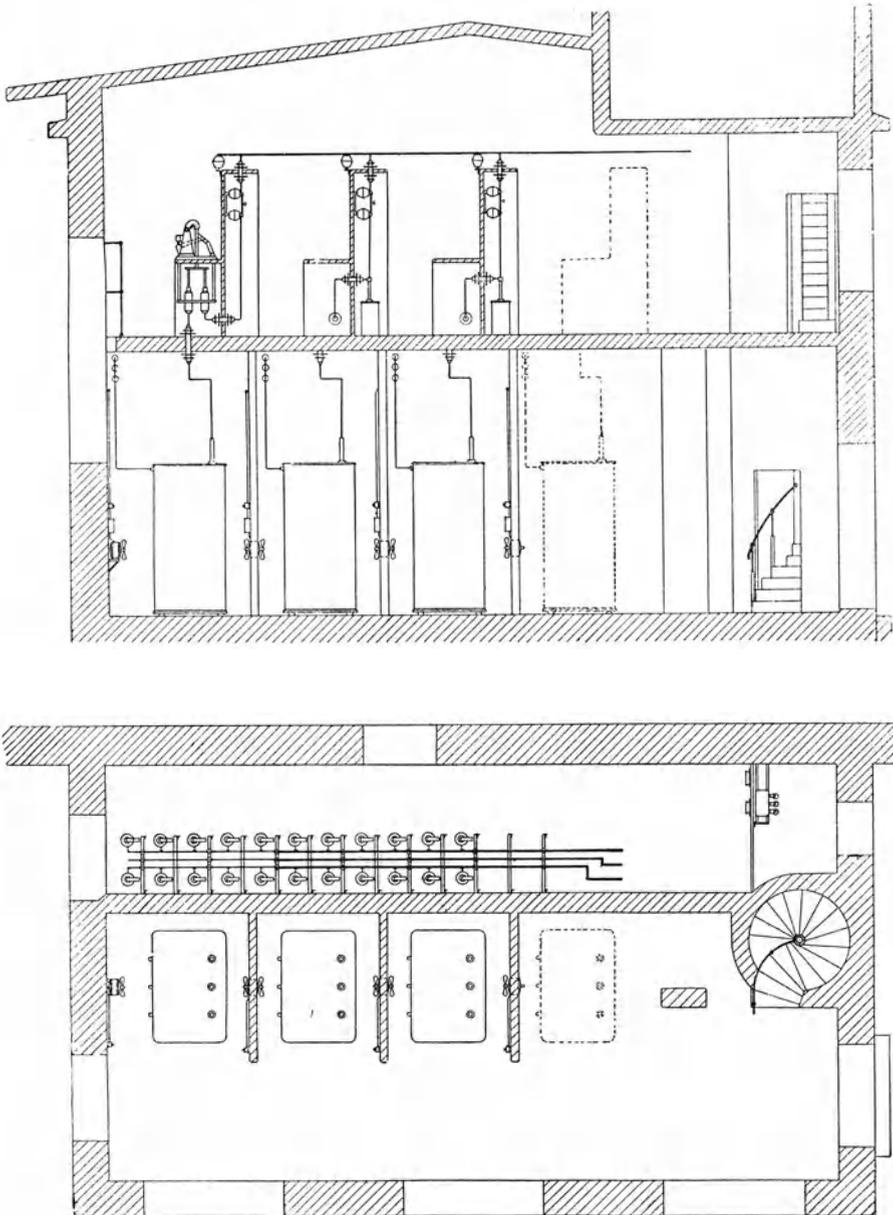


Fig. 191. Belüftung von Öltransformatoren durch Schraubenventilatoren in jeder Transformatorzelle.

einen Ventilator belüftet. Auf die Weise saugt der letztere die erwärmte Luft ab. Dabei empfiehlt es sich dann, die Frischluftkanäle mit etwas Gefälle nach der Straßenseite zu anzulegen, um sie gleichzeitig in Gefahrenfällen für einen etwa notwendig werdenden Abfluß von Öl aus dem Transformator-kessel benutzen zu können. Ölbrände sind so schnell unterdrückbar oder zum mindesten sicher zu lokalisieren¹⁾.

Eine andere von der Maschinenfabrik Örlikon²⁾ angewendete Belüftungsform, die dann am Platze ist, wenn der Transformatorraum nicht ständig unter Aufsicht steht, ist die in Fig. 191 abgebildete. Es werden zwischen die einzelnen Transformatoren kleine Schraubenventilatoren eingebaut, die mit jedem Transformator derart zusammengeschaltet sind, daß sie von selbst anlaufen, wenn derselbe auf Spannung kommt. Die die Gefäßwände umgebende Luft wird durch den Ventilator dauernd in mäßige Bewegung versetzt und infolgedessen zerstreut. Die Zellenwände beeinträchtigen, wie Versuche von Örlikon gezeigt haben, die freie Luftbewegung um den Transformator doch recht bedeutend, und es kann daher die durch den Ventilator erzwungene Luftbewegung innerhalb des Zellenraumes nur empfohlen werden. Als Anwendungsgebiete sind hierfür die Strecken-Transformatorstationen von Überlandzentralen besonders zu nennen, die auch bei größeren Leistungen in der Regel ohne ständige Aufsicht arbeiten müssen.

Die Ventilatoren haben angebaute Drehstrom-Kurzschlußanker-motoren und je einen Schalter, der geschlossen ist, und nur dazu dient, den Ventilator im Bedarfsfalle, auch wenn der Transformator im Betriebe ist, abschalten zu können. Natürlich müssen die Transformatoren mit Niederspannung von solcher Höhe arbeiten, die zum Betriebe der Ventilator-motoren noch brauchbar ist, also im Maximum 500 Volt; anderenfalls sind kleine Reduktionstransformatoren zu benutzen.

b) Die Kühlung des Öles durch Berieselung der Kesselwände.

Die Kühlungsmethoden nach b) und c) setzen zunächst voraus, daß Wasser in genügender Menge und vor allen Dingen auch in brauchbarer Beschaffenheit zur Verfügung steht. Ist das nicht der Fall, dann kann entweder nur die Form a) oder Trockentransformatoren gewählt werden gegebenenfalls unter Herabsetzung der Leistung der einzelnen Typen oder durch eine Unterteilung der Energie auf eine größere Zahl kleinerer Transformatoren.

Das zur Kühlung benutzte Wasser muß rein sein und darf keine Kesselstein bildenden Bestandteile enthalten, denn anderenfalls sind Betriebsstörungen durch Defekte an den Transformatoren nicht zu vermeiden, und zwar aus dem Grunde, weil mit der Zeit eine Verengung

¹⁾ Siehe E. K. B. 1910, Heft 21, S. 447 und El. Railway Journ. 1910, S. 770: Das neue Dampfturbinen-Kraftwerk der Cincinnati Traction Co. Die Transformatoren der Umformerwerke sind auf diese Weise belüftet, und zwar handelt es sich um je 2 Einankerumformer mit einer Einzelleistung von 1500 KW mit je 3 je 500 KW Wechselstrom-Öltransformatoren 6600 Volt, Freq. 25.

²⁾ Siehe Schweiz. E. T. Z. 1909, Heft 25. Anlage für die Seidenspinnerei Kriens; 4 Drehstromtransformatoren von je 50 KVA, 24000/500 Volt.

der für die Wasserzirkulation vorgesehenen Einrichtungen eintritt. In einem solchen Falle kann dann die zur Abführung der Wärme notwendige Wassermenge nicht mehr gefördert werden, und die Isolation der Wicklungen des Transformators leidet, bzw. das Öl wird dick und läuft nicht mehr genügend um. In solchen Anlagen, in denen gutes Wasser nicht in ausreichender Menge ständig zur Verfügung steht, kann man sich aber auch dadurch helfen, daß das verwendete Wasser immer aufs neue benutzt und unter Umständen mit Hilfe von Gradierwerken gekühlt wird.

Sowohl für die Wasserkühlung, als auch die Luftkühlung der Transformatoren sind ferner stets Meßapparate zur einwandfreien Beaufsichtigung einzubauen. Als solche werden in der Regel nur Thermometer mit Maximumkontakt benutzt, die beim Überschreiten der höchstzulässigen Temperatur des Öles eine Signallampe aufleuchten oder ein Läutewerk ertönen lassen. Neben diesen Apparaten sind aber auch Signalvorrichtungen in der Wasserzu- und -ablaufanlage empfehlenswert, wie die Fig. 195 solche aufweist. Die geringen Ausgaben für die Beschaffung und Unterhaltung derartiger Prüfvorrichtungen werden sich durch den weit sicheren Betrieb bald bezahlt machen. Neben diesen Alarminrichtungen sind Thermometer und Ölstandszeiger an den Transformator-kesseln, sowie Manometer in den Wasseranlagen nicht zu vergessen.

Die Berieselung der Kesselwände nun kann auf zweierlei Arten vorgenommen werden. In der Fig. 192 ist ein Rohr mit vielen kleinen Löchern um die Kesselwände gelegt, das an die Wasserleitung angeschlossen wird. Diese Form setzt zunächst voraus, daß Wasser in großer Menge und ohne erhebliche Kosten beschafft werden kann. Sind Reserverohre vorhanden, dann kann auch Wasser nicht vollständig einwandfreier Beschaffenheit verwendet werden, sofern dasselbe natürlich rein von Sand und Schlamm ist. Jede Transformatorrohrleitung muß selbstverständlich ein Abschlußventil erhalten. Der Druck, mit dem das Wasser zur Verfügung stehen muß, ist vom Lieferanten des Transformators besonders anzugeben, damit die gewünschte Kühlwirkung auch stets vollständig gewährleistet ist.

Die Beaufsichtigung der Kühleinrichtung hat sich zu erstrecken auf die Spritzrohre und die Beschaffenheit der Kesselwandungen, die von Schlammansatz öfters abzubürsten sind, um die Wärmeabführung nicht zu beeinträchtigen.

An Stelle der Berieselung der äußeren Kesselwände kann auch eine andere Form gewählt werden, bei der der obere Teil des Kessels

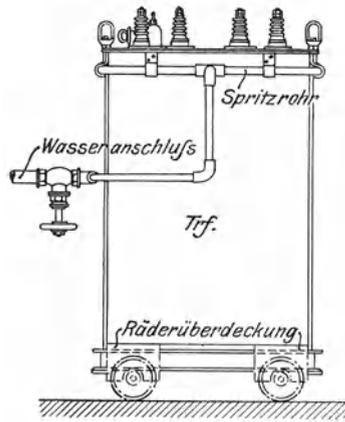


Fig. 192. Kühlung eines Öltransformators durch Berieselung der Kesselwände.

doppelwandig und durch Querrippen in einzelne Kammern geteilt ausgeführt ist. Die so gebildeten Schotten werden kommunizierend miteinander verbunden und zwar derart, daß der in eine Kammer eingeleitete Wasserstrom den ganzen Hohlraum um den Transformator gleichmäßig durchspült. Die Fig. 193 zeigt den Oberteil eines Transformatorgehäuses mit dieser Wasserkühlung der 2750 KVA Drehstromtransformatoren (10500/46000 Volt, Freq. 42) in der von Oerlikon gebauten Kraftübertragungsanlage Caffaro-Brescia. Besonders ist auf die an der Innenseite der Kesselwandungen angebrachten

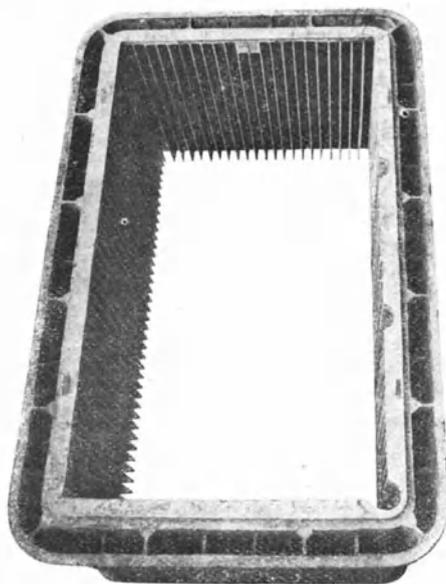


Fig. 193. Oberteil eines Öltransformatorkessels mit Kanälen für Wasserkühlung.

Kühlrippen aufmerksam zu machen, durch die eine wesentliche Vergrößerung der Kühlflächen erreicht wird.

Auch diese Kühlmethode hat reichliche und billig zu beschaffende Wassermengen zur Voraussetzung. Hier muß indessen das Wasser vollständig rein sein, denn sonst ist eine Verschmutzung der Kammern und Durchflußöffnungen selbst dann, wenn sie reichliche Querschnitte haben, schon in verhältnismäßig kurzer Zeit zu befürchten. Dieser Übelstand hat die Maschinenfabrik Oerlikon veranlaßt, eine solche Berieselungsform heute nicht mehr zu benutzen. Die Instandhaltung des Ölkesseloberteiles ist recht schwierig, und bei unzuverlässigem Bedienungspersonal

können Betriebsstörungen infolge schlecht gekühlter Transformatoren leichter eintreten.

c) Die unmittelbare Kühlung des Öles. Infolge der großen Wassermenge, der unständlichen Beaufsichtigung und der Instandhaltung der Kühlvorrichtungen unter b) ist man schon bald dazu übergegangen, das Öl durch besondere wasserdurchflossene Kühlschlangen, die naturgemäß ebenfalls im oberen Kesselteile und der Kondenswasserbildung wegen dauernd vollständig im Öle eingebettet liegen müssen, zu kühlen. Die Fig. 194 zeigt einen derart gekühlten Transformator der A. E. G. aus dem Kessel herausgenommen, und in Fig. 195 ist der Schnitt durch einen ähnlichen Transformator von Oerlikon abgebildet. Die Fig. 195 soll noch etwas eingehender betrachtet werden.

Der Ölkessel ist aus Kesselblech gefertigt und unten mit einem gußeisernen, des bequemeren Transportes wegen mit Laufrollen versehenen

Rahmen vernietet. Der obere Teil des Kessels ist verbreitert, und hier liegt die Kühlschlange *C* für den Wasserumlauf. Während in Fig. 194 die Kühlschlange beim Herausnehmen des Transformators aus dem Kessel jedesmal ebenfalls mit herausgezogen werden muß, ist das bei der Ausführung nach Fig. 195 nicht erforderlich. Beide Anordnungen haben ihre Vor- und Nachteile, und es ist mehr Geschmackssache, welcher von beiden man den Vorzug geben will. Während bei der gleichzeitigen Herausnahme von Transformator und Kühlschlange auch eine Untersuchung des Kesselinneren und der Rohrleitung gewissermaßen

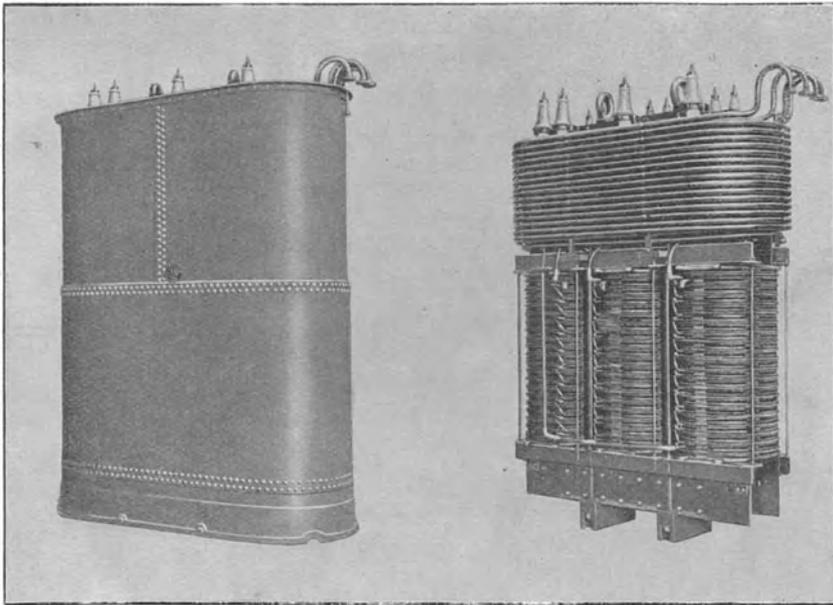


Fig. 194. Drehstrom-Öltransformator (aus dem Ölkessel herausgenommen) mit aufgebauten Kühlschlangen für die Wasserkühlung:

selbstverständlich durchgeführt wird, hat das Verbleiben der Rohre im Kessel den Vorzug, schnell einen anderen Transformator ohne umständliche Montage der Rohranlage einbauen zu können. Allerdings wird bei dieser Gestaltung des Kessels die Raumbeanspruchung größer, doch spielt das keine bedeutende Rolle.

Der Zutritt des Kühlwassers erfolgt nun in Fig. 195 von unten bei *F*, wodurch naturgemäß eine gute Kühlung des Transformators erreicht wird. Auch die Kühlschlange befindet sich infolgedessen vollständig unter Öl, worauf bereits aufmerksam gemacht worden ist. Ferner ist dieselbe aus nahtlosem Eisenrohr hergestellt, und somit ein Wasseraustritt aus Leckstellen, ein Platzen des Rohres an der Naht u. dgl. nicht zu befürchten. Es ist aus diesen Gründen also ganz

allgemein jede Rohrverbindung im Inneren des Ölkessels zu vermeiden.

Zur Entleerung der Kühlschlange befindet sich in der Zuleitung bei *G* ein Dreiwegehahn. Ferner ist am Grunde des Kessels ein Ölablaßhahn *N* angebracht, um bequem auch das Öl ablassen oder die unterste Ölschicht auf Schlammabsatz untersuchen zu können.

Zur Prüfung der Öltemperatur ist ein Signalapparat *L* vorhanden, der sofort alarmiert, einmal durch die Vorrichtung *J*, wenn der Wasserzufluß unterbrochen wird, oder durch den Temperaturzeiger *K*, wenn

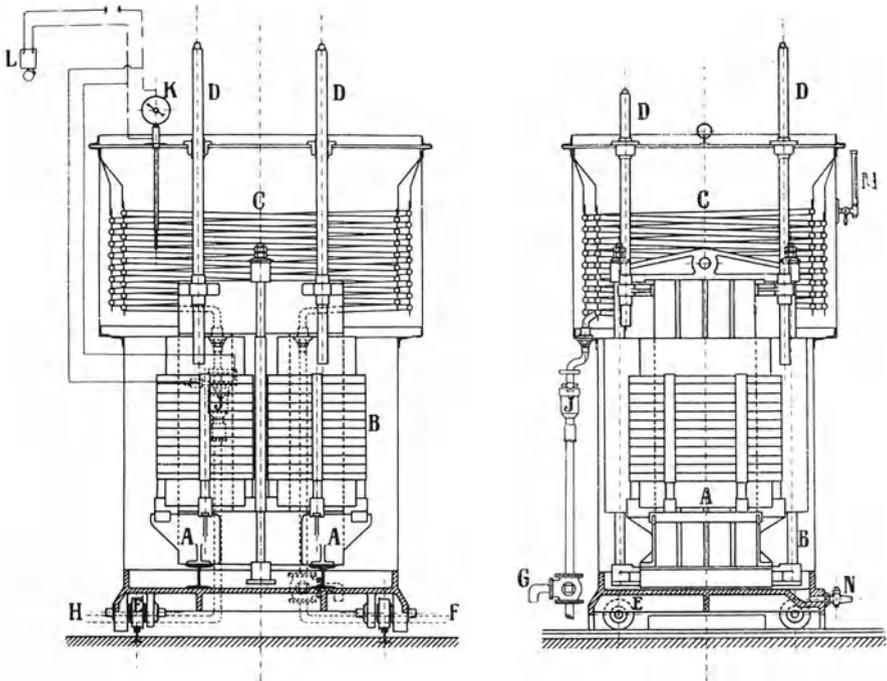


Fig. 195. Schnitte durch einen Öltransformator (im Kessel) mit Ölkühlung durch wasserdurchflossene Kühlschlangen.

aus einem anderen Grunde das Öl die vorgeschriebene bzw. zulässige Höchsttemperatur überschreitet. Bei *M* ist außerdem noch ein Ölstandszeiger angebaut.

In der Fig. 195 ist ferner mit *A* das Joch des als Kerntype ausgebildeten Transformators, mit *B* der Unterkessel und mit *D* die Ausführungsklemmen bezeichnet.

Handelt es sich um eine große Transformatoranlage mit dieser Kühlmethode, so empfiehlt es sich, die Rohranlage für den Wasserzu- und -abfluß im Bedienungsgange anzuordnen, wenn derselbe von dem Transformatorraum vollständig abgeschlossen ist. Dadurch sind die Rohre nicht nur jederzeit und ohne mit der Hochspannungsanlage

irgendwie in Berührung zu kommen, einer bequemen Beaufsichtigung zugänglich, sondern man hat ferner auch die Sicherheit, daß bei einem Rohrbruche oder Ventildefekte das ausströmende Wasser nicht in den

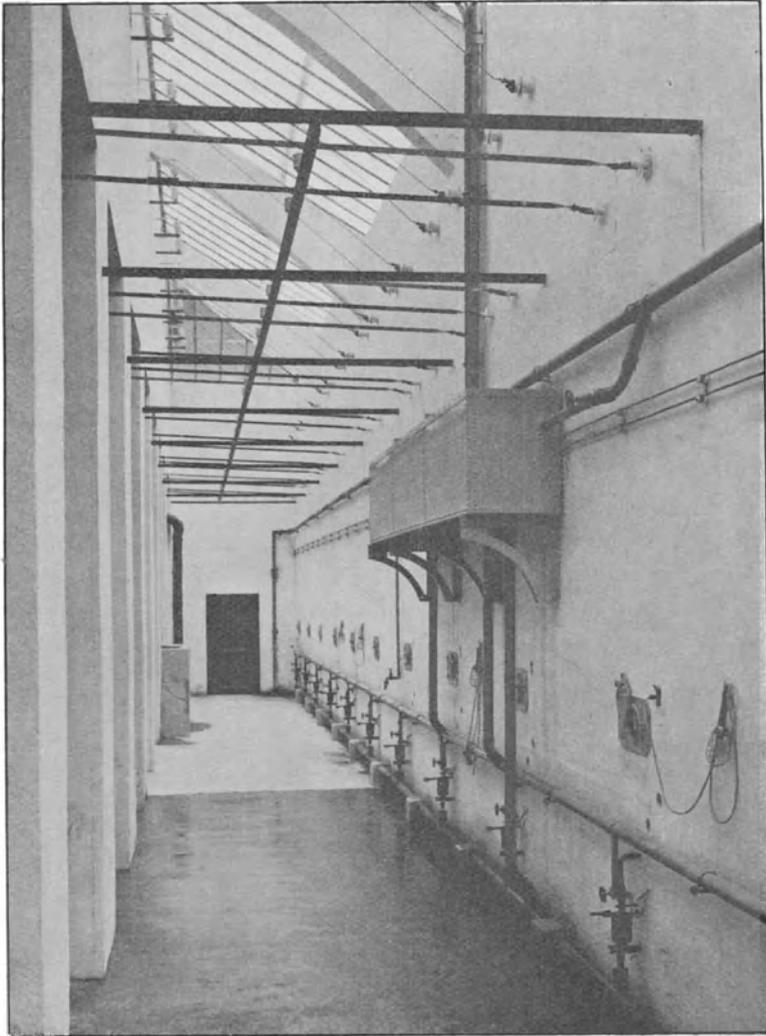


Fig. 196. Bedienungsgang zwischen Schaltanlage und Transformatorenraum mit Rohrleitungen und Signalapparaten für die Wasserkühlung der Transformatoren.

Transformatorenraum gelangen kann. Mit Hilfe von Schaulöchern, die sicher abschließbar und so groß zu wählen sind, daß durch sie z. B. eine elektrische Handlampe ohne Mühe in die Transformatorzellen

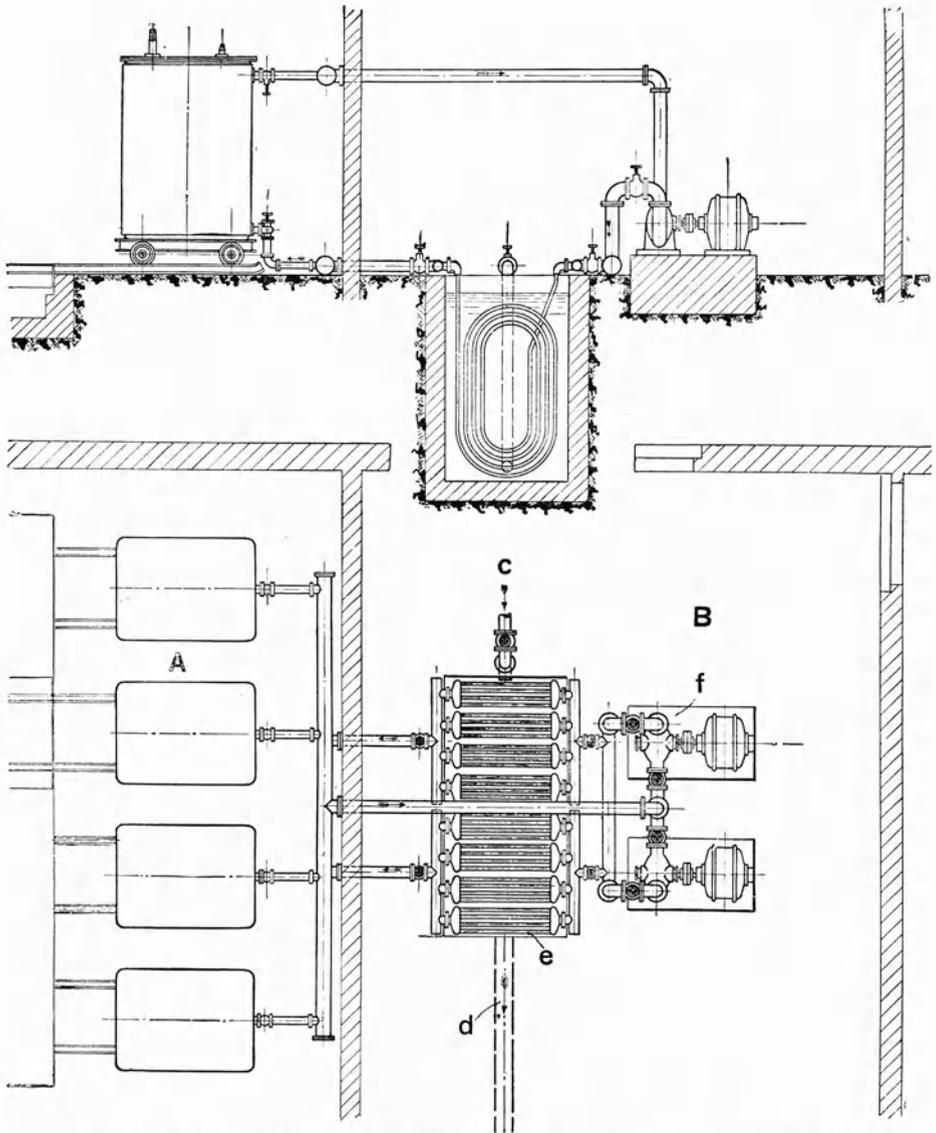


Fig. 197. Kühlung des Öles außerhalb der Transformatoren in wasserumspülten Kühltanglen.

eingeführt werden kann, um auch diese stets vom Bedienungsgange prüfen zu können, wird die Betriebssicherheit der Gesamtanlage bedeutend erhöht. In diesem Bedienungsgange sind dann natürlich auch alle Sicherheits- und Prüfapparate anzuordnen, die Rohrleitungen für den Ölabbau zu verlegen u. dgl. Ist die Wasserzuführung nicht dauernd

mit gleichbleibendem Druck zu ermöglichen, so empfiehlt es sich ferner, in die Hauptzuführungsrohrleitung einen entsprechend groß zu bemessenden Wasserkessel einzuschalten.

Die Fig. 196 zeigt eine derartige Wasserleitungsanlage, wie sie von Oerlikon für die Kraftzentrale Obermatt des Elektrizitätswerkes Luzern-Engelberg ausgeführt worden ist. Die Station umfaßt: 10 Einphasentransformatoren von je 700 KVA, 6000/27000 Volt, Freq. 50. Der projektierende Ingenieur wird aus dieser Abbildung unschwer erkennen können, in welcher Form derartige Anlagen einzurichten sind, und es können daher wohl weitere Erläuterungen unterbleiben.

Ist reines Kühlwasser einerseits nicht dauernd in genügenden Mengen oder andererseits nur mit hohen Kosten zu beschaffen, dann muß man dazu übergehen, das Öl außerhalb des Kessels zu kühlen, weil die Benutzung von wasserdurchflossenen Kühlschlangen mit Rücksicht auf Verstopfungen, Verschlammung usw. zu unsicher ist. Für diese Kühlmethode haben die Siemens-Schuckert-Werke eine besondere Anlage durchgebildet, die in Fig. 197 wiedergegeben ist. Das Öl wird mittels einer kleinen, elektrisch angetriebenen Pumpe *f* dauernd durch den Transformator hindurchgetrieben und passiert außerhalb des Ölkessels eine Rohrschlinge, die in einem Wasserkasten liegt. In Fig. 197 bezeichnet *A* den Transformatorraum und *B* den Pumpenraum mit Wasserbehälter. Beide Räume sind aus den bereits oben erwähnten Gründen wiederum vollständig voneinander getrennt anzulegen, wenn die Platzverhältnisse es nur irgend zulassen. Bei *c* tritt fließendes Wasser in das Bassin ein und verläßt dasselbe bei *d*. Das Wasser umspült also fortgesetzt die vom Öle durchflossenen Kühlschlangen *e* und bringt dadurch das Öl auf niedrige Temperatur.

Diese Kühllart ist z. B. von den Siemens-Schuckert-Werken bei den Transformatoren der 66 000 Volt Kraftübertragungsanlage der Sociedad Hidroelectrica Espanola angewendet worden.¹⁾

¹⁾ Bei dieser Anlage werden 30 000 PS von Molinar am Flusse Jucar nach Madrid (240 km), Valencia (80 km), Alcoy (80 km) und Cartagena (60 km) mit Drehstrom übertragen. Zunächst sind 3 Drehstromtransformatoren für je 6750 KVA, 6000/66 000 Volt, Freq. 50 aufgestellt.

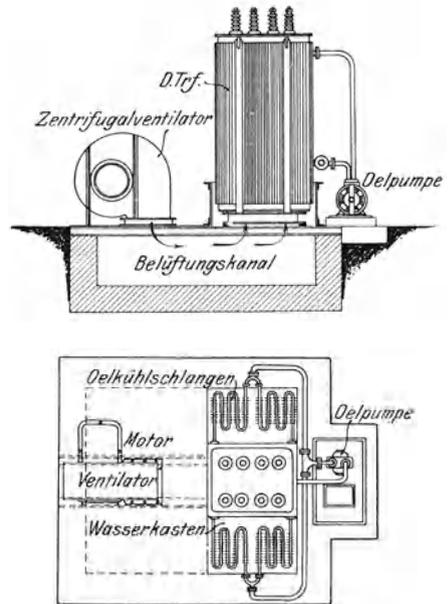


Fig. 198. Kühlung des Öles außerhalb des Transformators und zusätzliche Belüftung mittels eines Zentrifugalventilators.

Naturgemäß muß auch bei einer solchen Einrichtung dauernde Aufsicht und Wartung vorhanden sein, die sich in der Hauptsache auf die Ölpumpen zu erstrecken hat.

Schließlich kann auch noch unter ganz besonders ungünstigen Verhältnissen die Ölkühlung mit Hilfe von Ölpumpen und Wasserkästen und einer zusätzlichen Luftkühlung durch Ventilatoren mit Benutzung von Belüftungskanälen für den Transformator selbst angewendet werden, wie dieses die Fig. 198 zeigt. Ob eine solche umständliche Ausführung indessen bereits praktisch benutzt worden ist, ist nicht bekannt. Die Fig. 198 läßt deutlich erkennen, wie die Kühlung von Öl und Transformator gedacht ist, und unter Berücksichtigung der bisherigen Erklärungen über Vorzüge und Nachteile der einzelnen Kühlformen ist ein weiteres Eingehen auf diese zusammengesetzte Kühlform nicht mehr erforderlich. Die Beaufsichtigung ist naturgemäß hier gegenüber allen anderen Formen die umständlichste und die Raumbeanspruchung der Gesamteinrichtung die größte.

44. Die besonderen Schaltungen von Transformatoren (äußere Schaltung).

An besonderen Schaltungen von Ein- bzw. Mehrphasen-Transformatoren sind für die mannigfaltigen Betriebsverhältnisse bzw. Ansprüche an die Arbeitsweise eine ganze Reihe im Gebrauch, auf die alle einzugehen nicht möglich ist. Es werden daher nur die in der Praxis häufiger vorkommenden Ausführungen behandelt werden.

a) Die Zweiphasen-Dreiphasen-Umformung. Noch eine ganze Anzahl von Anlagen gibt es, die seinerzeit nach dem Zweiphasensystem mit vier Leitungen gebaut worden sind, und für die auch heute noch Erweiterungen in dieser Form durchgeführt werden. In der Regel hat man aber die Zweiphasenmotoren gegen Drehstrommotoren ausgewechselt: Um nun Zweiphasenstrom in Drehstrom umzuformen, kann man ebenfalls Transformatoren verwenden und benutzt dazu die von Skott angegebene Schaltung (Fig. 199). Es werden die beiden

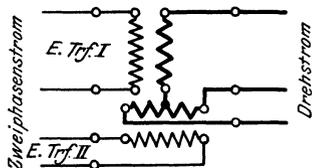


Fig. 199. Zweiphasenstrom-Drehstromumformung nach Skott.

unverketteten Phasen des Zweiphasensystems mit den Primärklemmen zweier Einphasentransformatoren (*E.Trf. I* und *E.Trf. II*) verbunden, während eine Sekundärklemme eines der beiden Transformatoren mit dem Mittelpunkte der Sekundärwicklung des zweiten Transformators zusammengeschaltet wird. Wohl zu beachten ist dabei aber, daß *Trf. I* und *Trf. II* nicht dasselbe Übersetzungsverhältnis haben dürften, sondern es muß z. B. bei $u_I = 1 : 1$, $u_{II} = 1 : \sqrt{\frac{3}{4}} = 1 : 0,867$ sein. Sekundär

erhält man dann ein symmetrisches Dreiphasensystem.

Diese Umformung hat folgende Vorteile: In den Zweiphasenanlagen können durch verhältnismäßig geringe Unkosten für die Systemänderung die günstiger arbeitenden Drehstrommotoren verwendet werden, und die Belastung einer Phase kann keinen Spannungsabfall in der zweiten Phase hervorrufen. Ferner sind statt vier nur drei Verteilungsleitungen notwendig, und schließlich ist, wenn z. B. für die Lampen unterspannungsseitig wieder Zweiphasenstrom verlangt wird

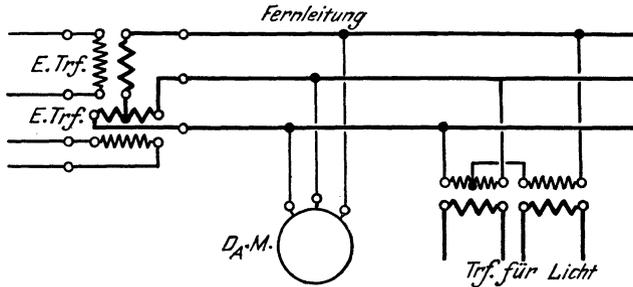


Fig. 200. Kraftübertragung mit Zweiphasenstrom-Drehstromumformung für Fernleitung und Motorenbetrieb und Rückumformung in unverketteten Zweiphasenstrom für Beleuchtung nach Skott.

(Fig. 200), eine leichtere Regelung der Lampenspannung bzw. eine bequemere Lampenverteilung möglich, ohne daß gleiche Phasenbelastung vorhanden ist, denn nach den Ausführungen auf S. 205 kann die Belastung z. B. auch nur einer Phase des Zweiphasensystems sekundär einen Strom in der anderen Phase des Generators primär nicht hervorrufen.

Die Skottsche Schaltung für die Umwandlung von Drehstrom in Zweiphasenstrom — eine einfache Umkehrung der Schaltung nach Fig. 199 — ist naturgemäß auch ohne Schwierigkeit anwendbar und z. B. für die Eriebahn benutzt worden, die von den Kraftwerken der Niagarafälle (Ontario) mit 60 000/11 000 Volt bei einer Frequenz = 25 mit Strom versorgt wird. Die Untersuchungen ergaben, daß mit Rücksicht auf die natürliche Zweiteilung der Strecken der Zweiphasenstrom die günstigsten Wirtschaftlichkeits- und Betriebsverhältnisse aufwies, und so mußte man denn den vom Ontariowerk gelieferten Drehstrom in verketteten Zweiphasenstrom umformen. Die Leistung beträgt 3×750 KW und die Fahrdrabtspannung nach dem oben angegebenen Übersetzungsverhältnisse der Transformatoren 11 000 Volt. Das Schaltungsschema ist in Fig. 201 dargestellt. Die einzelnen Strecken arbeiten mit Einphasenstrom, während der Verkettungspunkt der Sekundärseite der Transformatoren geerdet und an die Laufschiene angeschlossen ist.

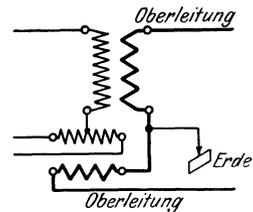


Fig. 201. Drehstrom-Zweiphasenstromumformung (verkettet) nach Skott.

Handelt es sich aber darum, verketteten Zweiphasenstrom in Drehstrom umzuwandeln, dann kann die Skottsche Schaltung nur in abgeänderter Form benutzt werden. Bei der Skottschen Schaltung ist in diesem Falle, wenn auch die verkettete Zweiphasenstromseite belastet wird, gleiche Spannung zwischen den drei Phasen auf der Drehstromseite nur zu erhalten, wenn die Belastung auf der Zweiphasenstromseite annähernd gleich auf beide Phasen verteilt werden kann. Das ist aber dann, wenn auf dieser Seite Beleuchtung in größerem Umfange angeschlossen ist, nicht immer zu erreichen, und deswegen ist, zumal die Lichtstromkreise in der Regel nur zwischen die Außenleiter geschaltet werden, die folgende abgeänderte Schaltung zu empfehlen, die in der Praxis bereits wiederholt zur Anwendung gekommen ist¹⁾. In Fig. 202 ist das Schaltungsschema dargestellt, wie es von den Siemens - Schuckert-

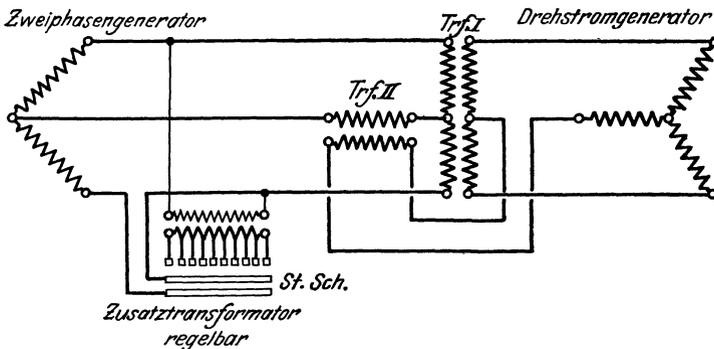


Fig. 202. Kraftübertragung, gespeist von einem Zweiphasen- und einem Drehstromgenerator.

Werken angegeben worden ist. Der *Trf. I* übersetzt die Phasenspannung auf der Drehstromseite in die Außenleiterspannung des Zweiphasenstromes, während *Trf. II* ein Übersetzungsverhältnis von $\frac{1}{2} \sqrt{3} = 0,866$ \times Drehstromspannung auf die halbe Außenleiterspannung des Zweiphasenstromes erhält.

Beträgt z. B. die Drehstromspannung 2000 Volt und die Außenleiterspannung des Zweiphasenstromes 5000 Volt, so ist das Übersetzungsverhältnis von *Trf. I* = 2000 : 5000, von *Trf. II* dagegen 1730 : 2500. Bei einer zu übertragenden Leistung von 200 KW Zweiphasenstrom und umgekehrt Drehstrom ist *Trf. I* für eine Leistung von 200 KW und

¹⁾ Meyer: Die Kraftübertragungsanlage Coschütz - Glückaufschacht. E. K. B. 1909, Heft 8, S. 144. Bei dieser Anlage handelte es sich darum, für die Grubenwasserhaltung unter Tage jederzeit auch dann elektrischen Strom zur Verfügung zu haben, wenn die eigene Stromerzeugungsstation versagen sollte. Aus dem städtischen E.-W. Coschütz stand verketteter Zweiphasenstrom zur Verfügung, während die Grubenanlagen mit Drehstrom aus dem eigenen Werke betrieben werden. Es mußte also die Umformung des Zweiphasenstromes vorgenommen werden, was nach eingehenden Untersuchungen am vorteilhaftesten mittels Transformatoren und nicht Motorgeneratoren durchgeführt werden konnte. Auch der Parallelbetrieb hat keine Schwierigkeiten ergeben.

Trf. II für eine solche von 100 KW zu bemessen. Die entsprechenden Stromstärken betragen für beide Transformatoren auf der Zweiphasenseite ca. 40 Amp. Zur Spannungsregelung auf der Zweiphasenstromseite ist in Fig. 202 noch ein Transformator mit unterteilter Wicklung (siehe S. 266) eingeschaltet, was weiter unten zur Behandlung kommt.

Es sei schließlich auch auf eine von F. Sonns angegebene Schaltung hingewiesen, bei der ein ähnlich wie bei dem normalen Drehstromtransformator ausgebildeter Eisenkörper benutzt wird, und die Schenkelwicklungen verschiedene Windungszahlen erhalten. Hierbei kann ebenfalls verketteter und unverketteter Zweiphasenstrom in Drehstrom und umgekehrt umgeformt werden. Nach Angabe des Erfinders soll dieser Transformator in Gewicht, Preis und elektrischen Verhältnissen günstiger als derjenige nach der Skotttschaltung ausfallen¹⁾.

b) Der Spar- oder Autotransformator. Handelt es sich um den Ausgleich geringerer Spannungsverschiedenheiten z. B. in einem be-

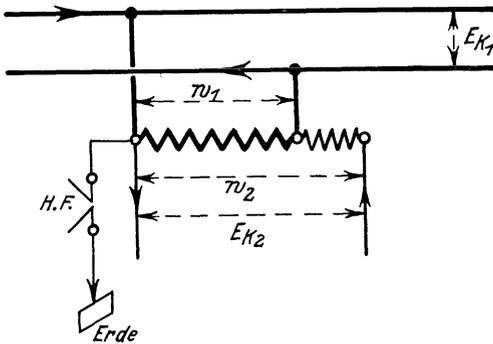


Fig. 203. Stromlaufschema des Spar- oder Autotransformators (Spannungserhöhung).

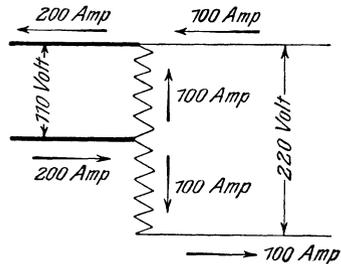


Fig. 204. Stromlaufschema des Spar- oder Autotransformators (Spannungsverminderung).

sonderen Teile einer ausgedehnten Kraftübertragungsanlage, oder um kleinere Übersetzungsverhältnisse zwischen Hoch- und Niederspannung, so kann man hierzu den sog. Spar- oder Autotransformator benutzen. Bei diesem ist die Primär- und Sekundärwicklung nur auf einem Eisenkerne untergebracht (Fig. 203); beide Wicklungen werden entweder hintereinander geschaltet oder die Sekundärwicklung wird von einem Teile der Primärwicklung gebildet (Fig. 204). Die Verbindung nach Fig. 203 ergibt eine Spannungserhöhung und diejenige nach Fig. 204 eine Spannungsverminderung gegenüber der zugeführten Spannung. Da in jeder Windung der Wicklung die gleiche EMK. induziert wird, so erhält man z. B. für einen Einphasentransformator nach Fig. 203 auf der Sekundärseite eine Klemmenspannung:

$$E_{k_2} = \frac{w_2}{w_1} \cdot E_{k_1} .$$

¹⁾ M. Vidmar: Über einen neuen Zweiphasen-Dreiphasenstromtransformator. *El. u. Masch.* 1911, Heft 24, S. 487.

Aus der Leistung:

$$E_{k_2} \cdot J_2 = E_{k_1} \cdot J_1$$

folgt:

$$J_2 = \frac{E_{k_1}}{E_{k_2}} \cdot J_1 = \frac{w_1}{w_2} \cdot J_1,$$

und es geht daraus hervor, daß im Netze abgesehen vom Magnetisierungsstrom ein geringerer Strom fließt als sekundär.

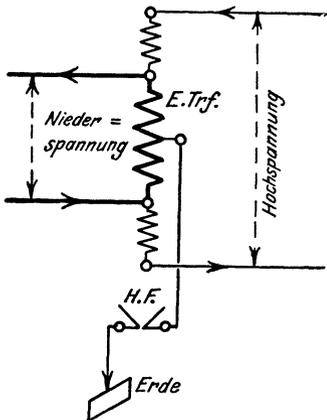


Fig. 205. Stromlaufsche des Einphasen-Spartransformators mit Wicklungs-erdung.

Beim Autotransformator kann nun aber die leitende Verbindung beider Wicklungen unter Umständen die Spannung im Sekundärstromkreise gegen Erde auf den Wert der Primärspannung erhöhen, was dann besonders gefährlich wird, wenn es sich um Primärspannungen von beträchtlicher Höhe handelt. Es muß daher z. B. bei Einphasenstrom entweder nach Fig. 203 ein Pol der Hoch- und Niederspannungswicklung, oder nach Fig. 205 die Niederspannungswicklung mit der Erde über eine Durchschlagssicherung oder eine Hörnerfunkenstrecke *H.F.* verbunden werden. Solche Erdverbindungen sind bei Einphasenanlagen aber im allgemeinen nicht ohne weiteres zulässig, weil bei Erdungen noch anderer Einphasen-Transformatoren oder Einphasengeneratoren durch das An-

sprechen von zufällig zwei Erdungs-Funkenstrecken unter Umständen ein vollständiger Kurzschluß eintritt, und damit Beschädigungen der entsprechenden Teile der Anlage die Folge sind.

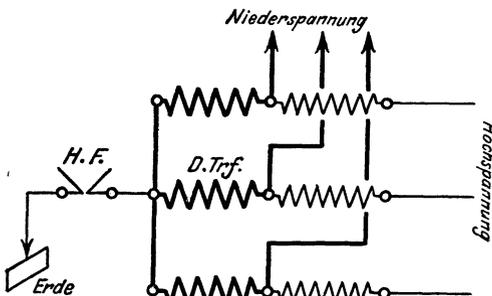


Fig. 206. Stromlaufsche des Drehstrom-Spartransformators mit Wicklungs-erdung.

Bei Drehstrom-Autotransformatoren mit Sternschaltung (Fig. 206) kann der Nullpunkt dagegen in allen Fällen mit Erde verbunden werden. Dadurch ist dann auch der Übertritt von Hochspannung in den Niederspannungsstromkreis sicher verhindert.

Der Hauptvorteil eines Autotransformators liegt nun darin, daß ein normales Transformatormodell bei gleichbleibendem Gewichte als Spartransformator für eine $\frac{u}{u-1}$ höhere Leistung verwendet werden kann, und derselbe infolgedessen billiger wird als der gewöhnliche Zweispulentransformator¹⁾.

¹⁾ G. Rasch: Spartransformatoren für Drehstrom. E. T. Z. 1910, Heft 1.

Wenn z. B. das Übersetzungsverhältnis $u = 2 : 1$ ist, so kann ein bestimmtes Transformatormodell als Spartransformator für die doppelte Leistung benutzt werden. Sind die Übersetzungen kleiner als $2 : 1$, also z. B. $1,2 : 1$, so ist die Leistungserhöhung eine sechsfache. Die Verwendung von Spartransformatoren ist daher besonders bei Drehstrom mit Sternschaltung und geerdetem Nullpunkte bei kleinem Übersetzungsverhältnisse empfehlenswert. Außerdem gibt dieser Transformator noch die Möglichkeit, gewisse Belastungsunterschiede in den Primärleitungen auszugleichen, was beim Zweispulentransformator überhaupt nicht zu erreichen ist. Für die Verhältnisse, wie sie hinsichtlich der Stations- oder Streckentransformatoren in Kraftübertragungsanlagen, Überlandzentralen, Elektrizitätswerken u. dgl. vorliegen, ist der Spartransformator indessen selten am Platze.

Eine häufige Verwendung findet dieser Transformator dagegen als Stufentransformator zur Spannungsregelung, z. B. zum Anlassen von Motoren (vgl. S. 67). Die Wicklung auf der Unterspannungsseite wird dafür mit einer größeren Zahl von Anzapfungen versehen, die mit Hilfe eines Stufenschalters ähnlich einem Zellschalter geschaltet werden. In Fig. 62 war ein solcher Regler mit dem Transformator zusammengebaut abgebildet. Ferner ist der Spartransformator auch zur Spannungsregelung in Hochspannungsnetzen vielfach in Benutzung; das Kapitel 45 wird hierüber noch besondere Beispiele bringen.

c) Schaltung zur Verminderung der Transformator-Leerlaufverluste. Dienen die Transformatoren einer Station in der Hauptsache nur zur Herabsetzung der Spannung für Beleuchtungszwecke, wird andererseits von den Stromabnehmern die Bedingung gestellt, daß der niedergespannte Strom auch zu jeder Tages- und Nachtzeit zur Verfügung stehen muß, dann ist mit einer solchen Betriebsweise die Unannehmlichkeit für das Kraftwerk verbunden, dauernd auch während der Tages- bzw. während der späten Nacht- und Frühstunde die Leerlaufverluste der Transformatoren decken zu müssen, ohne daß also ein Gewinn aus der Energiezuführung erzielt wird (siehe S. 200). In der Erkenntnis eines solchen Verlustbetriebes hat man daher Schalter entworfen, die selbsttätig oder z. B. vom Kraftwerke gesteuert die leerlaufenden Transformatoren an solchen Stellen, an denen keine Belastung vorhanden ist, ganz abschalten, oder an Stelle der großen Transformortypen kleine Einheiten einschalten und erst beim Steigen der Belastung über die Leistung dieser kleinen Transformatoren hinaus die großen Einheiten in Betrieb setzen. Von den zahlreichen Ausführungsformen, die hierfür angegeben worden sind, soll hier indessen nur eine der neuesten beschrieben werden.

Nach der Schaltung von Berry¹⁾ wird ein Hilfstransformator geringerer Leistung mit dem Haupttransformator in Hintereinander-

¹⁾ Electr. Enging. 1908, Bd. 3, S. 197 und E. T. Z. 1908, Heft 16, S. 412: Ein neues System zur Verbesserung des mittleren Jahreswirkungsgrades von Transformatoren.

schaltung gelegt derart, daß bei geringeren Belastungen der Hilfstransformator die Stromlieferung für das Sekundärnetz übernimmt und durch einen besonderen Schalter selbsttätig ausgeschaltet wird, sobald die Belastung einen bestimmten Grenzwert überschreitet.

Die Fig. 207 zeigt das Schaltungsschema einer derartigen Anlage, und zwar ist der leichteren Übersicht wegen ein Einphasenbetrieb bei einer Leistung von 100 KW und einem Spannungsverhältnisse von 2000 auf 220 Volt zugrunde gelegt. Der Hilfstransformator, dessen Größe 10 KW betragen soll, ist mit Trf_1 und der Haupttransformator von 100 KW mit Trf_2 bezeichnet. Mit Hilfe eines Doppelschalters $S \cdot P$, der durch die Magnetspulen K_1 und K_2 gesteuert wird, kann der kleine Transformator, der mit dem Haupttransformator in Reihe geschaltet ist, kurz geschlossen werden.

Der Doppelschalter ist offen, wenn die Belastung unter dem Werte von 10 KW liegt. Dann verteilen sich die Spannungen an den Klemmen der beiden Transformatoren im Verhältnisse ihrer scheinbaren Widerstände (Impedanzen); infolgedessen erhält der kleine Transformator fast den ganzen Teil der Gesamtspannung, während dem großen

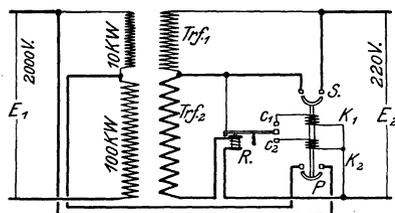


Fig. 207. Schaltung zur Verminderung der Transformator-Leerlaufverluste nach Berry.

Transformator fast den ganzen Teil der Gesamtspannung, während dem großen nur ein verschwindend kleiner Teil zugeführt wird. Das Relais R ist nun in den Belastungsstromkreis eingeschaltet und wird demnach von dem Belastungsstrom beeinflusst. Steigt derselbe über $1/10$ des Vollaststromes, dann wird durch Anziehen des Relaisankers von R der Kontakt c_1 geschlossen; dadurch erhält die Spule K_1 Strom, wird erregt und schließt den Doppelschalter.

Der Transformator Trf_1 wird kurzgeschlossen, und die Belastung geht auf Trf_2 über. Sinkt die Belastung wieder unter $1/10$ des vollen Wertes, dann wird der Kontakt c_2 geschlossen, K_2 erregt, und der Doppelschalter selbsttätig geöffnet. Damit übernimmt Trf_1 die Energieabgabe.

Der Kontaktapparat ist noch weiter in der Form ausgeführt, daß erstlich die Spulen K_1 und K_2 nur während des Schaltvorganges vom Strome durchflossen, Energieverluste von Bedeutung durch dieselben sonst also nicht verursacht werden, und ferner die Sicherungen des kleinen Transformators so durch eine besondere Vorrichtung mit dem Doppelschalter $S \cdot P$ in Verbindung gebracht werden können, daß beim Durchschmelzen derselben, also beim ungewollten Abschalten von Trf_1 der große Transformator von selbst die Last übernimmt. Eine Betriebsunterbrechung infolge eines Defektes am Hilfstransformator ist demnach ausgeschlossen.

Diese Anordnung hat noch die weiteren Vorteile, daß sie verhältnismäßig billig ist, und bei hohen Primärspannungen infolge des vor dem großen Transformator liegenden hohen Widerstandes des kleinen Trans-

formators die Gefahr von Durchschlägen für Trf_2 durch Überspannungen vermindert. Es sei hinsichtlich dieser Vorgänge auf das schon auf S. 85 über Schutzschalter Gesagte verwiesen; auf S. 294 u. f. wird diese Betriebserscheinung noch besonders behandelt werden.

Wann die Benutzung derartiger Hilfstransformatoren am Platze ist, kann für alle Fälle zutreffend natürlich nicht angegeben werden. Es sind für die Entscheidung dieser Frage vielmehr eingehende Kostenvergleichsrechnungen anzustellen, die zu umfassen haben: die jährlich nutzbar abgegebenen KW-Stunden, die Selbstkosten für diese und für den Leerlauf der Transformatoren, die Anlagekosten ohne und mit Sparschaltung und die Verzinsung, Amortisation, Aufsicht und Reparatur, sowie schließlich Mehrausgaben für die Baulichkeiten, falls solche unbedingt erforderlich sein sollten. Ferner muß auch das Stromversorgungsgebiet beurteilt werden, und zwar, ob sich mit Rücksicht auf die Größe der Transformatoren und die angeschlossenen Licht- und Kraftbetriebe die höheren Einrichtungskosten der Transformatorstationen wirtschaftlich rechtfertigen lassen. Man sollte daher bei Neuanlagen, die vollständig sichere Schlüsse über die zu erwartenden Betriebs- und Belastungsverhältnisse von vornherein noch nicht zu ziehen zulassen, die Baulichkeiten sofort entsprechend größer ausführen, was in der Regel nur mit unbedeutenden Mehrkosten verbunden ist, um gegebenenfalls später, z. B. nach einjährigem Betriebe die Sparschaltung einrichten zu können.

Andere Schaltungen mit der gleichen Aufgabe beruhen darauf, nach Stromzeigern oder auch durch Relais von dem Kraftwerke aus die Ölschalter für die großen Transformatoren in den einzelnen Stationen automatisch zu steuern, doch haben sich diese bisher ihrer höheren Anlagekosten wegen, die durch die Steuerleitungen usw. entstehen, nicht eingeführt. Es kann daher von der Beschreibung derartiger Anlagen abgesehen werden.

d) Die Benutzung von Einphasentransformatoren in Drehstromnetzen. Eine bei größeren Transformatorleistungen häufiger anzutreffende Schaltung soll schließlich noch erwähnt werden, die darin besteht, an Stelle von Drehstromtransformatoren je drei Einphasentransformatoren zu verwenden, die entweder in Dreieck oder in Stern miteinander verbunden werden. Besonders beachtenswert ist dabei die innere Schaltung auf der Oberspannungsseite.

Die Dreieckschaltung hat nach Seite 210 den Vorteil, daß beim Schadhaftwerden eines Transformators der Betrieb nicht sofort völlig unterbrochen wird. Jeder Einphasentransformator ist für $\frac{1}{3}$ der Leistung des Drehstromtransformators und für die Netzspannung zu wählen.

Bei der Sternschaltung hingegen fällt die Spannung des Einphasentransformators bei gegebener Klemmenspannung E_{k1} um den $\sqrt{3}$ fachen Betrag kleiner aus als bei der Dreieckschaltung. Infolgedessen ist die Verbindung in Stern besonders bei hoher Primärspannung vorzuziehen. Die Transformatoren werden kleiner, da der Aufwand an Isoliermaterial geringer ist.

Ganz allgemein hat eine solche Herstellung von Drehstromtransformatoren aus Einphasentransformatoren die folgenden Vorzüge: Die Reservehaltung ist billiger, weil nur ein Einphasentransformator für $\frac{1}{3}$ der Leistung eines Drehstromtransformators zu beschaffen ist, sobald die Verteilung der Gesamtleistung auf gleiche Transformatoreinheiten durchgeführt wird. Die Abkühlungsflächen der Transformatoren bezogen auf die Drehstromleistung sind erheblich größer, und die Kühlung macht dann unter Umständen weniger Schwierigkeiten. Es ist daher für große Anlagen nach dieser Richtung stets eine sorgfältige Kalkulation vorzunehmen, um das zweckmäßigste unter richtiger Bewertung der Vorzüge und Nachteile zu finden. Diese Prüfung hat sich zu erstrecken auf: den Wirkungsgrad, das Materialgewicht für 1 *KVA* und den Preis unter Berücksichtigung der Raumbeanspruchung, der Montage, der Reservehaltung und gegebenenfalls der sonstigen Unkosten (Konventionalstrafen usw.) bei Betriebsstörungen durch Transformatordefekte.

Die Nachteile dieser Ausführungsform bestehen wie schon angedeutet darin, daß naturgemäß die Raumbeanspruchung größer ist, und auch die Beschaffungskosten etwas höher ausfallen als beim Drehstromtransformator.

In Fig. 225 ist das Schaltungsschema für eine Anlage gezeichnet, in der solche zusammengesetzten Dreiphasentransformatoren zu Verwendung gekommen sind. In der Erklärung dieses Schema wird nun auch darauf hingewiesen werden (S. 288), in welcher Weise man den Reservetransformator mit den Sammelschienen in Verbindung bringt, und zwar entweder als fest aufgestellten Transformator mit Benutzung von Trennschaltern, oder als fahrbaren Transformator, der im Bedarfsfalle an bestimmter Stelle eingefahren und unter Benutzung der vorhandenen Apparate und Meßinstrumente angeschlossen werden kann. Auch hierauf ist bei der Vergleichsrechnung Rücksicht zu nehmen.

45. Die Spannungsregelung in Wechselstromnetzen.

a) Die Spannungsregelung im allgemeinen. Eine Regelung der Spannung ist ganz allgemein dann erforderlich, wenn es sich einmal um schwankende Belastungsverhältnisse und das andere Mal um ausgedehnte Leitungsnetze mit stark voneinander abweichenden Leitungslängen handelt. Im ersteren Falle ist zu unterscheiden zwischen solchen Anlagen, in denen bei nur einer oder bei einer größeren Anzahl von annähernd gleich entfernt liegenden Stromverbrauchsstellen die Änderung der Belastung zu gleichen oder annähernd gleichen Zeiten und in demselben Umfange stattfindet, und solchen, in denen z. B. kurze, rasch aufeinanderfolgende Belastungsstöße bei einem bzw. bei mehreren der angeschlossenen Betriebe zu verschiedenen Zeiten auftreten. Diese mehr oder weniger schnell und plötzlich verlaufenden Belastungsänderungen und die Regelung der Spannung in derartigen Fällen werden erst im II. Bande behandelt. In Kraftübertragungsanlagen

mit Energielieferung für Licht und Kraft werden sie in der Regel entweder bei zwischengeschalteten Umformern durch diese ausgeglichen, oder sie sind mit Rücksicht auf die Größe der Leistung des Kraftwerkes für die übrigen Teile der Anlage zumeist ohne Einfluß.

Viel häufiger ist dagegen das Auftreten allmählicher Belastungsänderung zu annähernd denselben Zeiten in einem oder allen Teilen des Leitungsnetzes, und zwar dann, wenn z. B. Strom für Licht- und Kraftzwecke durch die gleiche Leitung zu übertragen ist bzw. von denselben Hauptsammelschienen des Kraftwerkes oder einer Transformatorstation abgenommen wird. Dieses ist aber stets der Fall bei städtischen Elektrizitätswerken, Überlandzentralen u. dgl. Betrieben. Die Tagesbelastung (Motoren) wird immer von der Morgen- und Abendbelastung (Licht) abweichen, und auch die einzelnen Wochen und Monate zeigen große Unterschiede in den jeweils zu erzeugenden Energiemengen. Hier erfolgt dann die Regelung der Spannung im

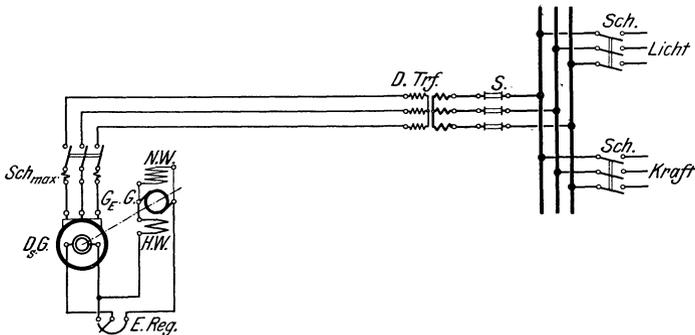


Fig. 208. Regelung der Netzspannung durch Änderung der Generatorspannung in einer Drehstromanlage.

Kraftwerke durch die Änderung der Spannung der Generatoren. Der Vollständigkeit wegen ist in Fig. 208 der einfachste Fall für eine Fabrikanlage mit nur einer Dynamomaschine, einer Fernleitung, einem Transformator und einer Hauptsammelmaschine gezeichnet, von der Strom sowohl für Licht-, als auch für Kraftzwecke abgenommen wird. Durch Verstellen des Erregerregulators *E.Reg.* des Stromerzeugers *D.G.* wird die Spannung am Transformator *D.Trf.* bzw. an den Sammelschienen je nach der Stärke der Belastung auf der notwendigen Höhe gehalten. Stromstöße auf die Sammelschienen hervorgerufen durch das Zuschalten größerer Motoren oder zahlreicher Lampen werden sich dabei naturgemäß auch auf alle anderen Stromkreise übertragen, wenn nicht durch Wahl stärkerer Zuleitungsquerschnitte wenigstens zum Teil auf den bei größeren Stromstärken auftretenden Spannungsabfall Rücksicht genommen wird. Unter Umständen sind, wenn z. B. auf vollständig ruhiges Licht gesehen wird, selbsttätig arbeitende Schnellregler für die Erregermaschinen einzubauen, auf die indessen ebenfalls erst im II. Bande näher eingegangen werden wird, weil sie zur Ausrüstung des Kraftwerkes gehören.

Ganz andere Mittel sind dagegen zu verwenden, wenn in Wechselstromanlagen an einzelnen, weit voneinander liegenden Speisepunkten oder Transformatorenstationen Spannungsschwankungen bei wechselnder Belastung ausgeglichen werden müssen, oder wenn die einzelnen Leitungsstrecken in ihrer Länge und Belastung so große Unterschiede aufweisen, daß man vom Kraftwerke aus nicht mehr in der Lage ist, selbst wenn eine mittlere Spannung dauernd konstant gehalten wird, an allen Speisepunkten die notwendige gleiche Spannungshöhe zu halten. Im allgemeinen ist eine Schwankung der Spannung an den Speisepunkten von $\pm 5\%$ noch als zulässig zu erachten; darüber hinaus aber wird besonders das Licht bei Belastungsänderungen unruhig, und man muß dann zur künstlichen Spannungsregelung greifen.

Wie sich die einzelnen Gattungen der Wechselstrommotoren bei Spannungsschwankungen hinsichtlich Drehzahl, Drehmoment usw. verhalten, und wie die Umformer arbeiten, ist in den Abschnitten I und II ausführlich erläutert worden.

Für die Änderung der Spannung, ohne daß sie vom Kraftwerke ausgeht, benutzt man nun wiederum Transformatoren, und zwar entweder:

- 1) Transformatoren mit unterteilter Primär- oder Sekundärwicklung, oder
- 2) drehbare Zusatztransformatoren, sog. Induktions- oder Potentialregler.

Beide Regelungsformen haben je ihr bestimmtes Anwendungsgebiet, und sie werden in großen Verteilungsnetzen vielfach benutzt. Die primäre oder sekundäre Wicklung des Transformators wird mit der Leitung, deren Spannung zu regeln ist, in Reihe geschaltet, und durch die zweite Wicklung bei starker Belastung des Speisepunktes die gesunkene Leitungsspannung um den fehlenden Betrag erhöht bzw. bei schwacher Belastung die Spannung ermäßigt.

b) Der Transformator mit Wicklungsunterteilung. Bei diesem findet ein normaler Transformator, entweder zweispulig oder als Autotransformator ausgeführt, Verwendung, dessen Primär- oder Sekundärwicklung in einzelne Stufen unterteilt ist. Die Fig. 209 zeigt das Schaltungsschema eines solchen Regeltransformators nach dem Entwurfe von Brown, Boweri & Cie. Die einzelnen Spulenabschnitte der Niederspannungswicklungen sind zu den Kontaktbahnen eines sog. Stufen- oder Windungsschalters geführt, wie er für die Stufentransformatoren zum Anlassen von Hochspannungs-Drehstrominduktionsmotoren bereits auf S. 67 erwähnt worden ist. Je nach der gewollten Spannungsänderung werden mittels dieses Schalters einzelne Windungsstufen am Transformator zu- oder abgeschaltet.

Eine solche Art der Regelung und zwar nur in der Hauptleitung genügt vollkommen erstlich dann, wenn in allen Teilen eines Konsumgebietes ungefähr das gleiche Verhältnis zwischen Licht- und Kraftabnahme besteht, und ferner die verschiedenen abgehenden Sekundärleitungen zu gleicher Zeit annähernd die gleiche Belastung aufweisen.

Sind dagegen die einzelnen Speisepunkte oder einzelne von diesen abführende Sekundärleitungen nicht gleichzeitig gleichbelastet, sondern treten große Verschiedenheiten auf, dann kann eine gemeinsame Spannungsregelung in der Hochspannungszuleitung nicht mehr stattfinden, sondern es muß die Spannung in den einzelnen Leiterabschnitten durch solche Regeltransformatoren entsprechend den jeweiligen Belastungen geändert werden. Um den Transformatoren nicht allzuvielen Wicklungsstufen zu geben, wodurch dieselben selbst und die Schaltapparate recht erheblich verteuert werden, wird auch in diesem Falle die Spannung an den Sammelschienen des Kraftwerkes auf einen

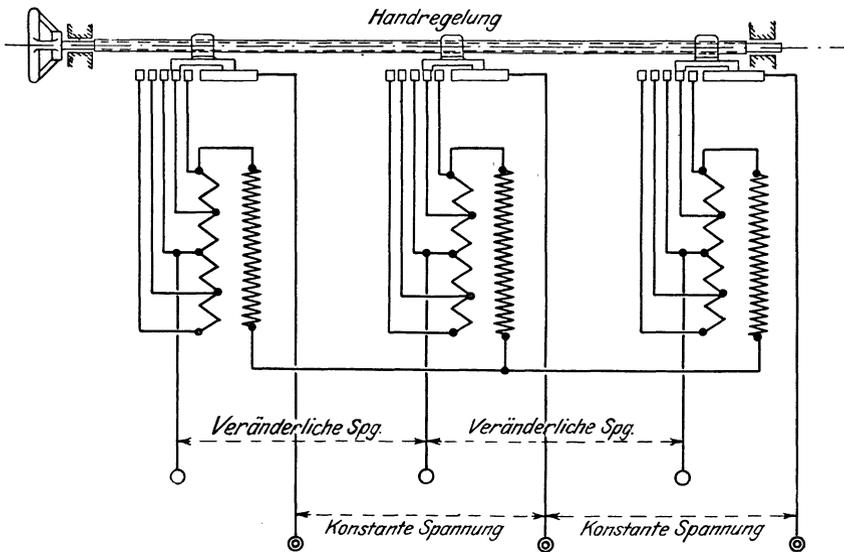


Fig. 209. Spannungsregelung durch einen Transformator mit Wicklungsunterteilung und Windungsschalter.

Mittelwert eingestellt; die Regeltransformatoren haben dann nur die Spannungsänderungen gegenüber diesem Werte auszugleichen.

Die Anzapfung der Wicklungen kann, wie bereits angedeutet, entweder auf der Primär- oder auf der Sekundärseite vorgenommen werden. Am vorteilhaftesten ist es, sie auf die Seite der niedrigeren Spannung zu verlegen, weil dadurch einmal der Stufenschalter billiger, und ferner das Schalten auf der Hochspannungsseite vermieden wird. Das letztere ist mit Rücksicht auf die Gefahren, die durch die dabei auftretenden Überspannungen (siehe S. 294) hervorgerufen und die noch erhöht werden, weil der Schalter unter Last betätigt werden muß, bei hohen Spannungen überhaupt unzulässig. Außerdem wird, wenn der hochspannungsseitig angeordnete Stufenschalter defekt wird, eine zum mindesten kurzzeitige vollständige Betriebsunterbrechung unvermeidlich sein, bis der Schalter entfernt oder kurzgeschlossen ist. Bei Nieder-

spannungsschaltern kann man sich dagegen schneller und ohne große Betriebsstörung helfen.

In elektrischer Hinsicht ist zu dieser Spannungsregelung zu erwähnen, daß sie naturgemäß eine Spannungsänderung nur in größeren Stufen und sprunghaft zuläßt. Eine Änderung der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung tritt nicht ein, da nur die Windungszahl am Transformator geändert wird; es wird also nicht mit zusätzlichen wattlosen Strömen gearbeitet, der Leistungsfaktor des Netzes durch das Einschalten eines solchen Regeltransformators demnach nicht verschlechtert.

In dem in Fig. 209 abgebildeten Schaltungsschema, das einer besonderen Erläuterung wohl nicht bedarf, ist ein Autotransformator benutzt

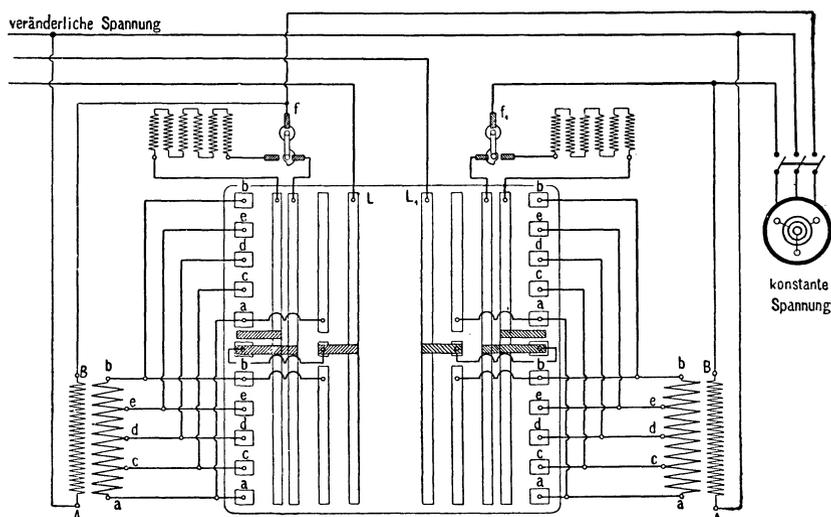


Fig. 210. Schaltungsschema für eine Spannungsregelung durch Zusatztransformator und Windungsschalter.

worden. Wenn ein solcher oder ein normaler zweispuliger Transformator angewendet wird, ist bereits früher erörtert worden. Das Verstellen des Stufenschalters erfolgt entweder von Hand oder mit Hilfe von Relais, die einen mit dem Stufenschalter verbundenen Elektromotor steuern. In Fig. 217 ist eine solche Relaissteuerung für einen drehbaren Zusatztransformator wiedergegeben, die sinngemäß auch für den Antrieb des Stufenschalters benutzbar, indessen erst auf S. 274 näher erklärt ist.

Eine andere Ausführung und Schaltung zeigt Fig. 210, wie sie die Siemens-Schuckert-Werke benutzen. Es sind hier zur Spannungsregelung in einem Drehstromnetze zwei Einphasentransformatoren als Zusatztransformatoren verwendet, deren in mehrere Stufen unterteilte und mit Abzweigungen (c, d, e) versehene Unterspannungswicklungen in zwei der Leitungen des Netzes gelegt sind. Die Primärwicklungen

der Transformatoren werden zwischen die dritte durchlaufende Leitung und je eine der beiden anderen Netzleitungen geschaltet. Die Transformatoren stehen infolgedessen dauernd unter Spannung. Herrscht bei mittlerer Belastung die gewünschte Spannung in der Leitung, dann werden die Sekundärspulen ausgeschaltet. Bei sinkender Spannung werden die einzelnen Windungsgruppen stufenweise in dem Sinne in die Leitung eingeschaltet, daß die in ihnen induzierte Spannung sich zur

Leitungsspannung addiert. Nimmt letztere dagegen bei Entlastung über den normalen Betrag zu, dann legt man die einzelnen Windungsgruppen durch Vertauschen der Anschlüsse im umgekehrten Sinne in die Leitung, so daß die in ihnen erzeugte Spannung derjenigen des Netzes entgegengerichtet ist. Die Umschaltung wird ebenfalls durch den Stufenschalter bewirkt.

Der Windungs- oder Stufenschalter (Fig. 211) ist dem gewöhnlichen Doppelschalter in Akkumulatorenanlagen ähnlich. Da die Spannung aus Symmetriegründen naturgemäß durch beide Transformatoren gleichzeitig um dieselben Beträge geändert werden muß, so sind die beiden Spindeln durch eine Gelenkkette miteinander verbunden, und die Kontaktbürsten werden infolgedessen stets um die gleichen Wege verschoben.

Der Schalter ist entsprechend der obigen Schaltung (Fig. 210) so ausgeführt, daß er die Zusatzspannung zur Leitungsspannung hinzu- oder ihr entgegenschaltet. Zu diesem Zwecke erhält die Kontaktbahn für jede Anschlußleitung der Sekundärwicklung zwei Kontakte, die in der Aufeinanderfolge der Wicklungsstufen hintereinander in zwei Gruppen angeordnet sind.

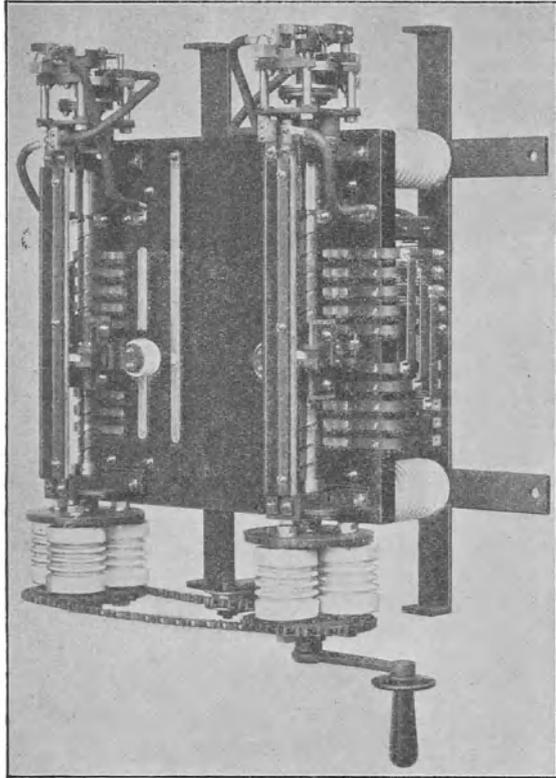


Fig. 211. Windungs- oder Stufenschalter mit Handantrieb.

Außer den beiden oberhalb der Spindel gelegenen Gleitschienen, die den Strom der Kontaktbürsten fortleiten, und die über den Funkenentzieher (f, f_1) bzw. Übergangswiderstand mit dem einen, vom Stromerzeuger kommenden Ende der Leitung in Verbindung stehen, ist auf der marmornen Grundplatte gleichlaufend mit der Kontaktbahn ein zweites Gleitschienenpaar verlegt, das von einer am Schlitten isoliert befestigten Schleifbürste überbrückt wird. Dieses dient zum Vertauschen der Endanschlüsse der Sekundärwicklung vor dem Einschalten in die Leitung. Die eine dieser Gleitbahnen erstreckt sich durchlaufend über die ganze Länge der Kontaktbahn; an sie ist das andere Ende der Leitung, das zum Stromverbraucher führt, angeschlossen. Die zweite Gleitbahn ist in der Mitte unterbrochen. Jeder Teil hat die Länge einer Kontaktgruppe, und ist mit einem Endkontakt einer Gruppe so verbunden, daß abwechselnd beide Endanschlußstellen der Sekundärwicklung an das abführende Leitungsende angelegt werden können.

In halber Höhe der Kontaktbahn liegt zwischen dem Ende der einen und dem Anfange der anderen Kontaktgruppe und ebenso zwischen den beiden Teilen der unterbrochenen Gleitbahn je ein Kontakt. Beide stehen miteinander in unmittelbarer Verbindung. Es geht daher der ankommende Strom, wenn die Bürsten in der Mitte der Kontaktbahn stehen, zur Verbrauchsstelle, ohne die Unterspannungswicklungen zu durchfließen. Beim Verschieben der Bürsten aus dieser Stellung auf- oder abwärts wird die eine oder die andere Endanschlußstelle der Sekundärwicklung an das abführende Leitungsende angeschlossen, und es werden dann mit zunehmender Verschiebung stufenweise die einzelnen Gruppen von Windungen in dem einen oder anderen Sinne eingeschaltet.

Liegen an den Enden langer Leitungsstrecken Transformatoren, dann kann man den in ersteren bei einer bestimmten Belastung auftretenden Spannungsverlust, der naturgemäß als eine Spannungsänderung anzusehen ist, auch dadurch ausgleichen, daß man das Übersetzungsverhältnis der Transformatoren entsprechend wählt. Eine solche Ausführung hat aber den Nachteil, daß man in den einzelnen Stationen verschieden gewickelte Transformatoren erhält, und dadurch die Reservehaltung sowohl als auch eine Auswechslung oder Vertauschung der Transformatoren untereinander recht schwierig wird. Auch in solchen Fällen wird man deswegen vielleicht vorteilhafter Zusatztransformatoren (Fig. 210) zu den Haupttransformatoren z. B. in der einfachen und billigen Ausführung als Spartransformatoren benutzen, oder zum mindestens die Streckentransformatoren mit nur zwei oder drei allgemein festgesetzten Wicklungsabzweigen versehen lassen. Die einzelnen Wicklungsenden werden dann zu Klemmen auf dem Deckel des Transformators geführt. Hierdurch ist der oben geschilderte Nachteil behoben. Die Transformatoren werden in dieser Ausführung aber teurer und können unter Umständen bei geringeren als den normalen Spannungen nur mit kleinerer Belastung arbeiten, worauf besonders zu achten ist. Die Spannungsregelung muß hierbei durch Umklemmen der

Leitungen vorgenommen werden, wozu der Transformator jedesmal abzuschalten, also der Betrieb zu unterbrechen ist.

Diese Ausführung wird zur vorübergehenden Regelung kaum benutzt. Indessen ist sie dort am Platze, wo die Transformatoren auf die Erweiterung der angeschlossenen Anlagen berechnet sind, und das Übersetzungsverhältnis mit dem Anwachsen des Anschlußwertes bzw. der Ausdehnung des Sekundärnetzes dauernd geändert werden muß.

Soll die Spannung nicht sprunghaft geregelt, sondern auf jeden zwischen zwei bestimmten Grenzen liegenden Wert jederzeit leicht eingestellt werden können, dann muß man die unter 2) genannte Form benutzen.

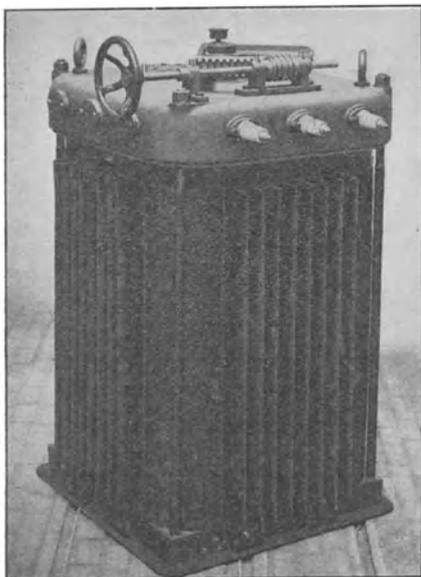


Fig. 212. Drehstrom-Induktionsregler mit Handantrieb (betriebsfertig).

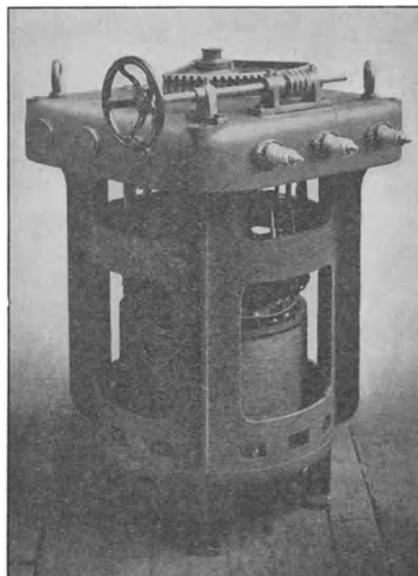


Fig. 213. Drehstrom-Induktionsregler mit Handantrieb (Kessel abgenommen).

c) Der drehbare Zusatztransformator (Induktions- oder Potentialregler). Während bei der Methode 1) entweder der Haupttransformator selbst zur Spannungsänderung benutzt werden konnte, oder dieser unverändert blieb und durch einen Zusatztransformator die Regelung erfolgte, handelt es sich hier nur um Zusatztransformatoren. Ein solcher Transformator — sowohl für Einphasen- als auch für Mehrphasenstrom ausführbar — ist nach Art eines asynchronen Induktionsmotors gebaut; er besteht aus einem Ständer und einem Läufer. Der letztere ist drehbar, kann aber nicht umlaufen, und er wird mittels eines Zahnrad- oder Schneckenradvorgeleges von Hand oder durch einen Elektromotor beliebig verstellt. Die Fig. 212 zeigt

einen derartigen Induktionsregler in betriebsfertigem Zustande (siehe auch Fig. 262) mit Handantrieb, während in Fig. 213 das mit Kühlrippen versehene Ölgefäß (Kessel) dieses Transformators abgenommen ist. Die Wicklungen liegen in Nuten. Der Luftzwischenraum zwischen Ständer und Läufer muß sehr klein bemessen werden, um einen möglichst guten magnetischen Schluß und einen hohen Leistungs-

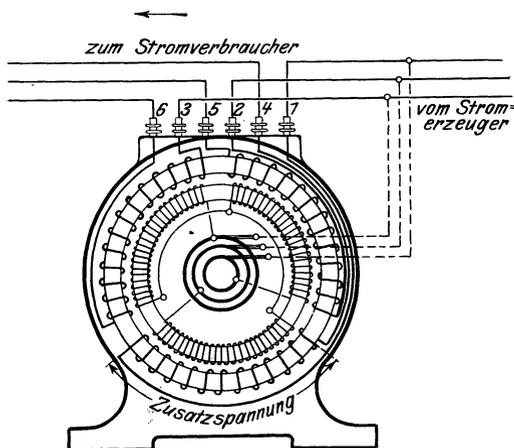


Fig. 214. Stromlaufschema des Drehstrom-Induktionsreglers (Zweispulentransformator).

faktor zu erhalten. Der Kessel wird mit Transformatoröl gefüllt. Neben dieser Form ist auch diejenige mit normalem Motorgehäuse (Fig. 220) vielfach in Gebrauch. Die Schleifringe und Bürsten werden fast stets durch fest angeschlossene, flexible Kabelstücke ersetzt, einmal um die der Aufsicht und Bedienung unterworfenen Teile möglichst zu beschränken, und ferner, weil bei hoher Spannung die Isolierung schwer herzustellen ist. Auch zur Vermeidung von Gefährdungen durch unbeabsichtigtes Berühren der

Bürsten läßt man dieselben besser fort. Mit Rücksicht auf die kurzen Drehbewegungen des Läufers sind Schleifringe keineswegs eine zwingende Notwendigkeit.

Ganz allgemein kann der Induktionsregler entweder nach Art des normalen Zweispulentransformators im Läufer und Ständer getrennte Wicklungen erhalten, oder auch als Autotransformator gebaut sein. Wann das

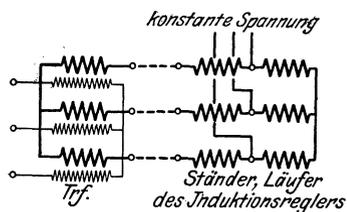


Fig. 215. Stromlaufschema des Drehstrom-Induktionsreglers (Autotransformator).

erstere oder das letztere am Platze ist, wurde schon früher erörtert. Die Fig. 214 zeigt das Stromlaufschema für die Zweispulensform und die Fig. 215 die Schaltung als Autotransformator mit vorgeschaltetem Haupttransformator (*Trf.*), auf den weiter unten noch besonders eingegangen werden wird.

Wie auf S. 50 bereits erwähnt wurde, ist ein stillstehender Wechsel- bzw. Drehstrom-Induktionsmotor nichts anderes als ein Transformator. Wird die Ständerwicklung an eine Wechselstromquelle mit konstanter Spannung angeschlossen, so wird in der Läuferwicklung ebenfalls eine Spannung induziert, deren Größe dem Übersetzungsverhältnisse beider Wicklungen entspricht. Diese Spannung ist unabhängig von der relativen

Lage zwischen Ständer und Läufer, hat also in jeder Stellung des Läufers zum Ständer zwischen Strom und Spannung einen konstanten Wert; dreht man den Läufer, dann wird aber die Phase geändert und zwar in ihrer Richtung um genau denselben Winkel, den in Phasengraden gerechnet (doppelte Polteilung = 360 Phasengrade) der drehbare zum feststehenden Teile einnimmt. Auf dieser Erscheinung beruht die Spannungsänderung mit Hilfe eines derartigen Transformators.

Zum leichteren Verständnisse des elektrischen Vorganges ist in Fig. 216 das Spannungsdiagramm für einen Drehstrom-Induktionsregler einfacherer Bauart gezeichnet. Die konstante Netzspannung d. h. die Spannung, die z. B. von der Überlandzentrale gehalten wird, sei:

$$E_1 = Oa = Ob = Oc;$$

die Spannung, die an den Klemmen des Läufers herrscht, sei:

$$E_z = aa' = aa''$$

(Zusatzspannung). Da sie sich ihrer Größe nach nicht ändert, ist sie im Diagramm gegeben als Radius eines Kreises um Punkt a bzw. b und c . Stehen sich die Pole von Ständer und Läufer genau gegenüber, so fällt E_z in die Richtung von E_1 , und es ist dann die resultierende Spannung:

$$E_k = E_1 + E_z,$$

bzw. bei einer Drehung des Läufers um 180° :

$$E_k = E_1 - E_z.$$

Für alle anderen Stellungen des Läufers zum Ständer ist E_k die Resultierende von E_1 und E_z , und zwar ändert sich E_k entsprechend dem jeweiligen Winkel α zwischen E_1 und E_z . Die im Induktionsregler erzeugte Spannung setzt sich also je nach der Stellung des Läufers in beliebiger Phase zur Netzspannung geometrisch zu. Hieraus geht hervor, daß diese Form der Spannungsregelung mit wattlosem Strome arbeitet, und daß die Klemmenspannung E_k in der Phase nicht konstant bleibt. Ein einfacher drehbarer Zusatztransformator kann daher mit anderen Transformatoren nicht ohne weiteres parallel geschaltet werden. Wird der Parallelbetrieb ausdrücklich verlangt — und das muß in ausgedehnten Netzen zumeist der Fall sein — so verwendet man statt eines Induktionsreglers zwei miteinander verbundene Transformatoren (Doppeltransformator), und schaltet die Ständerwicklungen parallel, während die Läuferwicklungen (Zusatzspannung) in Hintereinanderschaltung liegen. Die Primärwicklungen müssen dann derart miteinander verbunden sein, daß die Drehfelder in entgegengesetztem Sinne umlaufen.

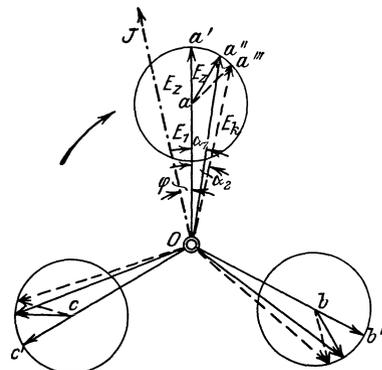


Fig. 216. Allgemeines Spannungsdiagramm eines Drehstrom-Induktionsreglers.

Die Läuferspannungen der beiden Einzeltransformatoren setzen sich hierbei zu einer Resultierenden zusammen, die stets mit der Leitungsspannung phasengleich ist. In dieser Schaltung ist ein einwandfreier Parallelbetrieb mit anderen Transformatoren möglich.

Die Fig. 217 zeigt nun das vollständige Schaltungsschema eines Drehstrom-Induktionsreglers, der selbsttätig mittels eines Spannungsrelais durch einen Elektromotor verstellt wird. Zunächst sei, wie schon vorher kurz angedeutet, erwähnt, daß ein solcher Regler nicht für alle Hochspannungen gewickelt werden kann, sondern oftmals noch einen

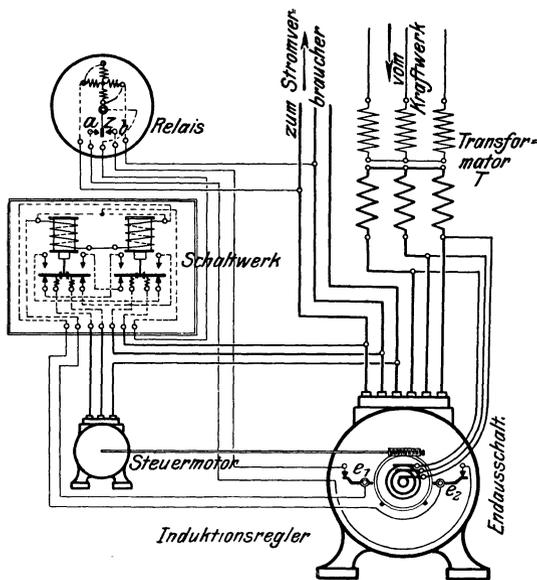


Fig. 217. Schaltungsschema eines selbsttätigen Drehstrom-Induktionsreglers mit motorischem Antriebe und Steuerrelais.

besonderen Transformator (Reduktions- oder Isolationstransformator) nötig hat, an dessen Unterspannungsseite er angeschlossen wird. Dieser Fall ist sowohl in Fig. 215 als auch in Fig. 217 angenommen worden. Die vom Kraftwerke kommende Spannung wird also vorerst im Transformator *T* herabgesetzt und dann dem Ständer oder auch dem Läufer des Reglers zugeführt. Im einen Falle wird der Läufer, im anderen Falle der Ständer in Reihe mit der Leitung, deren Spannung geändert werden soll, gelegt. In der Regel ist der feststehende Teil ans Netz geschaltet. Mit Hilfe des „Relais“ und des „Schaltwerkes“ wird nun der kleine „Steuermotor“ und dadurch der Induktionsregler gesteuert. Je nachdem sich die Kontaktzunge *z* des Relais an den linken oder rechten Kontakt (*a* oder *b*) legt, zieht der linke oder rechte Magnet des Schaltwerkes die Kontaktplatte an und schließt dadurch den Stromkreis des Steuermotors abwechselnd in einem solchen Sinne, daß der Motor links oder rechts umläuft. Hierdurch ändert sich die Stellung des Läufers und mithin die Spannung im Konsumgebiete. Das Relais ist von der letzteren abhängig. Das Schaltwerk wird aus dem Grunde benutzt, um die Energie, die durch das Relais zu schalten ist, so klein wie möglich zu machen und dadurch die Empfindlichkeit sowie die Lebensdauer und Betriebssicherheit desselben

zu erhöhen. Steht die Zunge z in der Mittellage, dann ist der Motor abgeschaltet.

Um eine zu weite Drehung des Läufers beim Antriebe durch den Motor zu verhüten, sind Endausschalter (e_1 und e_2) vorgesehen, die den Stromkreis des Steuermotors im geeigneten Augenblicke unterbrechen.

Die Schaltskizze (Fig. 218) zeigt noch die Wicklungsschaltung des Reglers in der Ausführung als Einfachregler mit Haupttransformator.

Handelt es sich um größere Leistungen, dann ist es unter Umständen erforderlich, den Induktionsregler künstlich zu belüften, weil derselbe infolge der ungünstigeren Abkühlungsverhältnisse gegenüber einem Motor, dessen Läufer die Ventilationsarbeit übernimmt, um etwa 30 bis 40% größer ausfällt als ein Einphasen- oder Drehstrommotor gleicher Leistung. Ausgenommen sind dagegen solche Fälle, wo die maximale Belastung nur vorübergehend oder intermittierend auftritt.

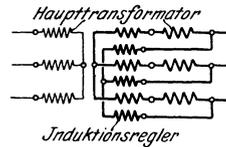


Fig. 218. Stromlaufschema des Induktionsreglers in Fig. 217.

Die Maschinenfabrik Oerlikon hat z. B. eine derartige Anlage ausgeführt, bei der ein von einem kleinen Drehstrommotor ($D_A.M.$) angetriebener Schraubenventilator dem über einem gemauerten Schachte aufgestellten Transformator $Trf.$ und dem Induktionsregler Frischluft zubläst. In Fig. 219 ist die Gesamtanordnung abgebildet. Bei Benutzung solcher Kühlvorrichtungen, die aber nur dort am Platze sind, wo die Bedienung und Aufsicht nicht ganz innerhalb eines Tages ermangelt, ist es unter Umständen möglich, kleinere Modelle für den Regler und den Reduktionstransformator zu erhalten, und dadurch die Anlagekosten zu verringern. Statt eines besonderen Ventilators und Druckluftkanales kann man auch den Ventilator in das Reglergehäuse einbauen, sofern dasselbe z. B. einem normalen Motorgehäuse entspricht, und denselben dann durch einen kleinen angebauten Motor antreiben. In Fig. 220 ist eine derartige Ausführung von Brown, Boveri & Cie. dargestellt, die in Anlage- und Beschaffungskosten natürlich billiger ausfällt, aber durch die Leistung des Reglers begrenzt ist.

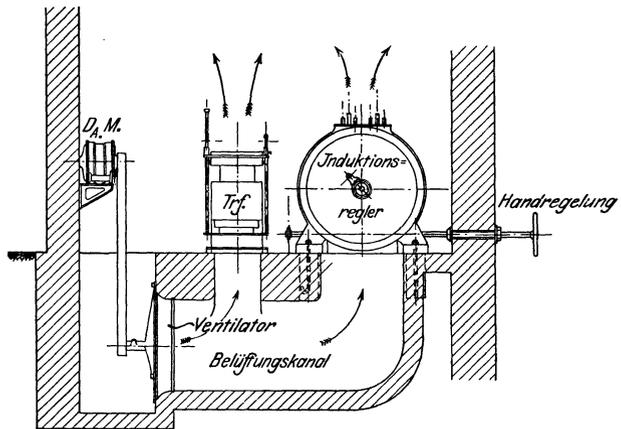


Fig. 219. Aufstellung eines Induktionsreglers mit künstlicher Belüftung des Haupttransformators und des Reglers durch einen Ventilator.

Statt eines besonderen Ventilators und Druckluftkanales kann man auch den Ventilator in das Reglergehäuse einbauen, sofern dasselbe z. B. einem normalen Motorgehäuse entspricht, und denselben dann durch einen kleinen angebauten Motor antreiben. In Fig. 220 ist eine derartige Ausführung von Brown, Boveri & Cie. dargestellt, die in Anlage- und Beschaffungskosten natürlich billiger ausfällt, aber durch die Leistung des Reglers begrenzt ist.

Die Unterschiede bzw. Hauptvorteile des Induktionsreglers gegenüber dem Stufentransformator sind nun zusammengefaßt die folgenden: Der Hauptstrom hat nur eine feste Wicklung, also keine gleitenden oder verstellbaren Teile zu durchfließen, sofern der Ständer an der Hochspannungsleitung liegt; im anderen Falle sind bei hochgespanntem Strome und Fortfall von Schleifringen Bürstenfeuer und sonstige unliebsame Erscheinungen beim Regeln vermieden. Die Änderung der Spannung geht gleichmäßig und stetig vor sich. Schließlich ist die Zusatzspannung von der jeweiligen Stärke des Hauptstromes unabhängig, was beim Stufentransformator nicht der Fall ist.

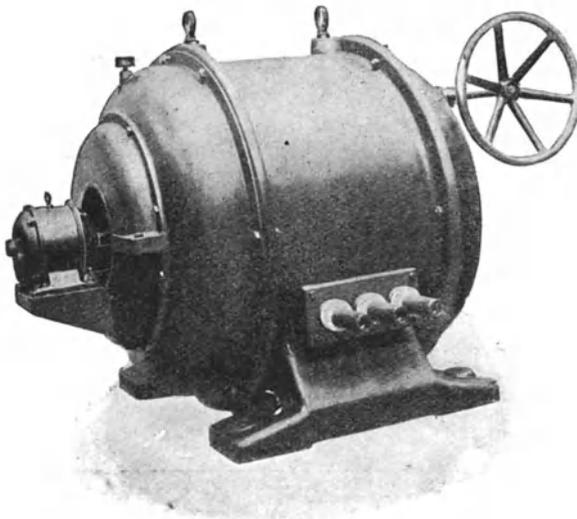


Fig. 220.

Jeder Potentialregler muß natürlich wie auch der Stufentransformator derart in den zu regelnden Stromkreis eingebaut werden, daß er leicht und ohne Betriebsstörung aus- und eingeschaltet werden kann. Bei dem Stufentransformator mit Windingsschalter nach Fig. 210 und dem Doppelinduktionsregler ist das ohne Schwierigkeit möglich, weil beide Apparate die Einstellung der Zusatzspannung auf den Wert Null zulassen. Dann genügen einfache Trennschalter in einem zum Regeltransformator

zu verlegenden parallelen Umgehungsstromkreise. Beim einfachen Induktionsregler ist diese Schaltung nicht ohne weiteres zulässig, weil hier die Spannung nicht auf Null gebracht werden kann, und ein Kurzschluß entsteht, sobald der Regler zu dem Umgehungsstromkreise ohne besondere Hilfsmittel parallel geschaltet wird. Man muß daher für diesen Fall einen besonderen Anlaßschalter benutzen, oder den Regler unerregt, d. h. ohne daß der Ständer in der Hochspannungsleitung liegt, zu- bzw. abschalten, wodurch indessen Spannungsschwankungen entstehen, weil in der Wicklung ein induktiver Spannungsabfall auftritt, der erst verschwindet, sobald der Regler erregt ist.

Neben der Aufgabe, die Spannung zu ändern kann der Induktionsregler auch noch in Mehrphasenanlagen zum Kompensieren bei ungleich belasteten Phasen und bei Hochspannungsanlagen mit langen Kabelstrecken zum allmählichen Unterspannungsetzen der Kabel (Anlassen der Kabel) benutzt werden. Bei der

letzteren Anwendungsform sind Kabeldurchschläge bei plötzlichem Einschalten langer Strecken infolge von Überspannungen leichter zu vermeiden. In den Fig. 221 bis 224 sind nun einige dieser Schaltungen

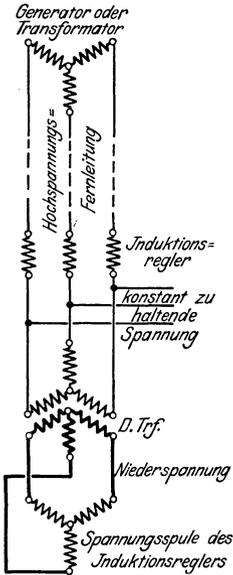


Fig. 221.

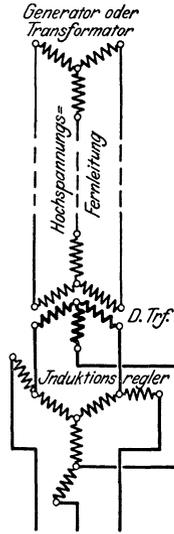


Fig. 222.

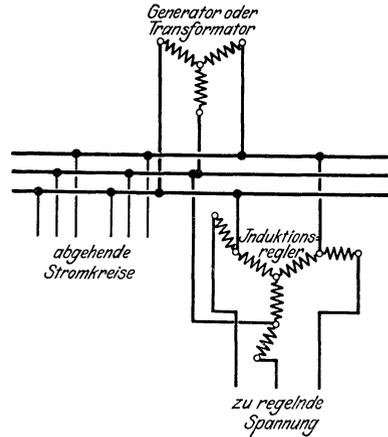


Fig. 223.

von Induktionsreglern für verschiedene Zwecke zusammengestellt, die des Interesses wegen noch kurz behandelt werden sollen.

Die Fig. 221 bezieht sich auf eine Anlage mit Hochspannung bis etwa 5000 Volt, bei welcher der Ständer des Reglers unmittelbar in der Leitung liegt, während der Läufer Strom über einen Reduktionstransformator erhält. In Fig. 222 ist die Wicklung des Reglers in der Form als Autotransformator ausgeführt, und es ist eine Kabelstrecke anzulassen. Andere Anwendungsmöglichkeiten sind in den Fig. 223 und 224 gezeichnet, und zwar einmal für die Spannungsänderung in nur einem Niederspannungsstromkreise, das andere Mal gleichzeitig für mehrere an gemeinsame Sammelschienen angeschlossene Verteilungsleitungen eines größeren Kraftwerkes bzw. Transformatorenhauses.

Schließlich sei noch auf Fig. 124 hingewiesen, wo der drehbare Zusatztransformator für einen mit veränderlicher Spannung arbeitenden Einankerumformer benutzt wird, und auf die Fig. 251 bzw. 262, die indessen erst auf S. 331 Erklärung finden.

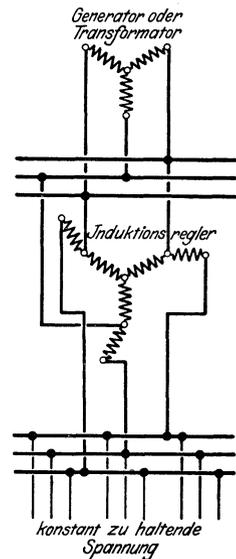


Fig. 224.

J. Der Aufbau vollständiger Transformatorenanlagen im allgemeinen.

46. Das Schaltungsschema, die Apparate und die Instrumente im allgemeinen.

a) Das Schaltungsschema. Bevor man nun zum Entwurfe einer Transformatorenanlage oder überhaupt einer elektrischen Anlage, zur Feststellung des Raumbedarfes bzw. zur Ausgestaltung der Baulichkeiten und zur Ermittlung der Kosten übergehen kann, muß ein Schaltungsschema d. h. eine Zeichnung hergestellt werden, aus der hervorgeht, wie der oder die Transformatoren in sich geschaltet sind, wie sie mit den Hoch- und Niederspannungsstromkreisen verbunden werden müssen, und welche Apparate und Instrumente notwendig, verlangt oder erwünscht sind. Das Schaltungsschema bildet das Gerippe für die Gesamtanlage, gleichgültig ob nur ein kleiner Transformator mit einem Anschluß oder mittlere und große Stationen in Frage kommen, und es erfordert daher der Entwurf desselben ganz besonders sorgfältige Überlegung, insbesondere wenn man sich vor Augen hält, wie mannigfaltig gerade die Transformatorenschaltungen und die Aufgaben sind, die mit Hilfe dieser so außerordentlich einfachen und wirtschaftlich arbeitenden Apparate in dem großen Gebiete der Wechselstrom-Kraftübertragung gelöst werden können.

Nach dem Schaltungsschema richtet sich sowohl der vollständige Aufbau einer Transformatorenstation, demnach also der Preis der Anlage, als auch die Bedienung, Aufsicht, Betriebsführung und Betriebssicherheit aller Einrichtungen. In jeder Anlage muß ferner nach den Vorschriften des V. D. E. ein solches Schaltungsschema vorhanden und deutlich sichtbar befestigt sein, damit man sich jederzeit über den Stromlauf, die Zugehörigkeit von Apparaten zu den einzelnen Stromkreisen usw. schnell unterrichten kann. Das ist insbesondere bei der Betriebsregelung und bei Untersuchungen bzw. Instandsetzungsarbeiten an einzelnen Leitungsteilen unbedingt notwendig, um Gefährdungen einerseits der Arbeiter oder andererseits auch z. B. der Niederspannungsstromkreise durch falsche Schaltungen auf den Hochspannungsseiten zu verhüten.

Der Besprechung ausgeführter Anlagen kleiner und größter Leistungen und Spannungen soll nun zunächst die Behandlung der allgemeinen Gesichtspunkte für den Entwurf eines Schaltungsschemas und für die Wahl der Apparate und Instrumente vorangehen, damit der projektierende Ingenieur in erster Linie kennen lernt, wie er bei seinen Überlegungen vorzugehen hat. Bei der großen Zahl der Schaltungsverschiedenheiten und der Stationsausrüstungen ist es natürlich nicht möglich, alle Schemas hier kennen zu lernen, dafür werden aber die gegebenen Schaltbilder nicht nur beschrieben, sondern auch kritisch

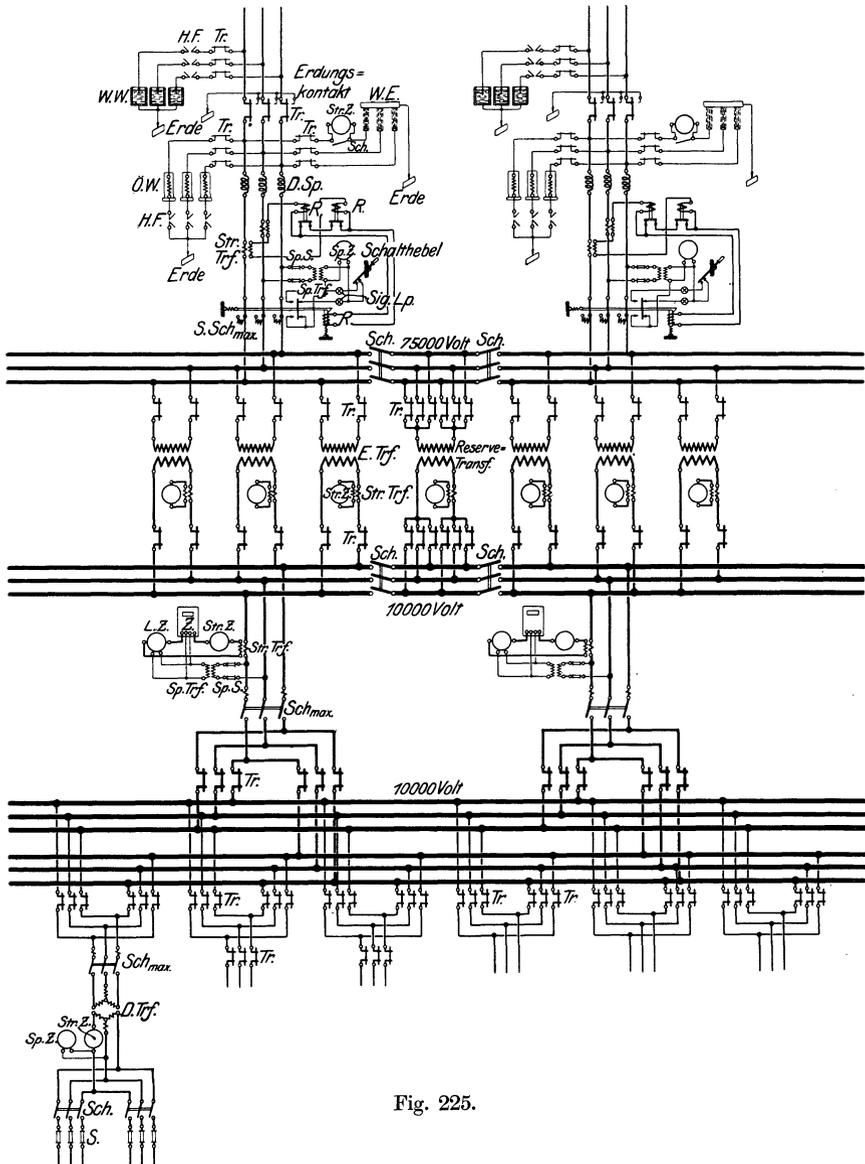


Fig. 225.

geprüft werden. Ferner sind nur Drehstromanlagen in die Betrachtung gezogen worden, weil diese Stromart für Kraftübertragungen heute in der Mehrzahl der Fälle zur Anwendung kommt, Einphasenstrom dagegen zurzeit nur für Bahnzwecke benutzt wird, und es ist dann nicht schwer, aus dem Gesagten für Ein- und Zweiphasenanlagen entsprechende Schlüsse zu ziehen.

Als eine Hauptbedingung für jede Anlage ist in erster Linie zu fordern, daß der Aufbau derselben tunlichst einfach gestaltet, an Apparaten und Instrumenten nichts zu viel, aber auch nichts zu wenig genommen wird, und daß die Wahl und die Anordnung der Apparate in den Ober- und Unterspannungsstromkreisen streng nach dem Charakter der Anlage (Strecken-, Grubentransformator), der Höhe der Spannung und Energie, der geforderten Betriebssicherheit und dem Betriebswerte der Station (Hauptstation, kleine Nebenanlage von nicht allzu großer Bedeutung usw.) getroffen wird. Ganz allgemeine Regeln können selbstverständlich auch hier wiederum nicht aufgestellt werden, weil z. B. schon jede Elektrizitätsfirma verschiedene Apparate und Normalien besitzt, jede Betriebsverwaltung besondere, oft auf jahrelange Erfahrungen gestützte Wünsche berücksichtigt wissen will u. dgl. Indessen gibt es doch eine Reihe von Gesichtspunkten, die gewissermaßen als die Ausführung der Hauptbedingung anzusehen sind, und nunmehr behandelt werden sollen. An der Hand der dann folgenden Besprechung ausgeführter Anlagen wird der Stoff dieses Abschnittes noch erweitert.

Um die einzelnen Apparate kennen und ihre Verwendbarkeit prüfen zu können, sollen die Erklärungen sofort an einem praktischen Beispiele und zwar an dem Schaltungsschema Fig. 225 der Reihe nach vorgenommen und wo erforderlich durch besondere von diesem Schema unabhängige Abbildungen ergänzt werden. Der Fig. 225 ist eine Drehstrom-Transformatorenstation für 2×5000 KW bei 75 000 Volt Ober- und 10 000 Volt Mittelspannung zugrunde gelegt. Es sind zwei Hochspannungszuführungsleitungen, zwei Transformatoren, fünf abgehende Mittelspannungsstromkreise und ein kleiner Transformator für die Station selbst sowie für einen Niederspannungsanschluß vorhanden.

b) Die Trennmesser (Trennschalter, Abschalter). Um die Transformatorenstation in einzelnen Teilen oder vollständig von der Hochspannung leicht abtrennen zu können, ohne daß die Fernleitungen jedesmal im Kraftwerke spannungslos gemacht, also abgeschaltet zu werden brauchen, was namentlich dann, wenn an diesen Leitungen noch andere Stationen parallel zueinander angeschlossen sind, nicht statthaft ist, müssen Schalter vorhanden sein, die diesen Zweck leicht erfüllen lassen. Die Hauptschalter hierzu zu benutzen, ist bei Spannungen über etwa 750 Volt aus dem Grunde nicht möglich, weil die Klemmen dieser Schalter, und damit natürlich die Schalter selbst auf der Seite der ankommenden Leitungen unter Spannung stehen bleiben würden, und eine Untersuchung derselben nur möglich wäre, wenn die betreffende Leitung in der Zentrale ausgeschaltet wird. Das soll aber unter allen Umständen vermieden werden, und daher fügt man unmittelbar hinter der Einführung der Hochspannungsleitungen in das Gebäude in dieselben sog. Trennmesser (Abschalter) *Tr.* ein, die in einfachster Art aus drehbar gelagerten Kupferstücken bestehen und wohl für die Spannung isoliert, nicht aber für die Unterbrechung des Stromkreises bemessen sein sollen, wenn derselben noch Energie führt. Die Leerlaufenergie der Transformatoren wird mit dem Haupt-

schalter abgeschaltet. In Fig. 226 ist ein solcher einpoliger Trennschalter abgebildet. Die Bedienung desselben erfolgt mit Hilfe einer Schaltstange, die aus einer Bambus- oder Holzstange besteht, an deren oberem Ende ein eiserner Haken befestigt ist. Bei hohen Spannungen ist dieser Haken gegen die Stange durch Einfügen eines Isolierstückes (Isolators od. dgl.) zu isolieren, um jede Gefährdung des die Schalter Bedienenden auch bei feuchter Stange zu vermeiden. Außerdem ist der eiserne Haken vorteilhaft noch durch eine besondere Erdleitung zu erden. Liegen die Trennschalter im Gebäude sehr hoch, so daß sie unbequem und nur mit sehr langen, demnach schweren und unhandlichen Schaltstangen zugänglich sind, dann betätigt man dieselben besser mittels Seilzug und Kurbel, wie ein solcher in Fig. 242 abgebildet ist oder unter Benutzung von fest montierten Gestängeantrieben (Fig. 246). Auch hier ist auf eine dauernd zuverlässige Erdung aller Eisenteile besonders zu achten.

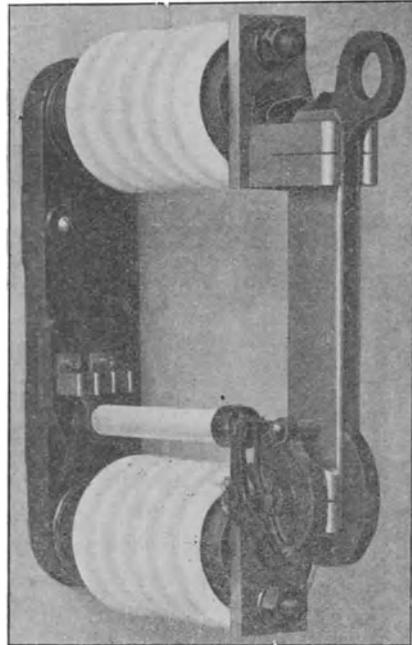


Fig. 226. Einpoliger Trennschalter für 30 000 Volt mit Signalkontakt.

Daß solche Trennschalter unbedingt notwendig sind, nicht nur um die ankommende Hochspannungsleitung abzutrennen, sondern um auch andere Teile der Anlage jederzeit und ohne Störung des Betriebes spannungslos machen zu können, wie z. B. Überspannungsschutzapparate, abgehende Stromkreise, Sammelschienenabschnitte usw., zeigt schematisch die Fig. 227. Jede Fernleitung ist im Kraftwerke und in den parallel

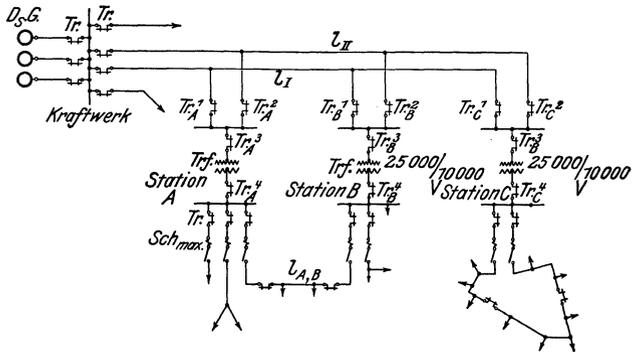


Fig. 227. Schema für den Einbau von Trennschaltern in einer Hochspannungsanlage.

an diesen (l_I und l_{II}) liegenden Transformatorstationen mit Abschaltern $Tr.$ versehen. Soll z. B. in der Fernleitung l_I gearbeitet werden, so sind die Trennschalter im Kraftwerke und in den Stationen ($Tr.^1_A$, $Tr.^1_B$, $Tr.^1_C$) zu öffnen, da anderenfalls die Leitung l_I über l_{II} und die Sammelschienen in einer der Stationen unter Spannung stehen würde, selbst wenn sie im Kraftwerke abgeschaltet wäre. Sind andererseits z. B. in der Station B auf der Hochspannungsseite des Transformators Untersuchungen vorzunehmen, so ist $Tr.^3_B$ und $Tr.^4_B$ zu öffnen. Wird $Tr.^4_B$ nicht ausgeschaltet, so würde der Transformator infolge der Verbindungsleitung $l_{A,B}$ rückwärts transformieren und damit die Hochspannungsseite wieder unter Spannung setzen. Soll schließlich ein Teil des sekundären Ringverteilungsnetzes der Station C untersucht oder erweitert werden, dann ist der benachbarte Streckentrennschalter und der zugehörige Sammelschientrennschalter zu öffnen.

Die Fig. 227, die besonders zu studieren dem Leser dringend empfohlen werden kann, läßt erkennen, wie außerordentlich vorsichtig man in der Wahl der Trennstellen sein muß, um größte Elastizität in der Betriebsfähigkeit der Anlage auch bei Störungen zu besitzen und andererseits die Arbeiter bei Untersuchungen usw. nicht zu gefährden.

Ähnliches trifft auch für das Schema der Fig. 225 zu. Jeder der sechs zu insgesamt zwei Dreiphasentransformatoren verbundenen Einphasentransformatoren $E.Trf.$ erhält Trennschalter in allen Phasen, desgleichen der Reservetransformator, sowie die 75 000- und 10 000-Volt-Stromkreise und die Blitz- und Überspannungsschutzapparate. Schließlich ist auch der kleine Stationstransformator unter Einfügung von Trennmessern an die 10 000-Volt-Sammelschienen angeschlossen.

Wenn es die Betriebsführung nur irgendetwas zuläßt, ist natürlich mit Abschaltern zu sparen, da sie Geld und Platz beanspruchen, und so weicht z. B. die Fig. 229 gegenüber der Fig. 225 nach dieser Richtung insofern ab, als die 75 000-Volt-Ölschalter $S.Sch._{max}$ in Fig. 225 nicht beiderseitig zwischen Trennschaltern liegen. Das hat seinen Grund darin, daß bei Untersuchungen oder Reparaturen an einem der beiden Transformatorstromkreise dieser vollständig außer Betrieb gesetzt werden kann, ohne einen Teil der abgehenden Linien dann ebenfalls ausschalten zu müssen. Hier helfen die zwei Sammelschienensysteme, auf die indessen erst weiter unten näher eingegangen werden wird. Die in einem solchen Falle insgesamt noch zu übertragende Energie ist natürlich auf die Hälfte zurückgegangen, doch ist das bei den normalen Untersuchungen und Prüfungen nicht von besonderer Bedeutung, wenn man bedenkt, daß diese an den Sonntagen, in den späteren Abend- und Nachtstunden oder am Tage, wenn kein Beleuchtungsstrom zu liefern ist, vorgenommen werden. Damit auch die entsprechenden Teile der Sammelschienen spannungslos gemacht werden können, sind ebenfalls Schalter eingebaut, die z. B. in Fig. 231 als Trennmesser und in Fig. 225 als Ölschalter $Sch.$ ausgeführt sind; letzteres ist deshalb geschehen, um den Reservetransformator auch während des Betriebes, also wenn die Sammelschienen Energie führen, zu- oder abschalten, und ferner

ohne Betriebsunterbrechung Verschiebungen in der Stromabgabe der Sammelschienen vornehmen zu können, was mit Trennmessern, weil sie beim Schalten unter Strom beschädigt werden könnten, nicht durchführbar ist.

Wenn die Trennschalter in der Station für einen Stromkreis in verschiedenen Stockwerken angeordnet sind, so empfiehlt es sich, sie noch mit besonderen Hilfskontakten auszurüsten, die dazu dienen, in einer bestimmten Stellung der Abschalter Signallampen, Alarmglocken usw. zu betätigen. Auf diese Weise können falsche Schaltungen mit Hilfe der Trennmesser und vor allen Dingen Unglücksfälle beim Arbeiten in einem Stromkreise durch Rücktransformierung vermieden werden. Die Fig. 226 zeigt diesen Hilfsschalter am Abschalter. Die Signallampen sollen stets dann leuchten, wenn die Schalter offen sind. Bei mehreren in verschiedenen Stockwerken liegenden Trennmessern eines Stromkreises werden die Lampen jedes Schalters vorteilhaft in Reihe geschaltet, um dadurch sofort prüfen zu können, ob etwa eine Lampe oder der Hilfsstromkreis defekt ist.

Schließlich kann man die Trennschalter auch noch derart ausführen, daß sie im geöffneten Zustande die abgeschaltete Anlage erden (Fig. 238), oder man benutzt sie unmittelbar zur Erdung im Betriebe befindlicher Leitungen, Sammelschienen usw., um letztere in Gefahrenfällen sofort spannungslos machen zu können. Schaltungen für diesen Zweck sind in Fig. 232 dargestellt.

Die Anwendung solcher Trennschalter beginnt etwa von 750 Volt an aufwärts, weil Arbeiten an Apparaten unter Spannung auch mit Isolierzangen, Gummihandschuhen usw. über 750 Volt vorzunehmen nicht mehr ratsam ist. Unterhalb dieser Spannung sind sie im Preise ungefähr den gewöhnlichen Hebelschaltern gleich, und es würde ihre Benutzung dann gewissermaßen nur eine Verdoppelung der letzteren bedeuten, was nicht zu ihrer Aufgabe gehört. Bei Spannungen über etwa 50 000 Volt läßt man den beim Öffnen des Kontaktes entstehenden Lichtbogen unter Öl vernichten, um die Kontakte zu schonen und die Erzeugung von Überspannungen (siehe S. 294) zu verhüten. In der Mehrzahl der Fälle, und zwar dann, wenn zuverlässiges Bedienungspersonal und genügender Platz für den Einbau zur Verfügung steht, führt man die Trennschalter einpolig aus, weil bei richtig bemessenem Abstände zwischen den Absaltern in den einzelnen Phasen ein Kurzschluß durch den beim Ausschalten auftretenden Lichtbogen zwischen zwei Phasen nicht eintreten kann. Sind dagegen die Platzverhältnisse beschränkt oder muß die Betätigung der Abschalter gewöhnlichen, ungelerten Arbeitern übertragen werden, dann wählt man besser die Trennschalter z. B. für Drehstrom dreipolig. Es gibt ferner noch eine Reihe von Spezialkonstruktionen, so z. B. für Doppelsammelschienen, Umschalter, horizontal- und vertikalliegende Schaltmesser usw., auf die hier indessen nicht weiter eingegangen werden kann. Solche Bauformen richten sich natürlich ganz nach den örtlichen Verhältnissen.

c) Sicherungen und Schalter. Da die Trennmesser nichts anderes sein dürfen, als lediglich ein leicht lösbarer Teil der Leitungen, ein betriebsmäßiges Ein- und Ausschalten der Transformatoren bzw. der einzelnen Leitungsstrecken mittels derselben also nicht statthaft ist, müssen demnach noch besondere Schalter in jedem Stromkreise vorhanden sein. Ferner ist jeder Transformator und jede Streckenleitung gegen unzulässige Überlastungen und Kurzschlüsse zu sichern.

Bevor über die Sicherungen und Schalter hinsichtlich ihrer Anordnung im Schaltungsschema gesprochen wird, mag der Vollständigkeit wegen schon hier einiges über die Ausführung und Verwendung dieser beiden Apparate gesagt werden. Eine ausführliche Behandlung finden dieselben indessen erst im II. Bande.

Die Sicherungen zunächst sind in Wechselstromanlagen nicht in gleich vorteilhafter Weise benutzbar wie das bei Gleichstrom der Fall ist. Wenn sie auch bis etwa 20 000 Volt und verhältnismäßig hohe Stromstärken für Wechselstrom gebaut werden, so haben sie aber zwei grundsätzliche Nachteile, die darin liegen, daß sie einmal beim Ansprechen, also beim Schmelzen des Sicherungsstreifens Überspannungen¹⁾ durch den sich bildenden Lichtbogen erzeugen und ferner eine große Trägheit bis zum Ansprechen besitzen. Das erstere kann zur Beschädigung der Transformatoren führen, und hat Feuergefahr durch den auftretenden Lichtbogen im Gefolge, die, um sie zu beseitigen, den Einbau von feuerfesten Zwischenwänden zwischen den einzelnen Sicherungen desselben Stromkreises und gegen benachbarte fremde Stromkreise, sowie feuerfeste Decken über den Sicherungen und gegebenenfalls auch derartige Rückwände notwendig macht. Das erfordert dann weiter wieder größere Raumabmessungen und teure Montage. Die Trägheit andererseits, die in der Länge der Zeit zwischen der Überlastung des Stromkreises und dem Schmelzen der Sicherung liegt, kann ohne Willen so groß sein, daß der Transformator bereits Schaden genommen hat, bevor noch die Sicherungen den Stromkreis unterbrochen haben. Diese Trägheit durch die Verwendung dünnerer Schmelzstreifen zu verringern hätte den Nachteil, daß das Ansprechen der Sicherung schon bei einer noch ungewollten Überlastung eintritt, wodurch dann der Betrieb in unzulässiger Weise gestört werden würde. Ferner kommt es dabei häufig vor, daß in Drehstromanlagen nicht alle drei Sicherungen gleichzeitig durchbrennen (abschmelzen), sondern nur eine oder zwei derselben. Dann arbeitet im ersteren Falle aber die Drehstromanlage einphasig, die an-

¹⁾ Unter Überspannung versteht man eine solche Spannung innerhalb eines Stromkreises, die durch Betriebsvorkommnisse oder atmosphärische Erscheinungen erzeugt wird und um ein Vielfaches höher liegt, als die dem Stromkreise vom Kraftwerke, also den Generatoren aufgedrückte. Diese Spannungserhöhungen entstehen z. B. beim Ausschalten eines belasteten Stromkreises im Stromkreise selbst, herrührend aus der Eigentümlichkeit des Wechselstromes an sich und dem scheinbaren Widerstande bzw. der Kapazität, die dem Stromkreise innewohnen, durch atmosphärische Entladungen u. dgl.

geschlossenen Motoren werden einphasig betrieben (siehe S. 85), außerordentlich überlastet und fallen entweder ab oder bringen die ihnen vorgeschalteten Sicherungen bzw. die selbsttätigen Schalter im Hauptstromkreise zum Ansprechen, sie können gegebenenfalls Schaden nehmen, wie natürlich auch der Transformator selbst. Schließlich sei noch erwähnt, daß Hochspannungssicherungen namentlich dann, wenn größere Energiemenge z. B. bei parallel geschalteten Transformatoren vorhanden sind, explosionsartig ansprechen, und dadurch die umliegenden Teile der Anlage außerordentlich gefährden. Der billigere Preis gegenüber den Ölschaltern sollte daher für die Benutzung der Sicherungen in Hochspannungsanlagen niemals den Ausschlag geben. In erster Linie spielt vielmehr die Betriebssicherheit der Gesamtanlage die Hauptrolle.

Das über die Überspannungsgefahr Gesagte gilt bei Hochspannung über etwa 1000 Volt auch für die Schalter, wenn sie als einfache Hebelschalter ausgebildet sind, also den Lichtbogen beim Ausschalten in der freien Luft bilden können. Dabei besteht ferner noch die Gefahr, selbst wenn die Kontakte durch eine Schutzkappe abgedeckt sind, daß der Bedienende sich an dem Lichtbogen, der aus dem Schlitz für den Hebel austreten kann, verbrennt, oder der Lichtbogen nicht sofort zum Verlöschen gebracht wird, und der Schalter dann verbrennt, Kurzschluß verursacht und ähnliches mehr. Man sollte daher, wie die Praxis zur Genüge bewiesen hat, über 1000 Volt in Wechselstromanlagen trotz des etwas höheren Preises an Stelle von Sicherungen und Luftschaltern nur selbsttätig wirkende Ölschalter verwenden.

Bei den Ölschaltern, deren Schaltmesser in einem mit Öl gefüllten, aus Eisenblech oder Gußeisen gefertigten, vollständig gegen die Umgebung abgedichteten Kasten liegen, kann eine Lichtbogenbildung beim Ausschalten nicht stattfinden, weil die Stromunterbrechung unter Öl erfolgt. Diese Schalter werden in Mehrphasenanlagen stets derart ausgeführt, daß eine Unterbrechung in allen Phasen gleichzeitig und sicher vor sich geht. Bei Einphasenanlagen genügt ein einpoliger Schalter, während bei unverketteten Zweiphasentransformatoren zwei einpolige und bei verkettetem Zweiphasenstrom ein dreipoliger Schalter am einfachsten für den Mittelleiterstrom bemessen zu verwenden sind. In Drehstromnetzen, auch solchen mit viertem Leiter, genügen zumeist dreipolige Schalter, deren Messer entweder zusammen in einem Ölkessel liegen, oder die bei sehr großen Stromstärken bzw. hohen Spannungen aus drei einpoligen Schaltern (Einkesselschalter) zusammengesetzt sind, die aber mechanisch starr miteinander verbunden sein müssen, damit aus den bereits oben genannten Gründen die Unterbrechung stets gleichzeitig in allen drei Phasen vor sich geht. Die Auflösung des dreipoligen Schalters in drei Einzelschalter ist auch dort empfehlenswert, wo die Gesamtenergie einer Anlage, die sich auf mehrere in einer Station untergebrachte und parallelgeschaltete Transformatoren verteilt, groß ist, weil im Falle eines Kurzschlusses z. B. in einem Transformator die anderen Transformatoren sofort alle auf diesen Kurzschluß arbeiten

werden, und dann die Unterbrechung der gewaltigen Energiemengen in einem dreipoligen Ölschalter unter Umständen ohne Zerstörungen innerhalb des Schalters nicht mehr möglich ist. Schalterexplosionen, die dabei eventuell auftreten können, gehören aber zu den unangenehmsten Betriebsvorkommnissen, weil mit ihnen gewöhnlich ein Ölbrand verbunden ist, der zu unabsehbaren Folgen führen kann. Den wirksamsten Schutz hiergegen bietet die Aufteilung der Schalter und ihre Unterbringung in je eine feuerfeste besondere Zelle, worüber indessen erst weiter unten bei der Anordnung der Apparate im Transformatorhause ausführlicher gesprochen werden wird.

Das Einschalten des Ölschalters erfolgt in Transformatorstationen fast stets von Hand; das Ausschalten desselben kann entweder von Hand oder selbsttätig durch die Relais geschehen, die auf eine Auslösevorrichtung am Schalter wirken. Im letzteren Falle ersetzt der Schalter gleichzeitig die Sicherungen. Diese Auslösung wird heute durchweg derart konstruiert, daß sie ein erneutes Einschalten des Schalters erst gestattet, wenn die Störung (Überlastung) beseitigt ist, weil nur dann die Relais die Auslösungsvorrichtung wieder freigeben. Hierdurch wird vermieden, daß der Stromkreis bzw. der Transformator immer wieder der noch bestehenden Gefahr ausgesetzt wird. Im Gegensatze hierzu würden beim Einsetzen neuer Schmelzstreifen in die Sicherungen diese vor der vollständigen Behebung der Störung stets wieder durchbrennen und nicht nur hohe Kosten verursachen, sondern die Gefahr für die Apparate usw. noch jedesmal vergrößern.

Die Anzahl der Relais für jeden Schalter richtet sich nach dem Stromsystem. Bei Einphasenstrom genügt ein Relais. Bei Zweiphasenstrom mit verketteten Phasen sind zwei, bei unverketteten Phasen in jeder Phase eins und bei Drehstrom ohne vierten Leiter zwei Relais erforderlich. Ist der Nulleiter herausgeführt, dann müssen drei Relais eingebaut werden, weil in diesem Falle jede Phase mit dem Nulleiter einen Stromkreis bildet, der zu sichern ist. Ferner sei noch erwähnt, daß erstlich das Öl ähnliche Eigenschaften aufweisen muß, wie für die ölsolierten Transformatoren, und daß weiter jeder Ölkessel mit einem Sicherheitsventil, einem Ölablaß und einem Ölstandszeiger ausgerüstet sein soll. Schließlich ist es notwendig, daß der Ölkessel leicht abgenommen werden kann, um die Schaltmesser bequem und schnell untersuchen bzw. an Ort und Stelle instand setzen zu können.

Als Relais benutzt man solche, die entweder vom Strome unmittelbar durchflossen, oder die bei Hochspannung bzw. großen Stromstärken unter Zwischenschaltung besonderer Meßtransformatoren an die Stromkreise angeschlossen werden. Man unterscheidet dabei Relais mit Augenblicksauslösung, die sofort ansprechen, wenn der Strom eine eingestellte Höchstgrenze überschreitet (Maximalrelais), und solche, die z. B. erst ein zwischengeschaltetes Uhrwerk auslösen, das nach Ablauf die Klinkvorrichtung des Schalters betätigt (Zeiteinstellung). Schalter mit Relais der letzten Art sind in Transformatoranlagen die vorteilhafteren, weil die Transformatoren selbst kurzzeitig stark

überlastbar sind, und die ganze Sekundäranlage bei plötzlichen Stromstößen nicht stets unterbrochen wird.

Für sehr hohe Spannungen und Leistungen empfiehlt es sich, die Ölschalter als sog. Schutzschalter auszuführen, wie sie auf S. 85 für große Drehstrommotoren beschrieben wurden. Sie gestatten ein allmähliches „Unterspannungsetzen“ des Transformators, und begrenzen die Überspannungsfahr beim plötzlichen Einschalten der Hochspannungsseite.

Sollten statt der selbsttätigen Ölschalter Sicherungen und Ölschalter verwendet werden, so sind diese beiden im Stromlauf so anzuordnen, daß die Sicherungen stets hinter den Schaltern — auf der abzuschaltenden Seite der Anlage — liegen, damit sie beim Ausschalten des Stromkreises spannungslos sind und dann ohne Gefahr bedient werden können. In Fig. 228 ist diese Anordnung gezeichnet.

Das Gesagte soll nun an dem Schaltungsschema Fig. 225 noch erweitert werden. In den beiden 75 000-Volt-Stromkreisen sind selbsttätige Ölschalter in der Ausführung als Schutzschalter *S.Sch.*_{max} mit Zeitrelais eingebaut. Von diesen Relais *R.* sind jedesmal zwei vorhanden, die an Stromtransformatoren *Str. Trf.* angeschlossen sind. Die Relaisanker schließen im normalen Betriebe die Steuerkontakte, die mit der Auslösevorrichtung des Ölschalters in Verbindung stehen, kurz. Steigt die Stromstärke über das zulässige Maß an, dann werden ein oder beide Relaisanker angezogen, der Kurzschluß der Steuerkontakte unterbrochen, der Strom der Stromtransformatoren nach der Auslösevorrichtung *R.* geleitet, und der Schalter — schematisch angedeutet dadurch, daß der Anker nach unten gezogen wird und die Feder das Kontaktmesser aus den Kontakten herauszieht — zur Auslösung gebracht. Nun kann man auch noch eine zweite Auslösevorrichtung an einen Spannungstransformator anschließen, und damit den Ölschalter auch von der Spannung derart abhängig machen, daß beim Sinken derselben unter einen bestimmten Betrag oder beim vollständigen Ausbleiben derselben der Schalter ebenfalls unterbrochen wird. In Transformatorenanlagen wird diese Spannungsauslösung indessen in der Regel nur für die Schalter der abgehenden Unterspannungsverteilungsleitungen benutzt, damit beim Wiederkommen der Spannung nicht plötzlich große Last auf den Transformatoren liegt. Wird sie auch überspannungsseitig gewünscht, was nicht besonders notwendig ist, weil mit dem erneuten Ansteigen der Spannung die Transformatoren allmählich in Betrieb kommen, dann muß sie naturgemäß unbedingt sekundär auch benutzt werden.

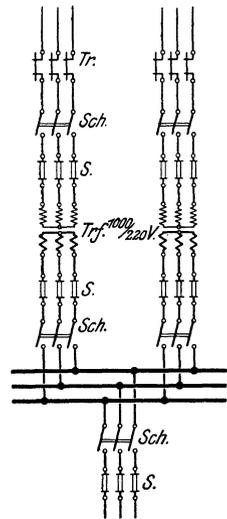


Fig. 228. Zweckmäßige Reihenfolge in der Anordnung von Sicherungen und Schaltern.

Um die Stellung des Ölschalters sofort erkennen zu können, ist derselbe noch mit einer Signalvorrichtung versehen, die aus zwei Glühlampen — in der Regel eine rote und eine grüne für „Aus“ und „Ein“ — besteht. Das erleichtert die Betriebsführung außerordentlich, weil der Schalthebel, mit welchem der Ölschalter von Hand ein- und ausgeschaltet wird, stets in der eingeschalteten Stellung bleibt, wenn auch der Schalter selbst durch die Relais ausgelöst worden ist. Die Signallampen *Sig. Lp.* werden auf der Schalttafel befestigt, während die Schalter hinter, über oder unter dieser räumlich oft weit getrennt angeordnet sind. Der Strom wird in Fig. 225 den Signallampen über einen Spannungstransformator *Sp. Trf.* zugeführt. Ist der Schalthebel von Hand ausgeschaltet, dann leuchtet ebenfalls die für diese Stellung des Ölschalters vorgesehene Lampe, und der Aufsichtsbeamte übersieht sofort, welcher Transformator an der Stromlieferung nicht teilnimmt.

Derartige selbsttätige Ölschalter sind auch in den 10 000-Volt-Stromkreisen vorhanden (*Sch. max*), und sie sind ferner in allen 10 000 Volt abgehenden Leitungen vorzusehen, was in Fig. 225 nicht angedeutet ist. Schließlich hat die Hochspannungsseite des Stationstransformators ebenfalls einen derartigen automatischen Ölschalter erhalten.

Um den 75 000-Volt-Reservetransformator auf die linke oder rechte Seite der Sammelschienen hoch- und niederspannungsseitig während des Betriebes umlegen zu können, sind, wie bereits auf S. 282 erwähnt, gleichfalls Ölschalter eingebaut, die indessen keine selbsttätige Auslösevorrichtung besitzen.

d) Die Verteilung der Sicherungsvorrichtung im Schaltungsschema¹⁾. Die Frage nun, ob die Transformatoren primär und sekundär zu sichern, oder ob nur auf der Hoch- oder nur auf der Niederspannungsseite Sicherungen bzw. selbsttätige Ölschalter einzubauen sind, ist sehr schwer für alle vorkommenden Fälle in einem bestimmten Sinne zu beantworten. Es sprechen hier sowohl die Größe der Leistung und die Höhe der Spannungen, als auch die ganzen Betriebs- und Netzverhältnisse einer Anlage mit. Schließlich ist die Verteilung der Sicherungsvorrichtungen auf die Ober- oder Unterspannungsseite der Transformatoren mehr oder weniger Ansichtssache. Es können daher wiederum nur allgemeine Gesichtspunkte erörtert werden. Abermals soll indessen darauf hingewiesen sein, daß nur die selbständigen Transformatoranlagen behandelt werden. Die Sicherung im Kraftwerke wird erst im II. Bande erörtert.

Handelt es sich um einen Transformator für geringe Leistung und Spannung mit einer Zuführung und einer Ableitung, dann sichert man in der Regel nur die Unterspannungsseite und überläßt das Abschalten der Transformatorstation im Falle eines Kurzschlusses in demselben selbst der Sicherung der Zuführungsleitung im Kraftwerke. Hat der Transformator unter den gleichen primären Verhältnissen mehrere sekundäre Verteilungsstromkreise zu speisen, dann

¹⁾ Unter Sicherungsvorrichtungen sollen in diesem Kapitel ganz allgemein entweder Sicherungen oder automatische Ölschalter verstanden sein.

ist naturgemäß jeder dieser Stromkreise für sich nach der Höhe der fortzuleitenden Energie und der Transformator ebenfalls nur auf der Niederspannungsseite zu sichern. Diese letztere Sicherung könnte wohl auch fortfallen, indessen ist es günstiger, sie vorzusehen, weil z. B. in den Sammelschienen Kurzschluß durch unvorsichtiges Hantieren mit Schlüsseln, Schraubenziehern, Zangen usw. hervorgerufen werden könnte, der dann den Transformator beschädigen würde, wenn er ungesichert wäre.

Bildet eine Hochspannungsleitung einen selbständigen Teil eines größeren Verteilungsnetzes (z. B. bei einer Überlandzentrale), und speist dieselbe nur einen Transformator, dessen Leistung gegenüber der Gesamtenergie des Kraftwerkes gering ist, so genügt im allgemeinen auch hier nur die Sicherung der Unterspannungsseite, weil die Fernleitung vor dem Austritte aus der Stromerzeugungsstation gesichert sein muß. Hängen an dieser Zuführungsleitung indessen noch andere annähernd gleich große Transformatoren, deren Sekundärnetze aber nicht miteinander verbunden sind, dann bedarf es schon einer besonderen Überlegung, ob die sekundären Sicherungen allein ausreichen. Wenn es auf geringste Anlagekosten der Transformatorstationen besonders ankommt, so kann die Oberspannungssicherung fortgelassen werden. Ein Kurzschluß in einem kleinen Streckentransformator wird in diesem Falle den übrigen Betrieb auf der Fernleitung vielleicht nur wenig stören, weil die Sicherungsvorrichtung der Leitung im Kraftwerke gemäß der gesamten zu übertragenden Energie gewählt sein muß. Bevor sie zum Ansprechen kommt, wird der kleine Transformator wohl schon zerstört, und der Kurzschluß unter Umständen unterbrochen sein. Aber hieraus ist schon zu erkennen, daß es mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit aller angeschlossenen Anlagen jedenfalls vorteilhafter ist, in solchen Fällen auch die Primärseite aller parallel arbeitenden Transformatoren zu sichern, weil die Auswechslung eines Transformators teurer ist, als die Beschaffung der Sicherungen, immer noch unter der Voraussetzung, daß es sich um verhältnismäßig geringe Oberspannungen bis etwa 15000 Volt handelt. Bei Verwendung der später beschriebenen einfachen Masttransformatoren, deren Höchstleistung bis etwa 15 KVA geht, können ausnahmsweise statt der eigentlich erforderlichen Ölschalter Streifensicherungen benutzt werden, weil Ölschalter im Freien schwer zu installieren sind. Damit nun aber diese nicht vor den Niederspannungssicherungen z. B. eines stärker belasteten Abzweiges ansprechen und dadurch den ganzen Betrieb dieser Station unterbrechen, empfiehlt es sich, die Hochspannungssicherungen für etwa den drei- bis vierfachen Wert der Vollaststromstärke zu bemessen. Sie werden so nur infolge eines Defektes im Transformator zum Schmelzen kommen. Allerdings darf ein derart gesicherter Transformator nicht unter Berücksichtigung seiner Überlastbarkeit nach S. 200 zu klein bemessen sein, da er sich dann im Dauerbetriebe zu stark erwärmen und durch diese Ursache beschädigt werden könnte.

Läßt man für einen solchen Betriebsfall die Hochspannungssicherungen fort, so kann es — und das wird in der Mehrzahl der Fälle eintreten — vorkommen, daß nicht nur der defekte Transformator völlig zerstört, sondern die ganze Leitung im Kraftwerke abgeschaltet wird, und das ist selbstverständlich zu vermeiden. Angebrachter erscheint es daher, wenn eben die Anlagekosten auf das größt' erreichbare Minimum herabgedrückt werden sollen, lieber die Niederspannungssicherungen als diejenigen auf der Hochspannungsseite fortzulassen. Selbstverständlich gilt das aber nur für die Transformatorsicherung, nicht aber für die abgehenden Unterspannungsstromkreise, die nach wie vor gesichert sein müssen.

Sind die Sekundärnetze der Transformatoren ebenfalls miteinander verbunden, so sollte man unter allen Umständen jeden beteiligten Transformator beiderseitig sichern, weil im Falle eines Kurzschlusses in einem der Transformatoren oder in den Sammelschienen alle anderen mit diesem in Verbindung stehenden Transformatoren, sofern nicht sehr lange Leitungsstrecken dazwischenliegen, auf diesen Kurzschluß arbeiten. Infolgedessen könnte der eine oder andere derselben ebenfalls Schaden nehmen, bis die Fernleitung im Kraftwerke unterbrochen wird.

Bei Transformatoren großer Leistungen und hoher Spannungen spielen die Beschaffungskosten für die Hochspannungsschalter im Verhältnisse zu dem Gesamtpreis der Transformatorstation keine so bedeutende Rolle mehr, und man sichert vorteilhaft auf beiden Seiten. Um ein zu häufiges Ansprechen der Hochspannungsschalter zu vermeiden, was den Transformatoren schädlich ist, sind die Relais der Schalter nach der Überlastbarkeit der Transformatoren einzustellen. Die Relais sollen hier aber mit sog. Kurzschlußkontakten versehen sein, d. h. in der Weise arbeiten, daß sie normal nach ihrer Zeiteinstellung (vgl. S. 286) ansprechen, im Falle einer plötzlichen gefährlichen Überlastung oder eines Kurzschlusses innerhalb des Transformators aber sofort den Schalter auslösen, also wie Augenblicksrelais wirken.

Arbeiten in einer Station zwei Transformatoren auf Sammelschienen parallel, ist aber nur eine Hochspannungszuführungsleitung vorhanden, dann kommen schon eine ganze Anzahl von Anordnungen der Sicherungsvorrichtungen in Frage. Man sichert entweder nur die Transformatoren sekundär und die gemeinsame Hochspannungsleitung, oder man läßt die letztere Sicherung fort und schützt dafür die Transformatoren auf beiden Seiten. Der Vorteil der ersten Form liegt nur in den geringeren Anlagekosten; er wird aber zum Nachteil, wenn die Transformatoren in ihren Leistungen stark voneinander abweichen, weil dann die Sicherung in der Zuführungsleitung für die gesamt übertragene Energie einzustellen ist, und unter Umständen nicht rechtzeitig genug ansprechen wird (Zeitrelais), wenn im kleineren der beiden Transformatoren ein Defekt auftritt. Die Zerstörung dieses Transformators ist dabei gewöhnlich die Folge. Sichert

man dagegen jeden Transformator auf beiden Seiten, dann kann dieser Übelstand nicht eintreten. Um die Fernleitung abschalten zu können, muß natürlich an und für sich ein Schalter — Ölschalter bei höheren Spannungen — vorhanden sein, den man am vorteilhaftesten ebenfalls als Automaten wählt.

Die Unterspannungssicherungen fortzulassen, ist aus den bereits oben bei der Verbindung der Sekundärnetze auseinandergesetzten Gründen nicht zu empfehlen.

Schließlich ist noch der Fall zu untersuchen, der bei der Anlage nach dem Schaltungsschema Fig. 225 angenommen ist, und bei dem zwei Transformatoren und zwei Hochspannungsleitungen vorhanden sind. In Fig. 225 sind die Ober- und Unterspannungsseiten geschützt, denn im normalen Betriebszustande sind die 75 000- und 10 000-Volt-Transformatorsammelschienen nicht miteinander verbunden. Die Ölschalter *Sch.* sind also offen, und der Parallelbetrieb der Transformatoren findet nur über die 10 000-Volt-Verteilungssammelschienen statt. Das ist jedenfalls für eine derartige Betriebsführung die günstigste Sicherungsform. Sollen dagegen auch die Transformatorsammelschienen ohne Unterbrechung benutzt werden, der Parallelbetrieb also auf beiden Transformatorseiten stattfinden, was in der Regel der Fall ist, und den Vorzug hat, daß die abzugebende Energie sich gleichmäßiger auf die einzelnen Transformatoren verteilt, dann sind die Transformatoren beiderseitig zu sichern und desgleichen auch die Fernleitungen. Will man an Ölschaltern bei großen Anlagen sparen, so ist noch die folgende Verteilung der Schutzvorrichtungen möglich. Man sichert die Zuführungsleitungen für die durch jede derselben zu übertragende Energie, läßt die Transformatoren ungesichert und fügt dagegen zwischen je zwei derselben in die Sammelschienen automatische Schalter ein, die auf geringere Auslösestromstärke und ohne Zeiteinstellung justiert sind. Jeder abgehende Stromkreis muß hierbei wie überhaupt besonders gesichert sein. Wenn bei dieser Verteilung der Schutzvorrichtungen in einem der Transformatoren ein Defekt oder Kurzschluß eintritt, dann spricht der benachbarte Sammelschienenschalter zunächst an und lokalisiert den Kurzschluß. Dauert die Störung fort, dann wird der Automat in der Zuführungsleitung auslösen, und dadurch den Transformator abschalten. Ähnliches gilt ebenfalls, wenn eine mit mehreren Transformatoren ausgerüstete Station nur eine Zuführungsleitung hat.

Auf Grund dieser Erörterungen wird der projektierende Ingenieur wohl ohne weiteres in der Lage sein, für alle anderen Fälle nach Überlegung und Kostenermittlung das Zweckmäßigste selbst bestimmen zu können.

e) Die Meßinstrumente. Die notwendigsten Meßinstrumente, die in einer Transformatorenanlage für die Beaufsichtigung und die Führung des Betriebes vorhanden sein müssen, richten sich naturgemäß nach der Zahl und Größe der Transformatoren und der Höhe der Spannung. Bei kleinen Anlagen oder einzelnen kleinen Transformatoren läßt man

gewöhnlich alle Meßinstrumente fort, und baut nur Zähler ein. In solchen Stationen dagegen, die größeren Umfang haben, und die deshalb unter ständiger Aufsicht stehen, wählt man auf der Sekundärseite Strom-, Spannungs- und vereinzelt noch einen Leistungszeiger, sowie gegebenenfalls Zähler. Wohl zu beachten ist bei der Wahl dieser Instrumente, daß die Leistungszeiger und Zähler sowohl für gleich- als auch für ungleichbelastete Phasen hergestellt werden, und in letzterem Falle auch ein Stromzeiger allein keinen genügenden Aufschluß über die jeweilige Belastung jeder Phase gibt, sondern daß dieses nur durch drei getrennte Stromzeiger zu erreichen ist. Wird der Strom überwiegend für Lichtzwecke abgegeben, und ist eine größere Belastungsverschiedenheit der einzelnen Phasen als etwa 10% der Maximalbelastung zu erwarten, dann sind Instrumente für ungleichbelastete Phasen zu verwenden. Im anderen Falle, sowie bei Energielieferung für reinen Motorenbetrieb genügen solche für gleiche Phasenbelastung. Letztere sind billiger und erfordern, wenn durch die Höhe von Spannung bzw. Strom überhaupt bedingt, weniger Meßtransformatoren.

Auf der Primärseite (Hochspannungsseite) soll man tunlichst wenig Meßinstrumente einbauen, weil die Anschaffungskosten für dieselben durch die Meßtransformatoren sehr bedeutende sind, und an Unterstützung für die Betriebsführung verhältnismäßig wenig gewonnen wird. Ein Spannungszeiger für jeden Transformator oder einfacher noch umschaltbar auf alle Transformatoren, oder nur in der Fernleitung bzw. bei mehreren auf die einzelnen Fernleitungen umschaltbar genügt vollkommen. Man bezeichnet dieses gemeinsame Instrument dann als sog. Generalvoltmeter. Dasselbe hat lediglich den Zweck, anzuzeigen, ob die Spannung vom Kraftwerke richtig gehalten wird, und daß bzw. welche Fernleitung unter Spannung steht, was besonders bei beendeten Arbeiten in den Hochspannungsleitungen größere Sicherheit für die Inbetriebsetzung der Transformatorenanlage gibt.

Das Schaltungsschema Fig. 225 weist die folgenden Instrumente auf: In den Hochspannungsleitungen je einen Spannungszeiger *Sp.Z.* mit Meßtransformator *Sp.Trf.*, der hier nur überspannungsseitig gesichert ist (*Sp.S.*). Besser wäre es, ihn auch auf der Niederspannungsseite zu schützen, wie das in Fig. 251 geschehen ist, um zu verhüten, daß bei einem Defekte im Meßinstrumente der Transformator Schaden nimmt. Die Hochspannungssicherungen *Sp.S.* können nicht so schwach ausgeführt werden, als es den geringen Strömen für die Meßinstrumente entsprechend nötig ist. Sie schützen daher mehr den Stromkreis vor einem Kurzschluß im Meßtransformator als letzteren vor Beschädigung durch einen Kurzschluß im Meßinstrumente. Weiter hat jeder Einphasentransformator zur Kontrolle seiner Belastung und zur Prüfung, ob seine Energieabgabe nicht etwa infolge eines inneren Schadens anormal ist, einen ebenfalls an einen Meßtransformator *Str.Trf.* angeschlossenen Stromzeiger *Str.Z.* erhalten. In den Verbindungsstücken zwischen den 10 000-Volt-Transformator- und den Verteilungssammel-

schiene sind eingebaut: ein Leistungszeiger *L.Z.*, ein Stromzeiger *Str.Z.* und ein Zähler *Z.*, für die gemeinschaftliche Meßtransformatoren benutzt werden. Wollte man noch ein übriges tun, dann könnte schließlich noch ein Spannungszeiger auch auf der 10000-Volt-Seite installiert werden, der aber ohne Bedenken mit Rücksicht auf die Hochspannungsmeßinstrumente fortgelassen werden könnte.

Der Stationstransformator hat nur einen Strom- und Spannungszeiger sekundär erhalten.

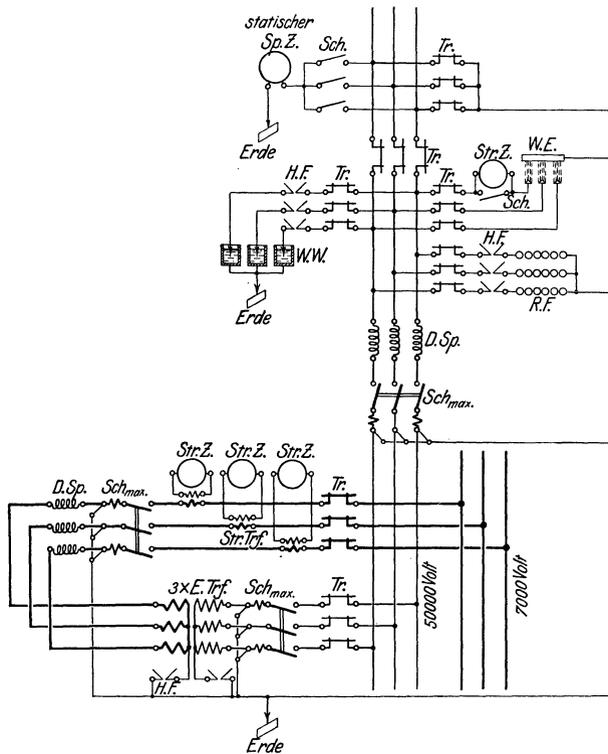


Fig. 229.

Für die abgehenden Stromkreise sind im allgemeinen Meßinstrumente nicht erforderlich. Nur wenn schon von diesem Teile der Anlage ab die Berechnung des Stromverbrauches zu erfolgen hat, dann sind Zähler und gegebenenfalls Stromzeiger nötig.

Weiteres über die Meßinstrumente wird gelegentlich der Besprechung der ausgeführten Anlagen erwähnt werden, so z. B. über Isolationsprüfeinrichtungen, registrierende Meßapparate, Frequenzmesser u. dgl.

Das Schaltungsschema Fig. 229 zeigt eine etwas andere Verteilung der Meßinstrumente. Hier ist in der 50 000-Volt-Leitung nur ein „statischer Spannungszeiger“ (*Stat.Sp.Z.*) mit einem Schalter *Sch.* für jede Phase vorhanden, der infolge seiner Konstruktion unmittelbar an

die Hochspannung angeschlossen werden kann, und die Spannung jeder Leitung gegen Erde anzeigt. In der 7000-Volt-Leitung dagegen sind drei an Stromtransformatoren angeschlossene Stromzeiger eingebaut. Besonders sei bei diesem Schema noch auf die Erdungskontakte an den automatischen Ölschaltern aufmerksam gemacht, die zwangsläufig eingeschaltet werden, sobald jeder Ölschalter unterbrochen wird.

f) **Der Blitz- und Überspannungsschutz¹⁾**. Schließlich soll noch kurz einiges über den Einbau von Blitz- und Überspannungsschutzapparaten gesagt werden. Auch hier gehen die Ansichten so weit auseinander, daß bindende Regeln für alle Fälle nicht aufgestellt werden können. Auf eine nähere Schilderung der einzelnen elektrischen Vorgänge, die für die Wahl der Schutzapparate bestimmend sind, und auf die verschiedenen Apparate selbst wird indessen erst im II. Bande ausführlicher eingegangen werden.

Für Anlagen bis 1000 Volt genügen auf der Primärseite des Transformators einfache Hörner- oder Rollenfunkenstrecken. Die bei dieser Spannung etwa auftretenden Überspannungen hervorgerufen durch betriebsmäßige Schaltungen, Ansprechen von Sicherungen, Kurzschlüsse oder durch atmosphärische Entladungen (statische Elektrizität) können für gewöhnlich von den Wicklungen des Transformators ohne Schaden ertragen werden, und sie werden, wenn sie ein bestimmtes Maß überschreiten, über den Luftzwischenraum der Funkenstrecken zur Erde abgeleitet, d. h. dadurch beseitigt. Allerdings muß dabei der Luftweg sehr gering bemessen sein, und aus diesem Grunde dürfen derartige Funkenstrecken nicht im Freien aufgestellt werden, weil eine Überbrückung der Luftstrecke durch Insekten, Blätter usw. sehr leicht eintreten kann, und dann ein dauernder Erdstrom, oder wenn bei mehreren Funkenstrecken dasselbe eintritt, ein Erdschluß bzw. ein Kurzschluß z. B. zwischen zwei Phasen desselben Stromkreises die Folge ist.

Über diese Spannung hinaus bis etwa 5000 Volt genügen gleichfalls Funkenstrecken — hier aber nur Hörnerfunkenstrecken —, die bei größeren Anlagen zur Begrenzung der beim Ansprechen der Schutzvorrichtung nach Erde fließenden Stromstärke noch Dämpfungswiderstände erhalten. Diese Widerstände bestehen entweder aus Carborundum oder einem ähnlichen Material, oder aus Draht (Nickelin, Konstantan usw.), der in Spulen gewickelt in einem eisernen, mit Öl gefüllten Kessel untergebracht ist (Ölwiderstand)²⁾. Bei größeren Transformatorleistungen, wo die beim Ansprechen der Funkenstrecken nach Erde abfließenden Ströme unter Umständen recht bedeutend sein können, werden auch Wasserwiderstände (Wasser in Trögen aus Eisen, Beton od. dgl.) benutzt. Auf eine gute Beschaffenheit des Wassers ist

¹⁾ Siehe Fußnote auf S. 284.

²⁾ Über die Beschaffenheit des Öles gilt das auf S. 242 und über Signallvorrichtungen (Temperaturzeiger usw.) das auf S. 249 Gesagte für Ölwiderstände sinngemäß.

dabei besonders zu achten (kein vollständig reines Wasser z. B. aus Gebirgsbächen).

In Anlagen mit 10 000 Volt und höherer Spannung können die Überspannungen indessen schon eine solche Höhe erreichen, daß die Transformatorwicklungen Gefahr laufen, durchschlagen zu werden. Um daher die Überspannungen von den Transformatoren fernzuhalten, wird den letzteren ein hoher induktiver Widerstand in Form einer Kupferspirale mit zahlreichen Windungen vorgeschaltet. Man nennt eine solche Spule eine Drosselspule (Induktionsspule), weil sie gewissermaßen wie eine Dampfdrosselklappe od. dgl. eine über einen bestimmten Wert ansteigende Spannung mit einer höheren als der Betriebsfrequenz, wie sie ein Teil der Überspannungen besitzen, abdrosselt. Infolge des hohen induktiven Widerstandes einer solchen Schutzvorrichtung wird die ankommende Überspannungswelle reflektiert, d. h. von der Drosselspule zurückgeworfen, und muß nun einen Weg finden, um nach Erde abzugleiten. Dieser Weg muß künstlich geschaffen werden, und zwar geschieht das wiederum durch Funkenstrecken, deren Schlagweite so eingestellt ist, daß sie bei einer bestimmten, durch die zu schützenden Apparate bedingten Spannungshöhe überbrückt werden kann. In der Regel erhalten die Funkenstrecken in ihrem Erdstromkreise noch Dämpfungswiderstände. Wird der von der Drosselspule reflektierten Spannungswelle eine künstliche Ableitung durch die Funkenstrecken nicht geboten, dann sucht sich dieselbe einen anderen Weg zur Erde, und zwar entweder durch einen Überschlag nach benachbarten, geerdeten Eisenteilen in Form eines Lichtbogens oder über einen bzw. mehrere Isolatoren der Freileitung. Beides ist aber dringend zu verhüten, da im ersteren Falle Zerstörungen in der Schaltanlage und im zweiten Falle Defekte in der Fernleitung hervorgerufen werden, die zu unliebsamen Betriebsunterbrechungen führen. Bei Kabeln tritt natürlich eine Beschädigung der Isolation z. B. an einer schwächeren Stelle und damit eine Zerstörung dieses Teiles der Kabelstrecke ein.

Für gröbere Entladungen in der Hochspannungsleitung dienen neben diesem sog. feineren Schutz, der die aus dem Betriebe entstehenden Überspannungen unschädlich zu machen hat, noch besondere, auf eine größere Schlagweite eingestellte, entweder unmittelbar oder wieder über Wasserwiderstände geerdete Funkenstrecken (Grob s ch u t z).

Außer den bisher genannten Überspannungsschutzapparaten kommen bei ausgedehnten Hochspannungsleitungsnetzen noch sog. Wasserstrahler zur Verwendung, denen die Aufgabe zufällt, die sich durch die Reibung der Luft an den Drähten und aus ihrer Feuchtigkeit (Regen, Schnee, Nebel u. dgl.) auf den Leitungen ansammelnde statische Elektrizität, die unter Umständen gleichfalls eine recht gefahrbringende Höhe erreichen kann, dauernd nach Erde abzuleiten. Zu diesem Zwecke ist an jede Leitung ein Apparat mit kontinuierlich fließendem Wasserstrahle angeschlossen, der in seinem Widerstande so geregelt ist, daß nur ein ganz geringfügiger Strom zur Erde abgeht, der aber dadurch dauernd eine Erdleitung herstellt.

In Anlagen mit geerdetem Nulleiter sind diese Apparate natürlich nicht brauchbar, weil über sie ein sofortiger starker Erdstrom zwischen den einzelnen geerdeten Generatoren, Transformatoren usw. auftreten würde, der unter Umständen einen völligen Kurzschluß hervorrufen könnte.

Wasserstrahlerder sind ferner in selbständigen Transformatorstationen nur dort anwendbar, wo gut leitendes Wasser reichlich und in der Station eine ständige Aufsicht vorhanden ist, weil diese Apparate eine sorgfältige Wartung nötig haben, wenn sie einwandfrei arbeiten sollen.

An Stelle der Wasserstrahlerder tritt neuerdings die Erdung des neutralen Punktes des Transformators über einen Widerstand oder eine Drosselspule (Fig. 230). Bei mehreren Transformatoren kann man, wie das in Fig. 230 dargestellt ist, einen gemeinsamen Erdungswiderstand benutzen, und zwar werden zu diesem Zwecke die Nullpunkte aller Transformatoren an eine Sammelschiene angeschlossen, an der der besondere Erdungswiderstand liegt. Auf diese Weise wird die Zahl der Apparate, die Raumbeanspruchung usw. sehr gering, was selbstverständlich von bedeutendem Vorteile ist.

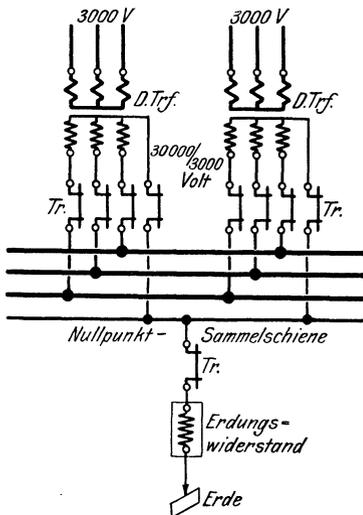


Fig. 230. Nullpunktserdung bei Transformatoren zur Ableitung statischer Entladungen.

Besonders sei noch darauf hingewiesen, daß sämtliche Blitz- und Überspannungsschutzapparate stets unter Zwischenschaltung von Trennmessern an die zu schützende Leitung anzuschließen sind, damit man sie auch im Betriebe abtrennen und gefahrlos nachsehen, reparieren oder auswechseln kann.

Da die Überspannungen in der Regel stets die ersten Spulen des Transformators hochspannungsseitig beschädigen, werden die Windungen derselben neuerdings wesentlich stärker isoliert und dadurch gegen Durchschläge noch besonders geschützt.

In dem Schaltschema Fig. 225 ist nun sowohl ein Grobschutz, bestehend aus Hörnerfunkenstrecken *H.F.* mit Wasserwiderständen *W.W.*, als auch ein Feinschutz (Ölwiderstand *Ö.W.* mit Funkenstrecke *H.F.* und Drosselspulen *D.Sp.*), sowie schließlich ein Wasserstrahlerder *W.E.* vorgesehen. Letzterer ist mit einem durch den Schalter *Sch.* kurzzuschließenden Stromzeiger *Str.Z.* ausgerüstet, um die Stärke des dauernd abgeleiteten Stromes jederzeit beobachten und den Wasserstrahl bzw. die Beschaffenheit des Wassers selbst bequem prüfen zu können. Um bei der großen Zahl der abgehenden 10 000-Volt-Stromkreise nicht für jede Leitung besondere Schutzvorrichtungen einbauen zu müssen,

genügt es, die Sammelschienen durch Grob- und Feinschutz zu schützen. Drosselspulen wären in diesem Falle hinter die automatischen Schalter Sch_{\max} einzubauen, um dadurch zu erreichen, daß beim Ansprechen der Schalter auftretende Überspannungen von den Transformatoren in den angeschlossenen Unterstationen ferngehalten werden. Sind diese Leitungen über ein ausgedehntes Gebiet verteilt, führen dieselben über Höhenrücken, große Sandflächen, Wiesen u. dgl., dann empfiehlt es sich, noch Wasserstrahlerder vorzusehen.

Vergleicht man hiergegen das Schaltungsschema Fig. 229, bei welchem es sich um nur einen Transformator handelt, so sieht man, daß außer dem Wasserstrahlerder noch der primäre und sekundäre Nullpunkt des Transformators über je eine Funkenstrecke geerdet ist. Außerdem sind hoch- und niederspannungsseitig Drosselspulen vorhanden. An Stelle des Ölwiderstandes für den Feinschutz sind hier mit den Hörnerfunkenstrecken sog. Rollenfunkenstrecken in Reihe geschaltet, die aus kleinen, durch Luftzwischenräume getrennten Metallzylindern bestehen, zwischen denen der Funke überspringt, bis er verlöscht, und damit die Überspannung beseitigt ist.

g) Die Sammelschienen. Hat der Transformator primär nur eine Zuführungsleitung und sekundär nur einen abgehenden Stromkreis zu speisen, dann werden die Leitungen unter Zwischenschaltung der erforderlichen Apparate unmittelbar mit demselben verbunden. Handelt es sich aber um mehrere Zuführungsstromkreise und Verteilungsleitungen und um zwei oder mehr parallel arbeitende Transformatoren in einer Station, dann wendet man für die Primär- und Sekundärverteilung sog. Sammelschienen an, die, wie schon der Name erkennen läßt, dazu dienen, die Ströme in besonderen Leitungen oder Schienen zu sammeln und von hier aus den parallel arbeitenden Teilen der Anlage zuzuführen. In allen bisher gegebenen Schematas sind solche Sammelschienen gezeichnet. Diese haben ferner auch die Aufgabe, die Stromlieferung je nach Bedarf von einem Teile der Anlage auf einen anderen zu verschieben, was z. B. für Fig. 225 dann erforderlich wäre, wenn die linken Transformatoren und die rechte Hochspannungsleitung außer Betrieb gesetzt werden müßten.

Ist eine größere Zahl von Abzweigungen vorhanden, und nehmen an dem Parallelbetriebe gleichzeitig mehr als zwei Transformatoren teil, dann kommt man, wenn Schnelligkeit und große Elastizität in der Energieverschiebung auf die einzelnen Transformatoren gefordert wird, mit den einfachen Sammelschienen (Fig. 229) nicht mehr aus, sondern muß entweder zum Ringsammelschienen-system übergehen, oder zwei Sammelschienen-systeme benutzen (Doppelsammelschienen-system).

Das Ringsammelschienen-system entsteht dadurch, daß die vorhandenen Sammelschienen verdoppelt und beide dann an ihren Enden miteinander verbunden oder, wie man sagt, „zu einem Ringe“ geschlossen werden. In Fig. 231 ist dieses zur Darstellung gebracht, und zwar ist hier der Einfachheit wegen nur eine Phase des Drehstromsystems

gezeichnet. Wie man nun aus Fig. 231 erkennt, liegt jeder Anschluß zwischen Trennschaltern, und der bedeutsame Vorteil dieser Anordnung ist der, daß zwecks Untersuchung und Reparatur alle Schalter, Sicherungen usw. und auch die zugehörigen Teile der Sammelschienen selbst z. B. bei Defekten an den Stromkreistrennschaltern vollständig spannungslos gemacht werden können, ohne daß der andere Betrieb gestört wird. Sind ferner Arbeiten z. B. in den Sammelschienen vorzunehmen, oder neue Anschlüsse an dieselben auszuführen, dann kann jeder Sammelschienenabschnitt gleichfalls spannungslos gemacht werden. Einen Nachteil bei diesem System bilden aber andererseits die Trennschalter selbst, weil sie und weiter auch die Sammelschienen für die gesamte Stromstärke, die sekundär abzugeben ist, bemessen sein müssen, und erstere ihrer großen Zahl wegen die Anlagekosten für Material und Raum nicht unwesentlich erhöhen. Müssen ferner zwei nicht benachbarte Anschlüsse spannungslos gemacht werden, dann

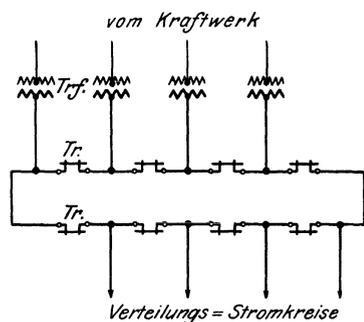


Fig. 231. Schema für das Ring-sammelschienensystem.

sind auch die dazwischenliegenden außer Betrieb gesetzt. Das Ring-sammelschienensystem findet daher in Transformatorstationen wenig Anwendung.

Besser ist dagegen das Doppelsammelschienensystem (Fig. 232 wiederum einpolig gezeichnet), weil es eine vollständige Reserve in sich bildet. Es ist zwar dadurch, daß die Zahl der Trennschalter verdoppelt wird, teurer, hat aber für die Aufrechterhaltung eines ungestörten Betriebes so große Vorzüge, daß es bei bedeutenderen Anlagen auch

für Transformatorstationen stets angewendet werden sollte. In Fig. 225 ist die Transformatoranlage mit Doppelsammelschienen auf der 10 000-Volt-Seite ausgerüstet. Jeder Transformator und jede Abzweigung kann mit Hilfe der Trennschalter *Tr.* auf jede der beiden Sammelschienen geschaltet werden, und Reparaturen, Untersuchungen, Messungen, Erweiterungen usw. sind leicht und ohne Störung des anderen Betriebes ausführbar. Dabei gilt aber hinsichtlich des Einbaues der Trennmesser auch in die abgehenden Stromkreise das auf S. 281 Gesagte im vollen Umfange, und es sei deswegen hier nochmals darauf hingewiesen. Die Sammelschienen und Trennschalter brauchen nicht nach den Höchststromstärken der ganzen Anlage bemessen zu sein. Um bei Störungen in einzelnen Teilen der Anlage keine größeren oder vollständigen Betriebsunterbrechungen eintreten zu lassen, kann nach vorherigem Einlegen der Trennschalter auf die bisher nicht benutzten Sammelschienen und durch Schließen der Verbindungstrennschalter *V. Tr.* (Fig. 232) die Stromlieferung schnell und gefahrlos verschoben werden. Schließlich läßt sich auch die Erdung

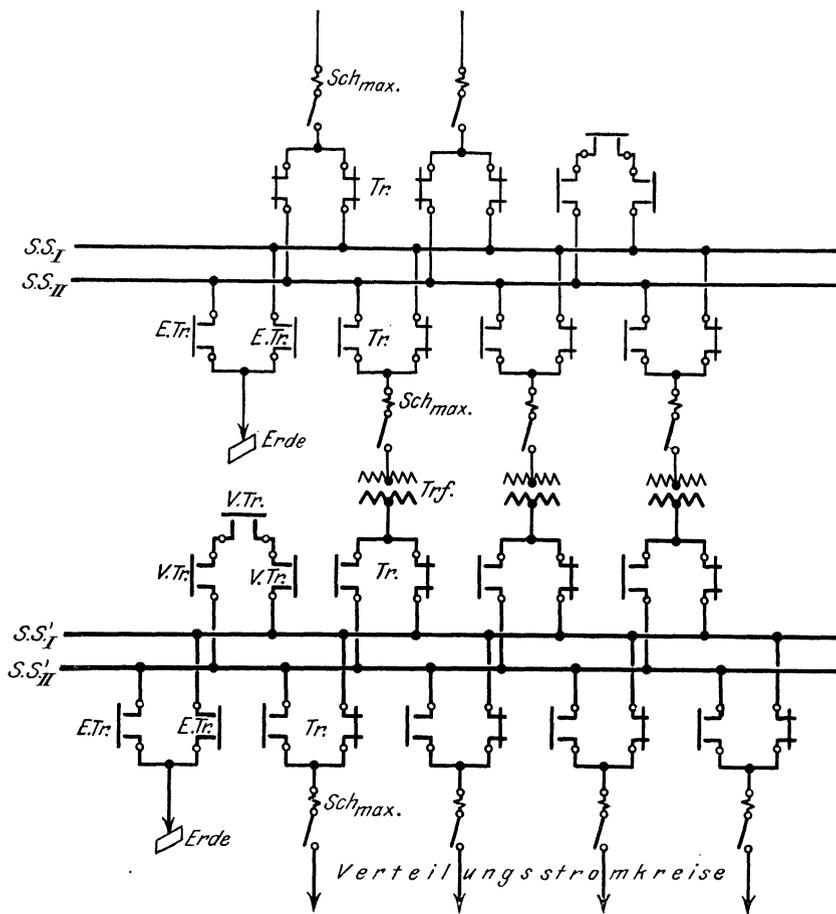


Fig. 232. Schema für das Doppelsammelschienensystem.

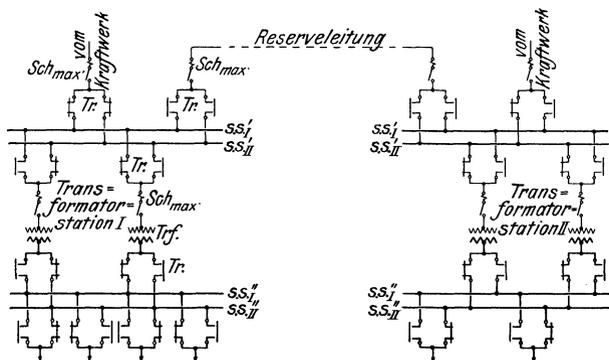


Fig. 233. Schema für zwei parallel arbeitende Transformatorstationen mit Doppelsammelschienen und Reserveleitung.

der Hoch- und Niederspannungssammelschienen mit Hilfe der Trennschalter *E.Tr.* in Fig. 232 leicht bewerkstelligen.

Auch für die Verbindung von Transformatorstationen untereinander ist das Doppelsammelschienensystem in jeder der Stationen dort zu empfehlen, wo besondere Reserveleitungen infolge zu großer Entfernungen zwischen Kraftwerk und Transformatorstation oder sonstiger Schwierigkeiten zu kostspielig sein würden. In Fig. 233 ist eine derartige Schaltung wiedergegeben und wohl ohne besondere Erläuterung verständlich.

h) Der Aufbau der Schaltanlage und die Aufstellung der Transformatoren. Ist das Schaltungsschema festgelegt, und sind die Instrumente und Apparate gewählt, dann erst kann man dazu schreiten, den Aufbau der Schaltanlage, die Aufstellung der Transformatoren und die sonstige Ausgestaltung der Anlage zu entwerfen. Diese letzten Arbeiten zur Vervollständigung des Projektes einer Transformatorstation sind mit die schwierigsten, und sie bedürfen großer Überlegung, sowie langjähriger praktischer Erfahrungen, wenn sie nach jeder Richtung zweckentsprechend und allen Ansprüchen über Betriebs- und Bedienungssicherheit Rechnung tragend durchgeführt werden sollen. Die Zahl der Ausführungsmöglichkeiten ist hierfür eine außerordentlich große, was leicht einzusehen ist, und durch die später folgende Besprechung vollständiger Transformatorstationen noch klarer zutage treten wird. Daher können wiederum nur ganz allgemeine Gesichtspunkte für die Inneneinrichtung einer derartigen Anlage gegeben werden, die indessen den projektierenden Ingenieur wohl in den Stand setzen werden, derartige Arbeiten richtig anzufassen bzw. Ausführungen zu beurteilen, und daraus Schlüsse für andere Fälle zu ziehen.

Zunächst richtet sich der Aufbau der Schaltanlage und die Aufstellung der Transformatoren nach dem zur Verfügung stehenden Platze; wobei schon der Unterschied zu machen ist, ob ein vorhandener Raum benutzt werden soll, oder ob es sich um eine Neuanlage handelt. Im ersteren Falle gelte als Hauptbedingung, daß der Raum oder das Gebäude groß genug sei, um alles Erforderliche bequem aufnehmen zu können. Insbesondere ist das für die Unterbringung der Schaltanlage von großer Bedeutung, denn es werden gerade nach dieser Richtung die meisten Fehler gemacht. Nur zu oft findet man Schaltanlagen, die allein schon zu betreten lebensgefährlich ist, ganz abgesehen davon, daß in solchen beschränkten Räumen vielleicht auch noch betriebsmäßige Schaltungen, Reparaturen, Untersuchungen u. dgl. vorgenommen werden müssen. Ist ein in Aussicht genommener Raum zu klein, dann bestehe man unter allen Umständen darauf, daß derselbe z. B. durch einen Umbau oder Anbau vergrößert wird, denn insbesondere bei Hochspannungsanlage soll die Schaltanlage nicht nach dem Raum, sondern umgekehrt der Raum nach der Schaltanlage entworfen werden, sonst sind Betriebsstörungen durch Vorkommnisse in den Apparaten- und Leitungsanordnungen und Gefähr-

dungen des Bedienungspersonals nicht zu vermeiden, und der Betrieb wird zu einem durchaus unsicheren. Ferner müssen die Räume, die zur Aufnahme der Transformatorenanlage bestimmt sind, vollständig sicher gegen alle anderen Räume abgeschlossen sein, zu anderen Zwecken nicht verwendet werden, leichte und bequeme Zugänglichkeit, gute und ausreichende Belüftung, Schutz gegen die Witterung, Grundwasserfreiheit und, falls in der Nähe von Flüssen gelegen, auch Überschwemmungsfreiheit besitzen. Sind nicht alle diese Bedingungen erfüllt, so sollte man lieber und von vornherein dazu über-

gehen, ein besonderes Transformatorenhaus und zwar nur auf Grund eines zeichnerisch vollständigen Entwurfes der Gesamtanlage und dann nach den neuesten Erfahrungen und Gesichtspunkten zu bauen. Das letztere gilt insbesondere auch für die äußere Form des Gebäudes, die z. B. nach der Umgebung auch architektonisch, selbstverständlich aber in einfachsten Linien, auszuführen ist. Wie auf das gesamte Landschaftsbild störend wirken bei Überlandzentralen oftmals die Transformatorenhäuser, wo doch ohne wesentliche Erhöhung der Baukosten weit Besseres und Geschmackvolleres hätte geschaffen werden können. Der projektierende Ingenieur darf in solchen Fällen eben nicht nur einseitiger Techniker sein, sondern er muß auch den Architekten zu Rate ziehen, wenn er nicht selbst über etwas Kunstsinne verfügt. Maß und Ziel ist hierbei aber natürlich nicht aus dem Auge zu verlieren. Die späteren Abbildungen werden zeigen, wie für derartige Verhältnisse Architekt und Ingenieur zusammenwirken können, ohne daß der letztere den Hauptzweck beiseite schiebt.

Die Ausgestaltung der Apparatenanordnung richtet sich nun naturgemäß in erster Linie nach der Zahl der Transformatoren und Stromkreise, ihrem Ein- und Austritte aus dem Gebäude (Freileitung, Kabel usw.) und nach der Höhe der Spannungen. Bei Hochspannungsanlagen bis etwa 5000 Volt genügen einfache Eisengerüste zur Montage von Schaltern und Sicherungen, die durch vorgelegte Ketten oder

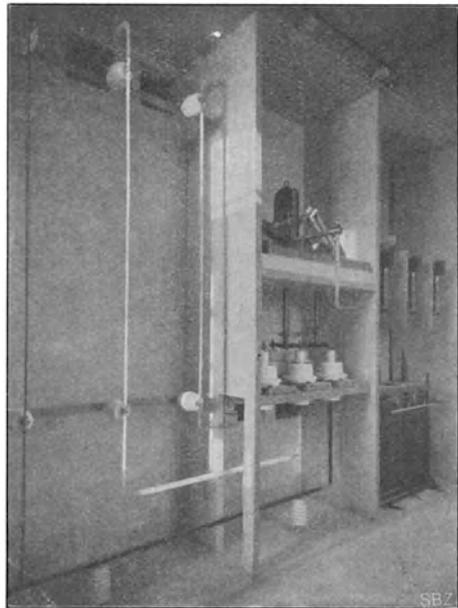


Fig. 234. Aufbau einer Hochspannungsschaltanlage mit besonderen getrennten Zellen für die Hochspannungsapparate und -leitungen.

Holzleisten gegen das Berühren spannungsführender Teile (Fig. 243) vom Bedienungsgange aus abzuschließen sind. Besser, aber auch teurer ist die Verwendung von Drahtgittern mit möglichst engen Maschen (Fig. 238).

Bei Anlagen über 10000 Volt baut man dagegen heute fast durchweg die Apparate jedes Hochspannungsstromkreises in besondere Zellen ein, wie dieses in Fig. 234 dargestellt ist. Die Zellenwände werden entweder aus geputztem Mauerwerk, oder vorteilhafter aus

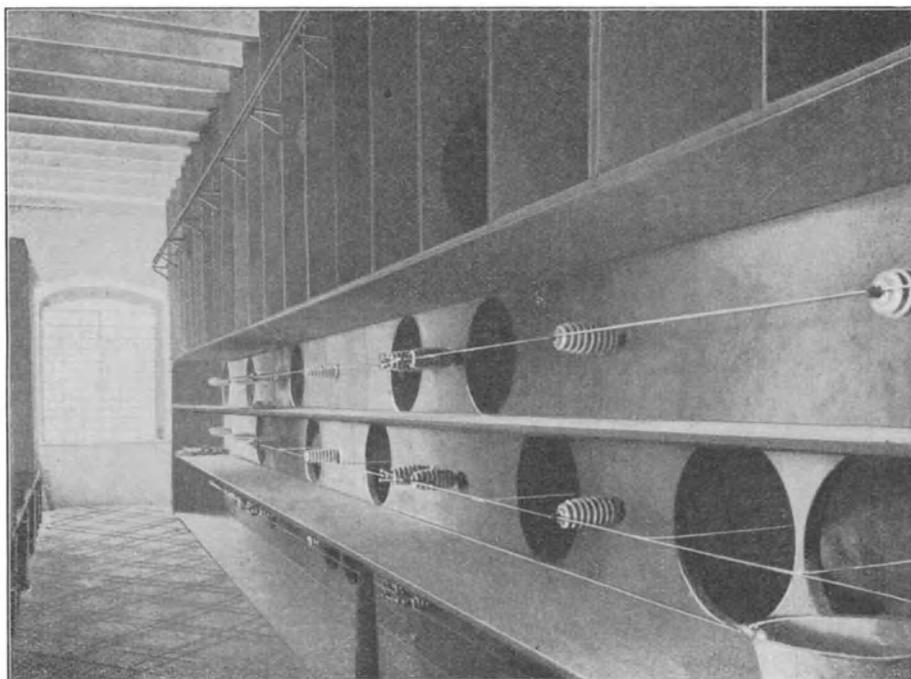


Fig. 235. Aufbau einer Hochspannungsschaltanlage (Trennung der Phasen eines Stromkreises durch besondere Zwischenwände. Ersatz der Wanddurchführungen durch große Löcher).

Zement bzw. armiertem Beton hergestellt. Die Apparate selbst ruhen natürlich auf Eisenträgern. Alle Decken-, Fußboden- und Wanddurchführungen für die Leitungen sind unter Benutzung von Isolatoren (Porzellandurchführungen) auszuführen, um eine Berührung der Leitungen mit dem Mauerwerke und dadurch entstehenden Erdschluß zu verhüten.

Bei Spannungen über 30 000 Volt geht man aber neuerdings dazu über, auch die Phasen eines jeden Hochspannungsstromkreises noch durch Zwischenwände voneinander zu trennen, um die Betriebssicherheit der Anlage zu erhöhen, und Kurzschlüsse

durch Lichtbogenbildungen zwischen zwei benachbarten Phasen zu verhindern. In Fig. 235 ist eine solche Phasentrennung für die Sammelschienen einer 50 000-Volt-Drehstromanlage abgebildet. Bei derartig hohen Spannungen läßt man dann die Porzellandurchführungen für die Wände fort, weil sie ihrer Größe wegen zu teuer sind und zu viel Platz erfordern, und stellt dafür Löcher mit großem Durchmesser her, wie das die Fig. 235 ebenfalls erkennen läßt.

Alle Apparate sollen ferner so in der Schaltanlage liegen, wie sie für jeden Stromkreis im Schaltungsschema angeordnet sind, damit die



Fig. 236. Aufbau einer Hochspannungsschaltanlage (links die Transformatoren in abgeschlossenen Zellen; rechts die Zellenanlage für die Hochspannungsapparate und -leitungen; Meßinstrumente bei den Zellen; Transportgleise für die Transformatoren; Beleuchtung).

Übersicht und das Verfolgen eines Stromkreises erleichtert ist. Der Überspannungsschutz ist dabei räumlich vollständig von der anderen Einrichtung, soweit das irgend möglich ist, zu trennen, um z. B. bei Benutzung von Öl- oder Wasserwiderständen durch plötzliche Explosionen bzw. dadurch entstehendem Ölbrande nicht die anderen Teile der Station zu gefährden, oder auch nur in Mitleidenschaft zu ziehen. Weiter sind die Trennschalter derart anzuordnen, daß sie leicht sichtbar sind, und tunlichst bequem mittels Schaltstange bedient werden können. Liegen Leitungstrennschalter eines Stromkreises in verschiedenen Stockwerken, und ist Rücktrans-

formierung zu fürchten, so sind die Signalvorrichtungen nach S. 283 empfehlenswert.

Ist besonders billig zu bauen, so ist im allgemeinen eine Schalttafel für die Meßinstrumente nicht erforderlich. Dieselben liegen vielmehr zumeist in den zugehörigen Zellen, oder sind vor denselben montiert, wie das aus Fig. 236 zu erkennen ist. Die Hebel für die Hoch- und Niederspannungsschalter sind unmittelbar an letztere angebaut; etwa vorhandene Signallampen sind dicht bei den Schaltern zu installieren. Bei großen Transformatorstationen dagegen mit mehreren ankommenden und abgehenden Leitungen findet man häufig besondere aus Marmor hergestellte Schalttafeln, die die Instrumente tragen, und zu denen dann auch die Vorrichtungen für die Schalterbetätigung geführt sind. Hier empfiehlt es sich unter Umständen, auf komplizierte Gestängeantriebe zu verzichten, und an deren Stelle besser elektromagnetische oder motorische Antriebe für die Hauptölschalter zu wählen, die von der Schalttafel durch Druckknöpfe, Taster usw. gesteuert werden.

Die Aufstellung der Transformatoren richtet sich naturgemäß einmal nach dem zur Verfügung stehenden Platze, und ferner ist die Höhe der Einzelleistung, der Spannungen und die mechanische Ausführung (Ölkessel, Wasserkühlung, künstliche Luftkühlung usw.) in Rücksicht zu ziehen. Transformatoren kleinerer Leistung und verhältnismäßig geringer Spannungen stellt man gewöhnlich in der Mitte oder an einer Wand des Raumes so auf, daß sie von allen Seiten bequem zugänglich sind, und gegebenenfalls ohne Schwierigkeiten demontiert bzw. herausgeschafft werden können. Kommt Kanalbelüftung zur Anwendung, so sind die Kanäle möglichst kurz und, wie bereits früher erwähnt, ohne viele Richtungsänderungen anzulegen.

Handelt es sich um große Transformatoren mit Ölisolierung, so benutzt man auch für diese besondere gemauerte Zellen, die entweder nach oben und nach einer oder beiden Seiten offen, oder auch als vollständige Kasten ausgebildet sind und im letzteren Falle durch eine eiserne Roll- oder Schiebetüre nach der Seite des Bedienungsganges verschlossen werden. Eine solche vollständige Einkapselung hat den Zweck, die Transformatoren voneinander abzuschließen, und damit einen etwa explodierenden oder in Brand geratenen Öltransformator von der übrigen Anlage zu isolieren. Man geht dabei heute soweit, daß man bei solchen Zellen die Türen möglichst luftdicht schließen läßt, um einen Brand leichter nur auf seinen Herd beschränken und durch die geringe Luftzufuhr bald ersticken zu können. Dann muß aber darauf geachtet werden, daß auch die Leitungsdurchführungen luftdicht schließen, damit nicht durch diese eine Luftzirkulation und ein Weitergreifen des Brandes hervorgerufen wird, oder aber man versieht bei sehr großen Transformatoren die einzelnen Zellen mit Kaminen, die über das Dach der Station geführt mit der Außenluft ständig in Verbindung stehen. Dann ist ein die übrigen Teile der Anlage nicht gefährdender Abzug geschaffen, und eine Zelle kann ausbrennen, ohne

daß die Umgebung in Mitleidenschaft gezogen wird. Auf die Erwärmung der Transformatoren bei einer derartigen Aufstellung ist besonders zu achten; unter Umständen ist Frischluftzuführung anzuwenden. Die Kanalabzweigungen sind dann aber mit dichtschließenden, festen Verschußklappen zu versehen, um ein sofortiges Abschließen der einzelnen Kanalstrecken möglich zu machen. Ferner kann man auch ableitbare Ölgruben unterhalb der Transformatoren vorsehen, oder die Ölablaßhähne der Kessel an eine sorgfältig verlegten Rohrleitung anschließen, die unmittelbar ins Freie führt.

Zwei für die Zellenanordnung charakteristische Ausführungsformen sind in den Fig. 236 und 259 (S. 340) abgebildet. In Fig. 236 befinden sich auf der linken Seite des Bedienungsganges festgemauerte Kammern, in denen die Transformatoren stehen, und die durch eiserne Rolllüren nach vorne abgeschlossen sind, während in Fig. 259 nach einer Seite offene Betonzellen benutzt werden.

Handelt es sich um wassergekühlte Transformatoren, so findet man häufiger und namentlich in Amerika die freie Aufstellung ohne jede Zellenumkleidung. Der Vorteil einer solchen besteht in der leichteren allseitigen Zugänglichkeit und der bequemerer Beobachtung der Kühlanlagen. Beschädigungen an den Wasserzu- oder Abflußrohren können sofort entdeckt und behoben werden.

Auf den Fig. 236 und 259 ist noch zu erkennen, daß je eine Transportplatte auf Geleise vor den Transformatoren bewegt werden kann. Sie dient dazu, einen zu untersuchenden Transformator bequem aus dem Raume bzw. der Station nach der Werkstatt fahren zu können. Zu diesem Zwecke erhalten die Transformatoren mittlerer und großer Leistungen Rollen (Fig. 186). Eine derartige Einrichtung setzt aber voraus, daß die Transformatoren zu ebener Erde stehen, da sonst Fahrschächte und Krananlage notwendig sind, die nicht nur die Anlage unnötig verteuern, sondern auch viel wertvollen Platz fortnehmen.

Schließlich sei noch erwähnt, daß neben einer guten und ausreichenden Belüftung der Räume (vgl. Kapitel 41) auch für eine genügende Beleuchtung durch fest installierte und bewegliche Lampen zu sorgen ist, damit nötigenfalls während der Nacht Arbeiten ausgeführt werden können. Bei kleinen Anlagen (Eintransformatorhaus u. dgl.), bei denen die Unterspannung für die Lampen zu hoch und die Aufstellung eines besonderen Transformators für Lichtzwecke zu teuer ist, muß man dann allerdings auf elektrische Beleuchtung verzichten und Benzin- oder ähnliche Lampen benutzen, die aber ständig in der Station gebrauchsfertig vorrätig sein müssen.

Nach diesen kurzen Angaben über den allgemeinen Aufbau von Transformatoranlagen soll nunmehr zu der Beschreibung ganzer ausgeführter Stationen übergegangen werden. Auch hier finden sich noch eine Reihe von Fingerzeigen, die für den projektierenden oder ein Projekt begutachtenden Ingenieur von Wichtigkeit sind.

K. Ausgeführte Transformatorstationen.

47. Transformatorstationen innerhalb vorhandener Gebäude.

Es handelt sich um den Anschluß von zwei Stationen in einer Fabrik, von denen die erste mit zunächst zwei Drehstromtransformatoren für je 100 KVA, Übersetzung 3100/230 Volt, Frequenz = 50 und einen solchen für 10 KVA, 3100/230 Volt ausgerüstet ist, während ein dritter 100 KVA-Transformator für spätere Erweiterungen in Aussicht genommen sein soll. Die Zahl der abgehenden Niederspannungsstromkreise ist recht bedeutend, und zwar muß Strom sowohl für Beleuchtung als auch für Motorenbetrieb geliefert werden.

Das Schaltungsschema zeigt die Fig. 237. Vom Kraftwerke führt nur eine Leitung zur Fabrik. Beim Eintritt derselben in die Station liegt vor den Haupttrennschaltern *Tr.* ein abtrennbarer Grobschutz, bestehend nur aus in Sterne geschalteten Hörnerfunkenstrecken *H.F.* Der Strom wird dann zunächst zu einer Sammelschiene geleitet, von der sich die gelieferte Energie nach den beiden Transformatorstationen verteilt, die vollkommen übereinstimmend geschaltet und mit den gleichen Instrumenten und Apparaten ausgerüstet sind, so daß das Lager von Ersatzteilen sehr beschränkt gehalten werden kann. Um Überspannungen aus dem Hochspannungsnetze von den Transformatoren fernzuhalten, ist an diese Sammelschienen noch ein wiederum leicht abzuschaltender Feinschutz gelegt, der aus einem dreipoligen Ölwidestande *Ö.W.* und drei Hörnerfunkenstrecken mit Relais *R.H.F.* besteht. Diese Relais gestatten bei der verhältnismäßig geringen Spannung von 3100 Volt ein weiteres als sonst zulässiges Einstellen der Hörner, weil durch ihre Ausbildung und Schaltung gewissermaßen eine Vermittlungsbrücke zwischen den letzteren geschaffen und die Funkenbildung im Bedarfsfalle, also die Ableitung der Überspannung begünstigt wird.

Bevor nun die Energie zu den eigentlichen Verteilungs-Hochspannungssammelschienen gelangt, wird sie gemessen, d. h. der Verbrauch durch einen an Meßtransformatoren angeschlossenen KW-Stundenzähler *Z.* für ungleichbelastete Phasen gezählt. Außerdem ist an einen der Spannungstransformatoren *Sp.Trf.*, die im übrigen besser auch noch niederspannungsseitig zu sichern wären, ein Spannungszeiger *Sp.Z.* angeschlossen, was notwendig ist, weil die Station I durch Trennschalter abschaltbar sein muß, ohne daß dabei die Station II gestört werden darf. Vor dem erneuten Inbetriebsetzen der Station I kann mit Hilfe dieses Spannungszeigers gefahrlos und schnell geprüft werden, ob die Leitung vom Kraftwerke aus unter Spannung steht. Außerdem ist natürlich die Höhe der gelieferten Spannung jederzeit kontrollierbar. Das Generalvoltmeter könnte natürlich auch an den Sammelschienen liegen, doch wäre dann noch ein Spannungstransformator notwendig, also die Beschaffungskosten höher, ohne daß man einen besonderen Vorteil damit erreichen würde.

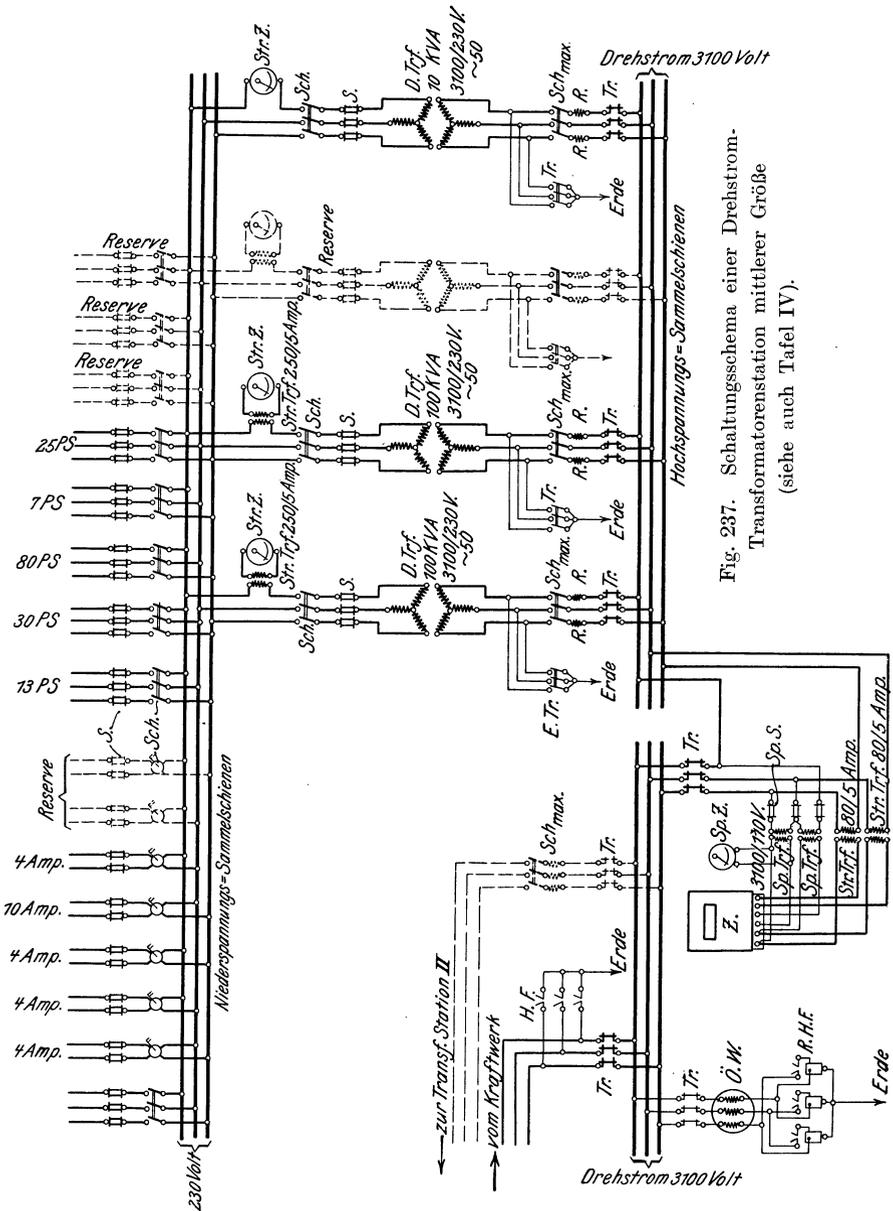


Fig. 237. Schaltungsschema einer Drehstrom-Transformatorstation mittlerer Größe (siehe auch Tafel IV).

An die Hochspannungssammelschienen sind nun alle Transformatoren parallel angeschlossen. Hier etwa ein Doppelsammelschienensystem zu wählen, hätte gewiß manche Vorzüge, wäre aber bei der verhältnismäßig kleinen Anlage, und da die Energie nur

für den eigenen Betrieb bestimmt ist, zu kostspielig geworden. Trennschalter *Tr.* gestatten, jeden Hochspannungs-Stromkreis spannungslos zu machen; zur Vornahme von Untersuchungen muß aber auch der Sekundärschalter *Sch.* ausgeschaltet werden, da anderenfalls Rücktransformation eintritt. An Apparaten sind hochspannungsseitig automatische Maximalölschalter *Sch.*_{max} und Erdungsschalter *E.Tr.*, und niederspannungsseitig Sicherungen *S.* und Momenthebelschalter *Sch.*

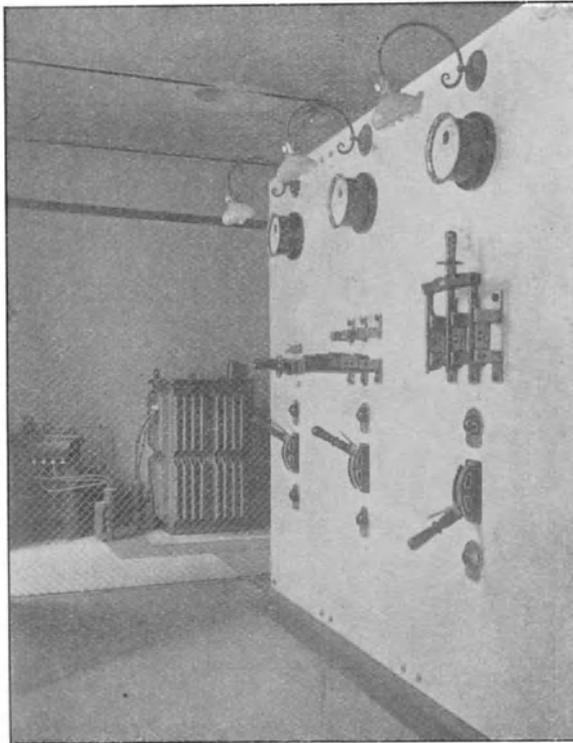


Fig. 238. Schalttafel und Transformatorraum zum Schaltungsschema Fig. 237.

vorhanden. Ein Stromzeiger *Str.Z.* der hohen Stromstärke wegen mit Stromtransformator *Str.Trf.* läßt die Belastung jedes Transformators erkennen. Für den 10 KVA-Transformator ist ein solcher Stromtransformator nicht nötig. Die Erdungsschalter haben die Form dreipoliger Trennschalter (Tafel IV) und die Aufgabe, in Gefahrenfällen die Gesamtanlage sofort überspannungsseitig an Erde legen, also spannungslos machen bzw. kurzschließen zu können.

Die Transformatoren sind dreiphasig und ölisoliert. Die abgehenden Stromkreise haben ebenfalls gemeinsame Sammelschienen. Die Anschlüsse für Beleuchtung liegen abwechselnd an den

einzelnen Phasen. Auf eine wenigstens einigermaßen gleichmäßige Belastung jeder Leitung ist durch entsprechende Verteilung der Lampen in den einzelnen Arbeitsstätten Rücksicht genommen worden. Für die Motorenanschlüsse sind hingegen Dreiphasenleitungen benutzt. Jeder Stromkreis ist ausschaltbar, und gesichert.

Für die Unterbringung der Gesamteinrichtung wurde ein besonderer, nur durch eine Türe zugänglicher, durch zwei Fenster hell erleuchteter Raum zu ebener Erde mit genügenden Abmessungen zur Verfügung gestellt. Die Fig. 238 zeigt einen Blick in diesen und zwar sowohl auf die Schalttafel, als auch auf die Aufstellung der Transformatoren. Letztere befinden sich seitlich der Schaltanlage; sie sind durch ein gerichtetes, engmaschiges Drahtgitter von dieser und dem Bedienungsgange getrennt. Die Leitungen zu und von den Transformatoren liegen in abgedeckten Kanälen, um volle Bedienungsfreiheit und ein geschmackvolles Aussehen des Aufstellungsplatzes der Transformatoren zu gewinnen.

Die Schalttafel (Fig. 238) besteht aus mehreren mit Marmortafeln ausgekleideten Feldern, auf denen die Meßinstrumente, die Hebel für die Ölschalter mit den Signallampen und die Niederspannungsschalter montiert sind. Die Niederspannungssicherungen und der Zähler sind auf der Rückseite der Tafel befestigt. Eine Anzahl von Beleuchtungsarmen gestattet auch in der Dunkelheit eine gute und sichere Bedienung der Einrichtungen und eine bequeme Aufsicht.

Sämtliche Hochspannungsapparate befinden sich in Eisengerüsten hinter der Schalttafel durch einen breiten Bedienungsgang von letzterer getrennt.

Die Tafel IV zeigt den vollständigen konstruktiven Aufbau dieses Teiles der Anlage. Aus dem Schnitt A—B erkennt man die eigentliche Schalttafel mit den Meßinstrumenten (*Sp.Z.*) und Schalterantrieben *Sch.* Auf der Rückseite liegen, wie bereits erwähnt, die Niederspannungssicherungen *S.*, und ferner befinden sich über denselben auf Isolatoren montiert die Niederspannungssammelschienen. Ein Bedienungsgang von 1000 mm Breite trennt die Schalttafel von den Hochspannungsgütern. Der Einbau der Spannungstransformatoren *Sp.Trf.* mit ihren Sicherungen *Sp.S.*, der Stromtransformatoren *Str.Trf.*, der automatischen Ölschalter *Sch._{max}* mit den auf die Kessel derselben aufgebauten Relais *R.*, und den von Hand zu betätigenden Hebelantrieben, sowie schließlich die Anordnung der Hochspannungssammelschienen, Trennschalter *Tr.* und Relais-Hörnerfunkenstrecken *R.H.F.* mit dem Ölwidestande *Ö.W.* ist ohne weitere Erklärung aus den Schnitten A—B und C—D zu ersehen. Für die Stromfortführungen vom Endverschlusse der Kraftwerksleitung, die im Transformatorenraume ebenfalls als Kabel ausgeführt ist, dienen blanke auf Isolatoren befestigte Rundkupferleitungen.

Aus der Rückansicht des Hochspannungsgütern und dem Schnitt C—D sind ferner als besonders hervorzuheben, die Erdungstrennschalter *E.Tr.* zu erkennen. Der Grundriß schließlich gibt ein Gesamtbild über

die Lage der einzelnen Apparate zueinander, der verschiedenen Sammelschienen, der Anordnung der Schalterantriebe usw.

Eine andere von dieser Transformatoranlage vollständig abweichende Station zeigt die Tafel V, für die das Schaltungsschema in Fig. 239 dargestellt ist.

Diese Station ist in der Karbidfabrik Narni der Società Industriale della Voluerina angelegt, und hat die Aufgabe, die von dem Kraftwerke Cervara gelieferte Drehstromenergie von 7800 KVA bei 27 000 Volt verketeteter Spannung, Freq. = 42, in solche mit einer Spannung von 55 Volt zum Betriebe der Karbidöfen zu transformieren¹⁾.

Der hochgespannte Strom wird vom Kraftwerke durch zwei an den gleichen Masten verlegte Kupferleitungen auf eine Entfernung von 14 km der Fabrik zugeführt. In der Zentrale ist jede der beiden Leitungen mit einem selbsttätig wirkenden Maximalölschalter, mit Grobschutz und Wasserstrahlerder ausgerüstet. Nach dem Eintritt der Fernleitungen

¹⁾ Das Kraftwerk und die Transformatorstation wurde von der Maschinenfabrik Oerlikon erbaut.

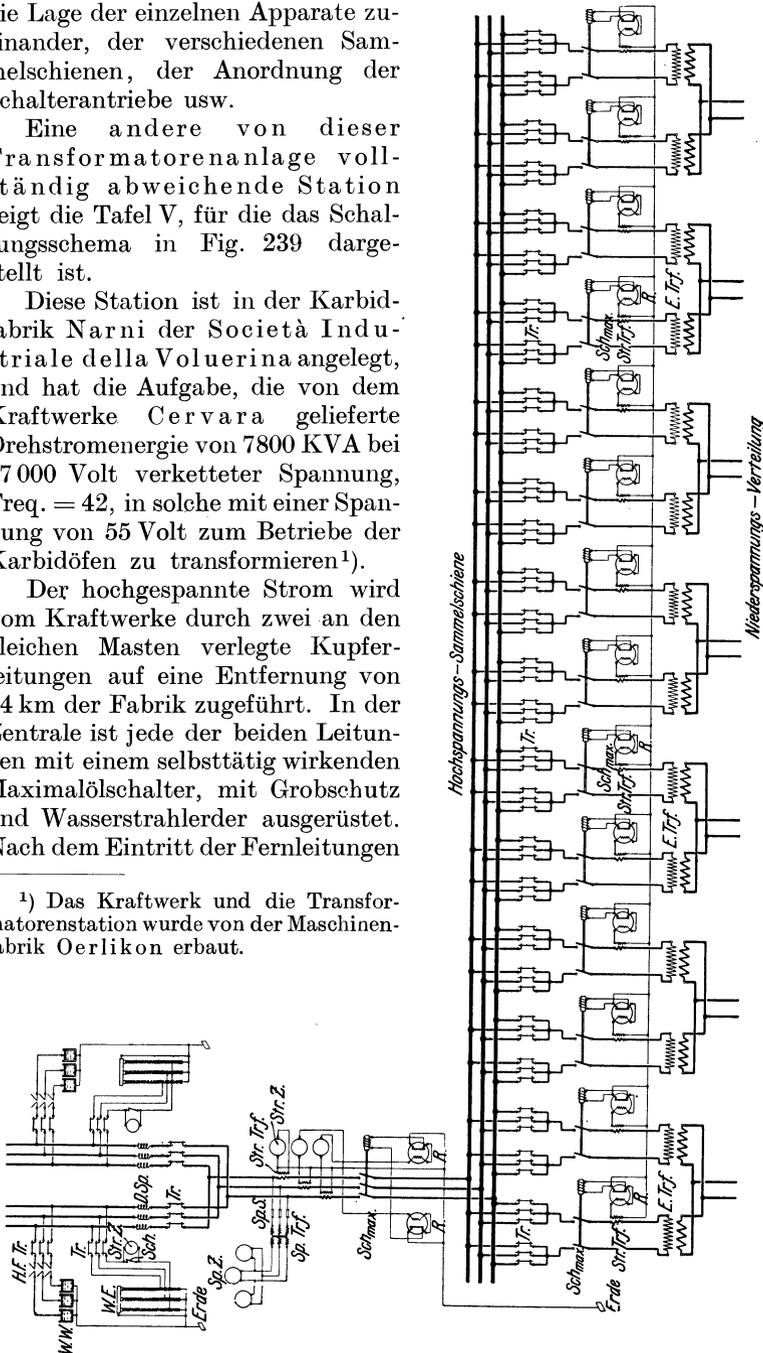


Fig. 239. Schaltungsschema der Transformatorstation Narni (siehe auch Tafel V).

in die Transformatorstation zweigen zunächst die gleichen Blitz- und Überspannungsschutzvorrichtungen ab (Grobschutz bestehend aus Hörnerfunkenstrecken *H.F.* mit Wasserwiderständen *W.W.* und Wasserstrahler der *W.E.*). Dann sind wiederum Drosselspulen *D.Sp.* und Trennschalter vorhanden. Die beiden Leitungen sind hiernach über ein einfaches Sammelschienensystem vereinigt; die gemeinsame Hauptleitung führt über einen Maximalölschalter *Sch.*_{max} mit Relais *R.* zu den Hochspannungssammelschienen, an denen die Transformatoren liegen. Da die Karbidöfen einphasig betrieben werden, und infolgedessen leicht ungleiche Phasenbelastung eintreten kann, so sind hochspannungsseitig drei Stromzeiger *Str.Z.* und drei Spannungszeiger *Sp.Z.* je an besondere Meßtransformatoren angeschlossen vorgesehen worden.

Von den 14 Transformatoren mit einer Leistung von je 650 KVA 27000/55 Volt, sind 12 Stück ständig im Betriebe, während der dreizehnte und vierzehnte in Reserve steht. Sie sind einphasig gewickelt, und werden zu je zwei hintereinander geschaltet. Drei der so gebildeten gewissermaßen großen Transformatoren können mit Hilfe von Trennschaltern *Tr.* je nach der Belastung der einzelnen Phasen durch die zu betreibenden Karbidöfen hochspannungsseitig in Dreieck mit den Sammelschienen verbunden werden, während sekundär eine Verkettung der einzelnen Phasen nicht stattfindet.

Da man durch die in der 27 000-Volt-Hauptleitung installierten Meßinstrumente den Betrieb nach jeder Richtung überwachen und regeln kann, so sind in den Transformatorstromkreisen nur automatische Maximalölschalter eingebaut, deren Relais *R.* zusammen mit je einem Stromzeiger für jeden Transformator (in Fig. 239 nicht gezeichnet) an kleine Stromtransformatoren *Str.Trf.* angeschlossen sind. Niederspannungsseitig wurden dagegen alle Apparate und Instrumente fortgelassen, weil sie vollkommen entbehrlich sind, und nur sehr teuer sein würden, denn sie müßten infolge der geringen Spannung von 55 Volt für sehr große Stromstärken bemessen sein.

Die innere Einrichtung der Station zeigt die Tafel V. Es ist ein Einführungsturm und das eigentliche Gebäude für die Transformatoren vorhanden. Der Turm enthält im obersten Stockwerke die Leitungseinführungen und in besonderen von beiden Seiten zugänglichen Zellen die Hörnerfunkenstrecken *H.F.* mit den Wasserwiderständen *W.W.* Die Trennschalter *Tr.* zum Abschalten dieser Schutzvorrichtungen sind von dem Hauptbedienungsgange bequem erreichbar, und sie können selbst dann, wenn z. B. die Funkenstrecken ansprechen und dabei zerstört sind, oder wenn die ganzen Schutzvorrichtungen infolge eines Zusammenschmelzens der Elektroden, der Explosion eines Wasserwiderstandes u. dgl. plötzlich abgeschaltet werden müssen, sofort betätigt werden, so daß an dieser Stelle etwa vorkommende Unfälle ohne Unterbrechung des Betriebes beseitigt werden können. Aus dem Grundriß des zweiten Stockwerkes erkennt man ferner, daß jede Phase in einer besonderen Zelle liegt. Es ist demnach die auf S. 302 erwähnte vollständige Phasentrennung zur Ausführung gekommen.

Durch Löcher in dem Fußboden, also unter Vermeidung von Porzellandurchführungen nehmen die ankommenden Leitungen ihren Weg nach dem ersten Stockwerke, wo die Drosselspulen *D. Sp.* und die Wasserstrahler der *W. E.* Aufstellung gefunden haben. Auch hier ist auf die gefahrlose und leichte Bedienung der Trennschalter *Tr.* für die Schutzapparate und derjenigen *Tr.* für die Stromkreise selbst besonders aufmerksam zu machen. Jede Phase liegt ferner wiederum für sich in einer Zelle.

Die Leitungen treten dann in das Erdgeschoß, vereinigen sich dort in den an der Decke angeordneten Sammelschienen *SS.*, und nur ein Stromkreis geht über den Ölschalter *Sch._{max}* und die Stromtransformatoren *Str. Trf.* nach dem Transformatorraum. Die Phasentrennung ist hier verlassen, und nur die einfache Zellenanordnung angewendet worden. Die Fig. 234, die der Narnianlage entstammt, zeigt den Einbau des Hauptschalters, die Verlegung der Leitungen, die Sammelschienen *SS.* über dem Schalter und in einer besonderen Zelle neben diesem den Drehstromspannungstransformator *Sp. Trf.* mit den Spannungssicherungen *Sp. S.* Letztere sind voneinander durch schützende Querwände aus feuerfestem Material getrennt. Im gleichen Raume sind auf einer Marmortafel die drei Stromzeiger, die drei Spannungszeiger und die beiden Relais vereinigt.

Nun verläßt die 27 000-Volt-Leitung den Turm und tritt durch Porzellanisolierteile in den Transformatorraum ein, der im Erdgeschoß des einstöckigen Vorraumes zum Ofenhaus der Karbidfabrik gewählt worden ist.

Die Transformatoranlage bildet ein ziemlich langgestrecktes Gebäude, auf dessen linker Seite sich die Zellen für die Transformatoren *E. Trf.* und auf dessen anderer Seite durch einen breiten Bedienungsgang getrennt, die Einschaltstellen für die Transformatoren befinden. Die Sammelschienen für 27 000 Volt durchziehen den Raum in seiner ganzen Länge; von ihnen zweigen die Verbindungen nach den ebenfalls in Zellen untergebrachten Transformatorschaltern *Sch._{max}* ab. Jede solche Zelle enthält den Maximalölschalter, einen Stromzeiger und ein Zeitrelais mit einem Stromtransformator *Str. Trf.* für beide. Die Instrumente sind vor den Zellen installiert, um sie gefahrlos und aus größerer Entfernung beobachten zu können. Aus der Fig. 236, die sich ebenfalls auf diese Anlage bezieht, ist die Anordnung ersichtlich.

Die Transformatoren stehen jeder für sich in einer vollständig abschließbaren feuerfesten Zelle. Sie sind für künstliche Luftkühlung, die durch einen Kanal im Fußboden erfolgt, eingerichtet. Ihre Niederspannungsklemmen sind unmittelbar an die Karbidöfen angeschlossen. Ein auf Schienen laufender Wagen vor den Transformatorzellen gestattet schließlich jeden Transformator schnell und bequem aus- und einfahren zu können.

Von den 27 000-Volt-Sammelschienen zweigt noch ein kleiner Transformator ab, der Strom für Motoren und für die Beleuchtung liefert. Dieser ist im Schaltungsschema Fig. 239 nicht gezeichnet.

48. Selbständige Transformatorstationen für Überlandzentralen u. dgl. mit einem oder zwei Transformatoren bis etwa 15000 Volt Oberspannung.

Hier handelt es sich um selbständige Stationen, die in größerer Zahl z. B. im Gebiete jeder Überlandzentrale zu errichten und in der Hauptsache sehr billig zu bauen sind.



Fig. 240. Transformatorurm für Überlandzentralen.

In Fig. 240 ist zunächst die äußere Ansicht eines solchen Transformatorhauses¹⁾ wiedergegeben, wie man es für den Anschluß einzelner größerer Güter, Gemeinden und ähnlicher Stromversorgungsgebiete neuerdings sehr häufig findet. Dasselbe ist in Form eines Turmes gehalten, und aus Ziegelmauerwerk hergestellt. Schon z. B. durch verschiedenfarbig gebrannte Ziegel, Absetzen einfacher Linien, Einrahmung von Fenstern und Türen läßt sich die Einförmigkeit vermeiden, und die sonst gewiß nicht gerade fesselnde Schönheit eines solchen Baues verbessern.

¹⁾ Ausgeführt von der A. E. G. Berlin.

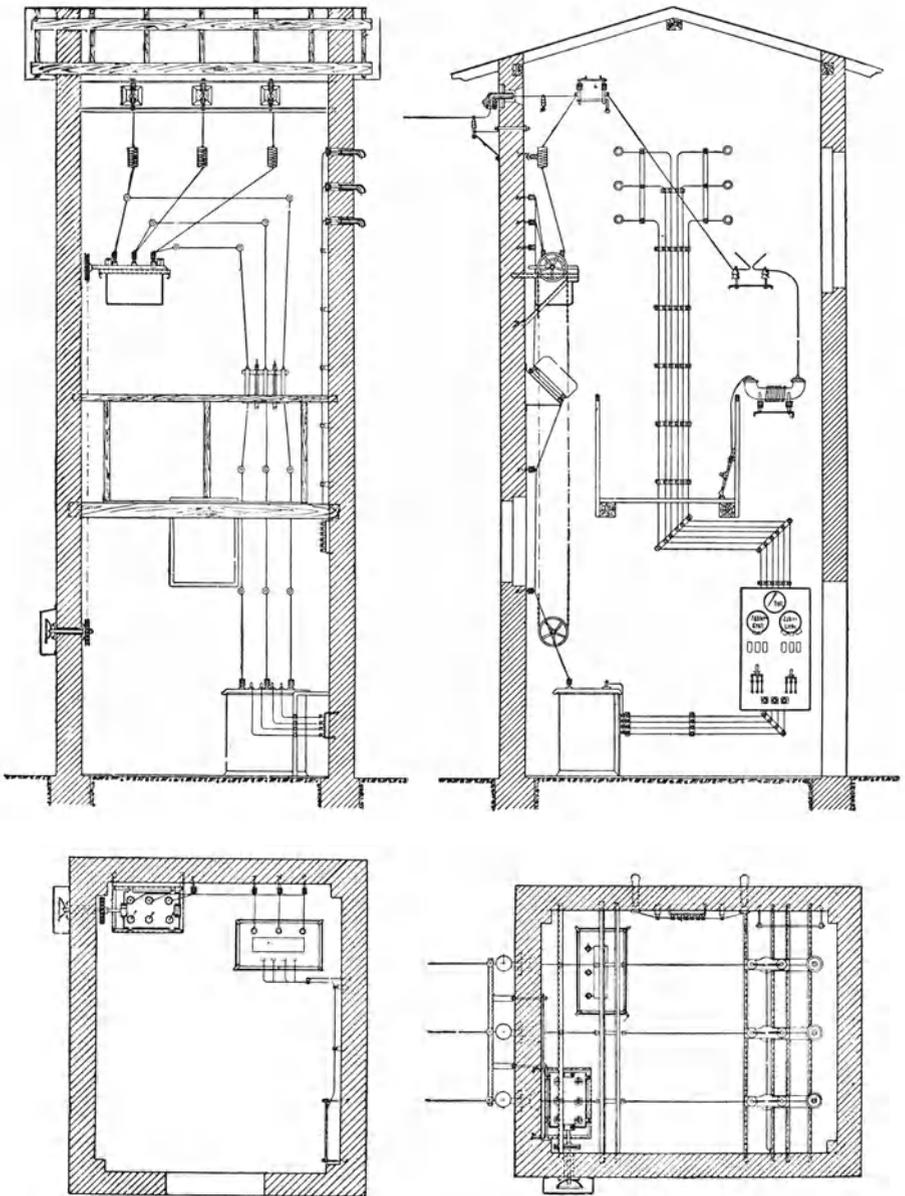


Fig. 241 a.

Fig. 241 b.

Inneneinrichtung des Transformatorturmes nach Fig. 240.

Die innere Einrichtung des aus zwei übereinanderliegenden Räumen bestehenden Turmes ist in Fig. 241a bis d und das Schaltungsschema in Fig. 242 dargestellt. Die Hochspannungsleitung tritt an der

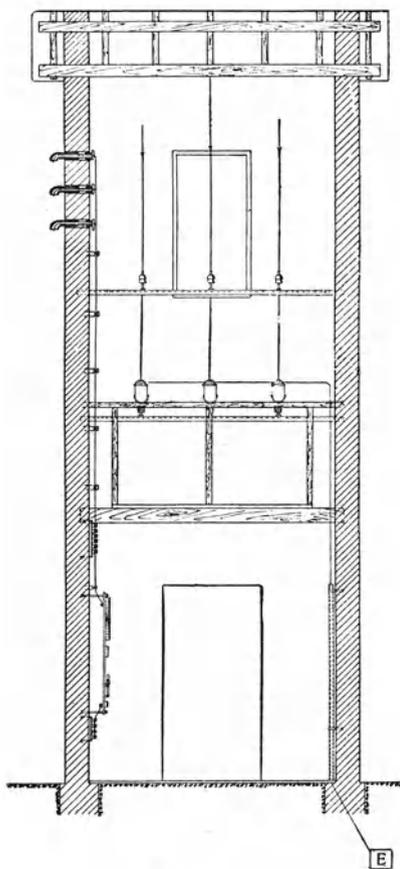


Fig. 241 c.

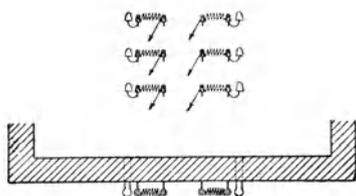


Fig. 241 d.

Inneneinrichtung des Transformatorturmes nach Fig. 240.

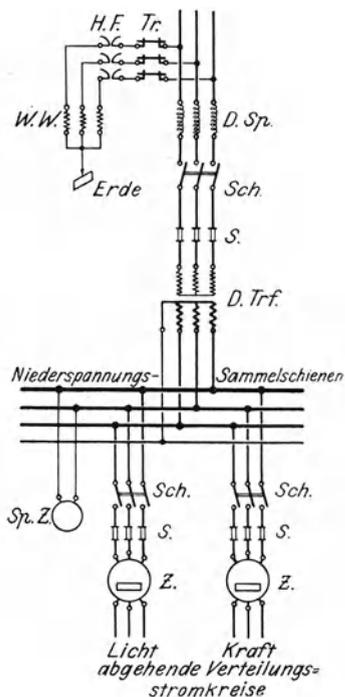


Fig. 242.

einen Gebäudeseite durch gebogene Porzellanrohre, die auf einer Porzellanplatte montiert sind, ein und verzweigt sich. Im ersten Zweige gelangt sie zuerst zu Drosselspulen *D.Sp.*; von dort führt sie über einen Ölschalter *Sch.* (nicht selbsttätig wirkend) und Hochspannungssicherungen *S.* nach dem zu ebener Erde aufgestellten Transformator. Ölschalter und Hochspannungssicherungen, sowie die Apparate des zweiten Zweiges — die kurz hinter der Einführung über Trennschalter *Tr.* abzweigende Blitzschutzvorrichtung bestehend aus Hörnerfunkenstrecken

H.F. und Wasserwiderständen *W.W.* — also alle Hochspannungsapparate befinden sich im oberen Stockwerke. Mit dieser Anordnung der Blitzschutzapparate wird gleichzeitig die Bedingung erfüllt, daß dieselben

— bei Anlagen kleineren Umfanges die Hörnerfunkenstrecken, bei großen Stationen der Grobschutz für jeden Stromkreis — unmittelbar bei der Einführung der Leitungen in das Gebäude und im geradlinigen Verlauf mit denselben liegen und alle Kanten, scharfen Krümmungen und sonstigen Richtungsänderungen möglichst vermieden werden müssen, damit der Gefahr vorgebeugt wird, daß z. B. atmosphärische Entladungen auf andere Teile der Anlage (Eisenkonstruktionen u. dgl.) überspringen, also den vorgeschriebenen Weg vermeiden, und dann unliebsame Zerstörungen an anderen Stellen hervorrufen.

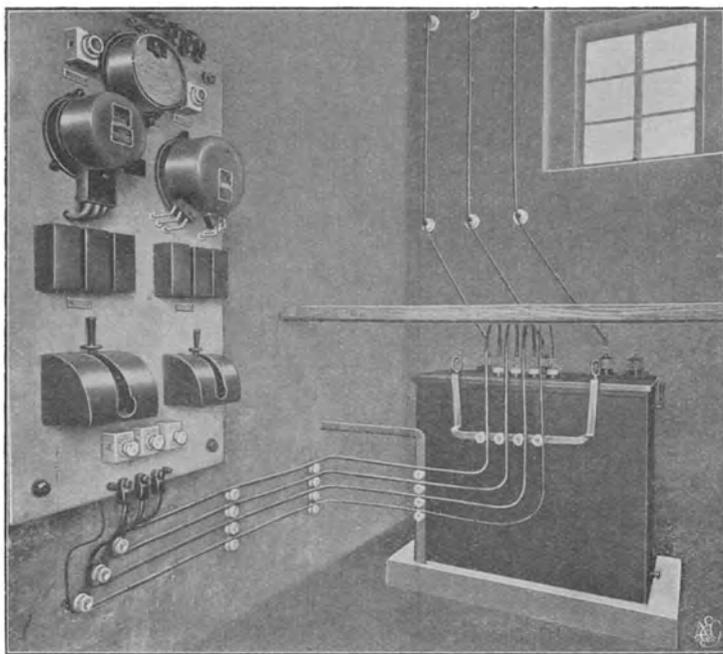


Fig. 243. Schalttafel und Transformator zum Transformatorturne Fig. 240.

Durch den Ölschalter, dessen Antrieb (Handrad) außerhalb der Station in einem verschließbaren Eisenblechkasten liegt, kann der Transformator spannungslos gemacht werden, und zwar noch bevor man die Station betritt. Unter Umständen, wenn z. B. mit weniger geschulten oder unzuverlässigen Leuten für die gelegentliche Untersuchung der Innenräume der Station zu rechnen ist, empfiehlt es sich, die Zugangstüre mit dem Ölschalter mechanisch so zusammen zu verbinden (verriegeln), daß erstere nicht eher geöffnet werden kann, bevor der Schalter nicht ausgeschaltet ist. Besser wäre es indessen noch, wenn unmittelbar hinter dem Leitungseintritte wiederum Trennschalter liegen würden, damit man auch den Ölschalter selbst spannungslos machen könnte,

was jetzt nur dadurch erreichbar ist, daß die Fern- oder Stickleitung abgeschaltet wird.

Im unteren Raume befindet sich, wie bereits gesagt, und zwar an einer Rückwand aufgestellt der Transformator, vor den zur Warnung und Fernhaltung ein Holzgeländer gelegt ist (Fig. 243). Neben der



Fig. 244. Kleiner Transformorturm mit einem Transformator.

Eingangstüre ist die Niederspannungsschalttafel angebracht. Auf ihr sind montiert die Hebelschalter mit Schutzkappen, die Sicherungen und Zähler für zwei Stromkreise — ein Kraft- und ein Lichtstromkreis¹⁾ —, ferner ein Spannungszeiger (Generalvoltmeter) für Niederspannung und besondere Sicherungen gegen Überspannungen (im Schaltungsschema

¹⁾ Eine solche Trennung der Stromkreise mit eigenem Zähler ist bei Strombezug aus Überlandkraftwerken stets dann notwendig, wenn gesonderte Tarife für Kraft- und Lichtstrom bestehen.

nicht gezeichnet), die indessen nicht unbedingt notwendig sind, wenn das als Freileitung ausgeführte Sekundärnetz keine große Ausdehnung hat. Der Einführung der Hochspannung entgegengesetzt verlassen dann die ebenfalls als Freileitung hergestellten Niederspannungsleitungen das Transformatorhaus. Die verschiedenen Längs- und Querschnitte dieses Turmes lassen deutlich die Leitungsführung und auch die gewählte Schaltung, sowie den Einbau aller Apparate erkennen. Alle Leitungen bestehen aus blankem Rundkupfer auf Isolatoren verlegt. Zur Befestigung der Schalter usw. sind kleine Profileisen benutzt. Alle Eisenteile für die Befestigung von Apparaten, die Kessel von Schalter und Transformator u. dgl. sind besonders geerdet.

Eine andere Station, die demselben Zwecke dient, wie die soeben beschriebene, zeigt die Fig. 244¹⁾. Die Baukosten eines derartigen kleinen Häuschens — Fachwerk und Ziegel mit Pappdach — sind verhältnismäßig sehr gering. Allerdings dient dasselbe auch nur zur Aufnahme eines kleinen Transformators bis etwa 20 KVA, den man in der Fig. 244 deutlich zu ebener Erde erkennt. Über diesem sind nur abschaltbare Hochspannungssicherungen für die Primärseite eingebaut, d. h. solche Sicherungen, deren Schmelzeinsätze in Porzellanrohren liegen und komplett mittels einer Isolierzange herausgenommen werden können. Meßinstrumente, mit Ausnahme eines Zählers, sind ganz fortgelassen. Da fast unmittelbar vor dem Hause ein eiserner Leitungsmast steht, an welchem die Hochspannungsleitung abgespannt ist, kann der Turm des Hauses verhältnismäßig leicht gebaut sein, weil er durch die Leitungen auf Zug nicht beansprucht wird.

Derartige niedrige Fachwerkbauten sind ferner in Erdbeben-gegenden, auf Plätzen, die nur eine geringe Bodenbelastung mit genügender Sicherheit für dauernde Haltbarkeit des Fundamentes zulassen und in ähnlichen Fällen besser als schmale und hohe Türme ganz aus Mauerwerk, weil die Holzverbände im Notfalle noch halten, und bei Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit der Transformatorstation im Notfalle wenigstens Beleuchtung geschaffen werden kann. Außerdem können solche Häuschen zumeist von ortangesessenen Handwerkern gebaut werden, fallen dann fast stets erheblich billiger aus, und es wird das Interesse z. B. der einzelnen Gemeindemitglieder wie Ortschmied, Maurer, Tischler, Dachdecker usw. an der Überlandzentrale gehoben.

Einen Transformatorernturm ähnlich der auf S. 313 beschriebenen Bauart zeigt auch die Fig. 245, nur dient derselbe hier zur Aufnahme von zwei Transformatoren. An Hand des beigezeichneten Schaltungsschemas ist der Stromverlauf innerhalb des Gebäudes leicht verfolgbar. An Stelle der Haupttrennschalter ist hier ein Masttrennschalter benutzt, wie er auch für das Abschalten von Stichleitungen oder einzelnen Abschnitten der Hochspannungsleitung selbst Verwendung findet. Die Betätigung dieses Schalters erfolgt mittels Kurbel und Gestänge. Der

¹⁾ Ausgeführt von den Siemens-Schuckert-Werken, Berlin.

Vorteil einer solchen Form der Abschaltung einer Station liegt darin, daß noch vor Betreten des Hauses die ganze Inneneinrichtung spannungslos gemacht, und ferner die Bildung eines oberen Stockwerkes für die Hochspannungsapparate, das nur über eine Treppe oder Leiter erreichbar ist, vermieden werden kann. Durch den Fortfall der Zwischendecke und der Treppe wird der Bau an sich billiger, einfacher und kleiner, und die Apparate können vom Erdboden aus sämtlich bequem besichtigt werden. Außerdem kann man sich schon außerhalb der Station davon überzeugen, ob dieselbe spannungslos ist.

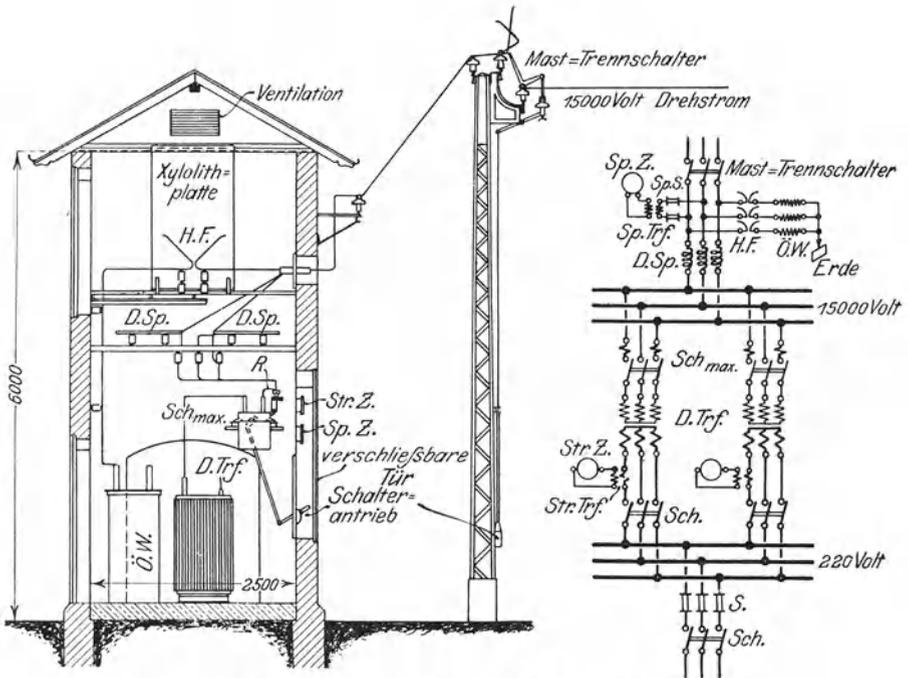


Fig. 245. Transformatorsturm mit zwei Transformatoren.

Das über die Anlage der Blitzschutzapparate auf S. 316 Gesagte trifft auch für diese Fig. 245 wiederum zu. Zwischen die Hörnerfunkenstrecken *H.F.* sind noch feuerfeste Zwischenwände aus Xylolith, Bambusfaser od. dgl. eingebaut, um zu verhüten, daß beim Auftreten von Lichtbögen ein Zusammenschlagen derselben und damit ein Kurzschluß eintritt. An Stelle von Wasserwiderständen sind hier Öl widerstände *Ö.W.* benutzt; außerdem sind die Ölschalter hochspannungsseitig selbsttätig bei Überlastungen wirkend gewählt. Niederspannungsseitig sind die Transformatoren nicht mehr gesichert, dafür aber die abgehenden Stromkreise, bei denen nach früher Gesagtem allerdings die Sicherungen *S.* besser hinter den Schaltern *Sch.* liegen müßten. An Meßinstrumenten sind vorhanden: ein Spannungszeiger *Sp.Z.* hochspannungsseitig

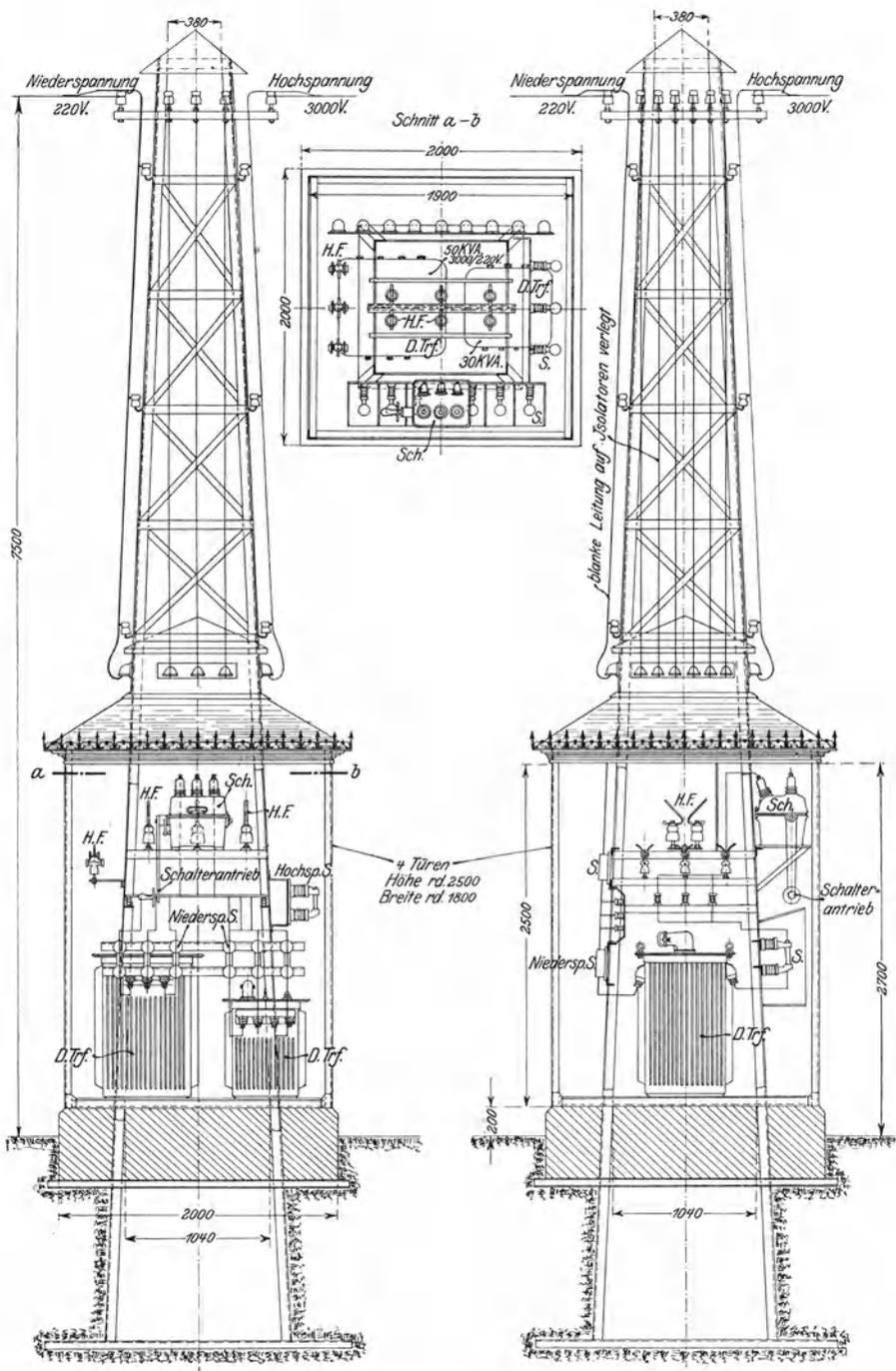


Fig. 246. Eisernes Transformatorenhaus mit Leitungsmast für die ankommenden und abgehenden Stromkreise.

dicht hinter dem Eintritt in das Gebäude abzweigt, sowie je ein Stromzeiger *Str.Z.* auf der Sekundärseite der Transformatoren. Alle Instrumente liegen an Meßtransformatoren. Der Spannungstransformator hätte vorteilhafter auch noch Niederspannungssicherungen erhalten können.

Die Meßinstrumente und die Antriebe für die Ölschalter sind an der Außenwand des Gebäudes in einer Mauervertiefung untergebracht, die durch eine eiserne Türe abgeschlossen ist. Auf diese Weise kann man also die Instrumente beobachten, die Transformatoren aus- oder zuschalten, kurz den ganzen Betrieb und das Arbeiten der Station prüfen und leiten, ohne das Gebäude betreten zu müssen. Schließlich sei noch auf die Belüftung aufmerksam gemacht, die durch Maueröffnungen erfolgt.

Ein von den bisher beschriebenen Ausführungen gänzlich abweichendes Transformatorhaus zeigt die Fig. 246. Dasselbe ist vollständig aus Eisen hergestellt, und zwar benutzt man entweder einen quadratischen eisernen Gittermast, um den ein Raum durch Eisenblech mit Dach abgegrenzt, oder eine Wellblechbude, auf die bei oberirdischer Leitungsführung ein eiserner Turm aufgesetzt wird. In der Regel ist nur ein Raum vorhanden, in dem die Hoch- und Niederspannungsapparate untergebracht sind. An solchen enthält der Turm nach Fig. 246: einfache Ölschalter *Sch.*, Sicherungen *S.* und unmittelbar geerdete Hörnerfunkenstrecken *H.F.* auf der Oberspannungs-, Sicherungen *S.* und kleine Hörnerfunkenstrecken *H.F.* auf der Unterspannungsseite. Die Transformatoren mit Ölfüllung *D.Trf.* stehen wieder zu ebener Erde, und zwar sind sie in ihren Leistungen verschieden groß. Aus den einzelnen Ansichten der Fig. 246 ist der Einbau der Apparate usw. und auch der Stromverlauf deutlich erkennbar.

Eine derartige Transformatorstation ist etwas teurer als ein gleich großer Ziegelbau, und im allgemeinen nur geeignet, wenn es sich um Spannungen bis etwa 5000 Volt handelt. Über diese Spannung hinaus wird die Anlage infolge der größeren Zahl von Apparaten, der damit verbundenen umfangreicheren Raumabmessungen und der notwendigen reichlicheren Isolation durch größere Leiterabstände, größere Isolatoren usw. zu kostspielig. Auch die Leitungsführung am Turme kann mit Rücksicht auf den Abstand der Leitungen für die einzelnen Phasen bei höheren Spannungen nicht mehr gewählt werden, wenn die geschmackvolle Form durch die Benutzung von Isolatorenträgern (Traversen) nicht leiden soll.

Wellblechbuden zum Unterbringen des Transformators findet man häufig auf Fabrikgrundstücken. Sonst sind eiserne Türme für diese Zwecke dort zu benutzen, wo das Material für Ziegelmauerwerk schwer zu beschaffen oder umständlich hinzutransportieren ist (schlechte Wege, z. B. in Überseeländern, Gebirgsgegenden u. dgl.), weil dieselben in der Werkstatt fertig montiert, dann vollständig in Teile mit geringem Gewicht zerlegt und an Ort und Stelle ohne große Mühe wieder zusammengesetzt werden können.

49. Transformatorstationen innerhalb großer Städte.

a) **Oberirdische Aufstellung der Transformatoren.** Innerhalb größerer Städte können weder Türme aus Ziegelmauerwerk, noch aus Eisenkonstruktion der beschriebenen Art verwendet werden, wenn sie nicht durch architektonische Ausgestaltung unverhältnismäßig teuer ausfallen sollen. Außerdem kommen auch Hochspannungen über etwa 3000 bis 5000 Volt sehr selten vor, und infolgedessen ist der für die Apparate erforderliche Platz nicht allzu bedeutend. Ferner sind die Leitungen zumeist als unterirdische Kabel verlegt. Man verwendet daher für diese Zwecke fast durchweg entweder eiserne Kästen, wenn es sich nur um einen kleinen Transformator für verhältnismäßig geringes Übersetzungsverhältnis handelt, oder runde Säulen aus Eisenblech, ähnlich wie die Plakat-Anschlagssäulen, oder bildet schließlich letztere selbst zur Transformatorstation aus wie in Fig. 247 abgebildet. Hier sind zwei Transformatoren übereinander, dieses Mal aber nicht zu ebener Erde aufgestellt, und das aus dem Grunde, weil die Leitungen — ankommende und abgehende — als Kabel im Straßenpflaster liegen. Somit müssen mit Rücksicht auf eine gute Leitungsführung innerhalb des Raumes und eine leichte Bedienung der Schalter und Sicherungen von der Straße aus die Apparate möglichst tief angeordnet sein.

b) **Unterirdische Aufstellung der Transformatoren.** Im Gegensatz zu den oberirdisch angelegten Transformatorenhäusern findet man besonders in dicht bebauten Städten, auf dekorativen Plätzen und bei ähnlichen Gelegenheiten Schwierigkeiten in der Beschaffung eines geeigneten Ortes zur Errichtung der Transformatorstation. In solchen Fällen bleibt dann oft keine andere Möglichkeit, als den Transformator unterirdisch aufzustellen, selbstverständlich aber nur dann, wenn die Verteilungsleitungen nicht oberirdisch, sondern als Kabel im Straßenpflaster verlegt sind.

Die Anlage einer derartigen, vollständigen Transformatorstation unter Pflaster verursacht jedoch erhebliche Kosten durch das Ausschachten der Baugrube, das Ausbetonieren derselben im Fußboden und allen Wänden, die Herstellung der Straßendecke und des Einsteigeschachtes. Ferner ist es oftmals sehr mühevoll, solche Räume gegen das Eindringen von Feuchtigkeit, Straßenschmutz usw. dauernd genügend und sicher zu schützen, und zugleich für ausreichende Belüftung zu sorgen. Schließlich ist es für städtische Verteilungsnetze auch mit Rücksicht auf eine günstigere Anpassung an die Energiebedarfsverhältnisse und auf die leichtere Lokalisierung bei Betriebsstörungen vorteilhafter, mehrere kleinere Transformatorstationen zu errichten als wenige größere. Um nun diesen besonderen Verhältnissen in passender Weise Rechnung zu tragen, hat z. B. die Maschinenfabrik Oerlikon eigene Formen von Transformatoren durchgebildet, die für die unterirdische Aufstellung bestimmt sind¹⁾. Jeder Transformator bildet auf

¹⁾ Solche unterirdische Transformatorstationen hat Oerlikon für die Stadt Luzern geliefert.

diese Weise eine kleine Station für sich, die fast ebenso leicht zugänglich ist, wie eine oberirdische, ohne daß durch sie der Verkehr auf der Straße behindert oder das Straßenbild beeinträchtigt wird.

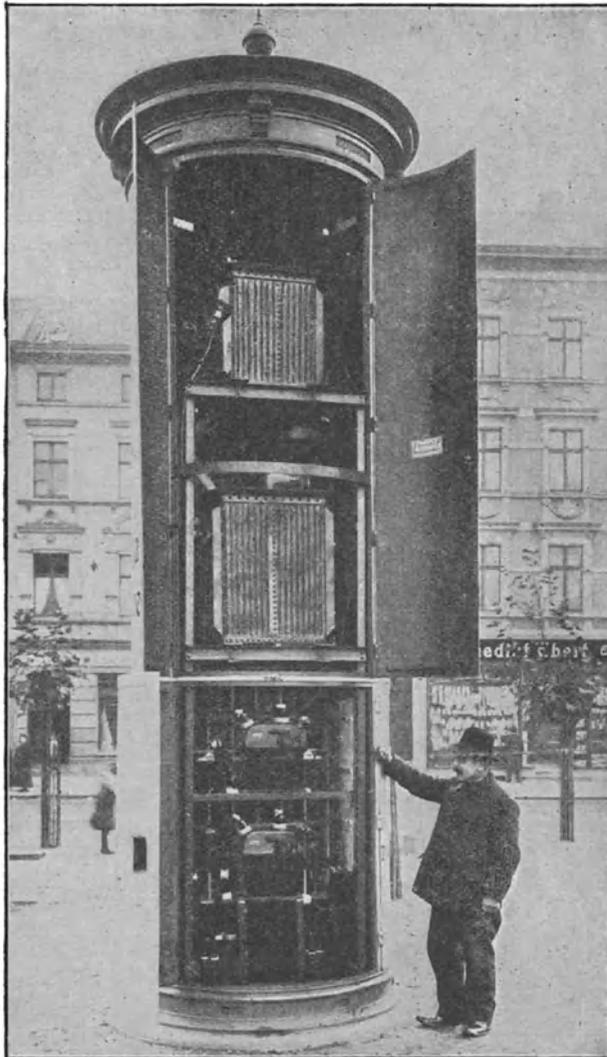


Fig. 247. Eiserner Transformerturm innerhalb einer Stadt in der Form einer Plakatsäule.

In Fig. 248 ist eine solche Transformatorstation abgebildet. Der aktive Transformator — die Eisenkerne mit den Wicklungen — ist in einem genieteten Kasten aus Eisenblech untergebracht, der mit Öl

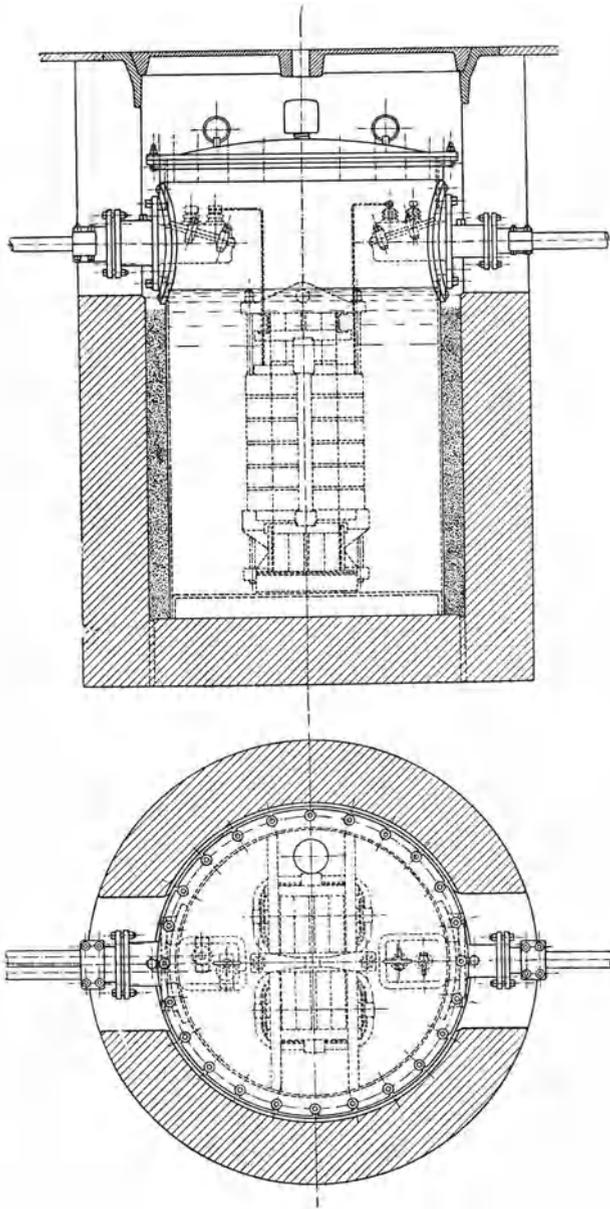


Fig. 248. Unterirdische Transformatorstation.

gefüllt ist, denn aus betriebstechnischen Gründen kann auch für derartige Verhältnisse nur die ölisierte Type zur Verwendung kommen. Der Transformator steht frei in dem Kasten, und wird nur durch zwei I-Eisen zentriert, kann also bequem herausgehoben werden. Der Kasten ist mit einem abhebbaren, leicht verschließbaren und gut abdichtenden Deckel versehen. An dem oberen Teile des Kastens sind diametral zwei gußeiserne Kabelendverschlüsse angeordnet, durch welche die ankommenden und abgehenden Kabelleitungen in das Innere des Kastens eingeführt werden. Zur größeren Sicherheit gegen das Eindringen von Feuchtigkeit werden diese Verschlusskästen noch mit einer Isoliermasse ausgegossen. In Fig. 248 besteht die Zuleitung aus einem Kabel, die Ableitung, weil viele Abzweigungen vorhanden sind, aus zwei getrennten Kabeln. Der Deckel des Ölkastens ist gewölbt ausgeführt, um ein sicheres Abfließen etwa in die Transformatorgrube eingedrunnenen Regenwassers zu bewirken.

Der ganze Transformatorkasten wird in eine auszementierte oder ausbetonierte Grube versenkt, in welcher er bis zur Höhe der Kabel-

endverschlüsse in Kies eingebettet steht. Das etwa eindringende Regenwasser sickert durch diese Kiesschicht durch, und fließt durch vier im Boden angeordnete Kanäle ab. Dieser Boden ruht auf einer weiteren Kiesschicht, die den Zweck hat, Wasseransammlungen unter der Grube zu verhüten. Die Grube wird oben durch einen gußeisernen Deckel verschlossen.

Werden die Transformatoren nicht unter dem Fahrdamm, sondern unter dem Bürgersteige aufgestellt, so können die Deckel leicht genug ausgeführt werden, damit zwei Mann sie bequem abheben können.

Die zu jedem Transformator gehörenden Apparate wie Ausschalter und Sicherungen sind in der Regel in zwei anderen Ölkästen neben dem Transformator untergebracht, oder es werden die Apparate aller Transformatoren eines Versorgungsgebietes in einer Zentralstelle, die ähnlich ausgebildet ist, vereinigt.

50. Große selbständige Transformatorstationen.

Handelt es sich um die Transformierung sehr hoher Spannungen bei großen Energiemengen, dann spielen bei der Errichtung einer solchen Station weniger geringe Unterschiede in den Anlagekosten, als vielmehr die Zweckmäßigkeit und betriebssicherste Ausgestaltung der Inneneinrichtung die Hauptrolle. Es kommt oft schon ein recht ansehnliches Gebäude in Frage, und hier gilt dann ganz besonders das auf S. 301 über die äußeren Formen und Linien Gesagte, die dem Bau zu geben sind. In der Regel werden solche großen Stationen, weil sie zumeist weit vom Kraftwerke entfernt liegen, auch so gebaut, daß sie eine oder zwei Wohnungen für Betriebsbeamte, Streckenwärter und Monteure, und ferner Lagerräume für kleinere Reserve-Streckentransformatoren, Leitungsmaterial, Isolatoren usw. enthalten. Ferner sind Telephoneinrichtungen vorzusehen, die eine schnelle Verbindung mit dem Kraftwerke und anderen benachbarten Stationen, sofern sie auf denselben Netzteil arbeiten, oder in Notfällen zu einem solchen gebracht werden können, gestatten. Das Staatstelephon auf dem üblichen Wege zu benutzen, ist im allgemeinen nicht ratsam, da die Herstellung der Verbindung, namentlich in ländlichen Gegenden, zu langsam und zu unsicher erfolgt, und oftmals größte Eile in der Umschaltung notwendig ist, wenn nicht unangenehme und längere Betriebsstörungen eintreten sollen.

Als Beispiel für diesen Abschnitt ist nun die von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaute Transformatorstation bei Neuhausen in der Schweiz gewählt worden, die in allen Einzelheiten behandelt werden soll.

Zur Versorgung des Kantons Schaffhausen mit elektrischer Energie für alle Städte, Gemeinden, Anwesen usw. wurde von der Erbauung eines teureren selbständigen Wasserkraftwerkes abgesehen, sondern mit den Beznau - Löntsch-Werken ein Stromlieferungsvertrag abgeschlossen, gemäß dessen der Kanton die Energie in Form von Dreiphasenwechselstrom von 50 Perioden und 25 000 Volt verketteter Spannung bezieht. Die sekundäre Transformierung und Verteilung des

elektrischen Stromes ist Sache des kantonalen Elektrizitätswerkes, das hier also entgegen der allgemein unter dieser Bezeichnung verstandenen Form nicht mit Maschinen ausgerüstet ist, sondern einfach aus einer großen Transformatorenstation besteht. Die gelieferte elektrische Energie wird in dieser Haupttransformatorenstation bei Neuhausen auf eine Spannung von 10 000 Volt transformiert, und mit dieser Spannung das Primärverteilungsnetz und die Sekundärtransformatorenstationen gespeist. Die Gesamtanlage entspricht also der in Fig. 149 gekennzeichneten mit Hochspannung (25 000 Volt), Mittelspannung (10 000 Volt) und Niederspannung (von den Sekundärtransformatorenstationen verteilte Energie mit den Gebrauchsspannungen



Fig. 249. Äußere Ansicht der Transformatorenstation Neuhausen.

von 380 bzw. 220 Volt). Die Mittelspannung ergab sich aus der Ausdehnung des Verteilungsnetzes und dem wirtschaftlichen Spannungsverluste bzw. dem noch ökonomisch zulässigen geringsten Leitungsquerschnitte. Die hierfür notwendigen Erläuterungen und Berechnungen werden im II. Bande ausführliche Behandlung finden.

Zunächst sei hinsichtlich der Station selbst kurz bemerkt, daß der Ausgestaltung der äußeren Bauform ganz besondere Sorgfalt zugewendet worden ist. Das Gebäude (Fig. 249), das auf einem Hügel bei Neuhausen, dem sog. Galgenberge, errichtet worden ist, fällt schon von weitem durch sein gefälliges Äußere auf, und zwar weil bei dem Entwürfe desselben den Heimatsschutzbestrebungen in weitgehendstem Maße Rechnung getragen worden ist, ohne selbstverständlich die Hauptbedingung einer zweckmäßigen, der technischen Bestimmung angepaßten Raumverteilung zu beeinträchtigen. Der Bau gliedert sich in: Turm, Hauptgebäude und Wohnhaus für den Aufsichtsbeamten und einen Streckenwärter.

Da die von den Beznau-Löntschi-Werken zurzeit zur Verfügung gestellte Spannung von 25 000 Volt mit wachsendem Energiebedarfe voraussichtlich später auf 45 000 Volt erhöht werden wird, ist auch die Oberspannungsanlage der Neuhausener Station von vornherein mit Apparaten für 45 000 Volt ausgerüstet, und die Anordnung und Isolierung derselben, der Sammelschienen und sonstigen Leitungen für diese Spannung entsprechend getroffen worden. Die Transformatoren sind gleichfalls durch einfaches Vertauschen der Hochspannungsanschlüsse von 25 000 auf 45 000 Volt umschaltbar. Mit dieser Maßregel gleichbedeutend ist aber auch die dadurch erreichte leichte Erweiterungsfähigkeit der Station, ohne daß es dann notwendig ist, mit der Steigerung der bezogenen Energiemengen neue kostspielige Zuführungsleitungen zu bauen, weil mit der Erhöhung der Spannung auf 45 000 Volt der Spannungs- bzw. Energieverlust trotz der Zunahme der Energiemenge und unverändert gebliebenem Leitungsquerschnitt die wirtschaftliche Grenze nicht überschreiten wird. Auf eine solche Weitsichtigkeit bei der Projektierung einer größeren Anlage ist schon wiederholt ganz besonders aufmerksam gemacht worden. Auch hat man bei dem Bau der ganzen Station schließlich darauf Rücksicht genommen, daß die elektrische Energie später einmal von einem eigenen Werke geliefert werden kann.

Einem früher aufgestellten Grundsatz entsprechend ist das Schaltungsschema (Fig. 250) der Raumeinteilung und Raumabmessung zugrunde gelegt worden, und daher soll allen weiteren Erklärungen die Betrachtung desselben vorangehen.

In die ankommende Leitung — es ist zunächst nur eine solche vorhanden — sind naturgemäß Haupttrennschalter *Tr.* eingebaut, um die Station vollständig spannungslos machen zu können, ohne das Kraftwerk veranlassen zu müssen, erst dortseits oder auf der Strecke die Hochspannungsleitung auszuschalten. So werden demnach andere Stationen oder sonstige Stromverbraucher, die noch an diese Leitung angeschlossen sind, durch die Außerbetriebsetzung der Neuhausener Anlage nicht gestört. Vor diesen Haupttrennschaltern liegt als Blitz- und Überspannungsschutz, wirksam also nicht nur wenn sie geschlossen, sondern auch wenn sie geöffnet sind, der ebenfalls durch Trennmesser abschaltbare Grobschutz bestehend aus je einer Hörnerfunkstrecke *H.F.* und einem Wasserwiderstande *W.W.* in jeder Phase, die in Stern geschaltet und gemeinsam geerdet sind.

Unmittelbar hinter den Haupttrennschaltern folgen die Drosselspulen *D.Sp.*, um den Überspannungen durch atmosphärische Entladungen oder Betriebsvorgänge im Leitungsnetze den Weg zu den Apparaten und Transformatoren zu versperren, und sie durch den Grobschutz abzuleiten. Es teilen sich dann die beiden äußeren Phasen in je zwei parallele Stromzweige, von denen je einer ohne Apparate ist, während in den beiden anderen je zwei Stromtransformatoren *Str.Trf.* in Reihe liegen, die zur Speisung von je zwei hintereinander geschalteten KW-Stundenzählern *Z.* für ungleichbelastete

Phasen und eines registrierenden Leistungszeigers *Reg.L.Z.* dienen. Diese Reihenschaltung von zwei Zählern hat den Vorteil, daß der eine der beiden Zähler gegenüber dem anderen eine Prüfung auf richtiges Arbeiten gestattet, und beim Schadhafwerden des einen dennoch durch den zweiten die verbrauchte Energie einwandfrei fortlaufend angezeigt werden kann. In der Regel wird bei solchen Anlagen wie die Neuhausener Station, die den Strom nicht selbst erzeugen, sondern von einem fremden Unternehmen beziehen, der eine Zähler vom Stromlieferanten, der andere vom Stromempfänger installiert, und kontrolliert, um jedes auf fehlerhaftes Anzeigen der Zähler zurückzuführende Mißverständnis auszuschalten. Der Stromverbrauchs-

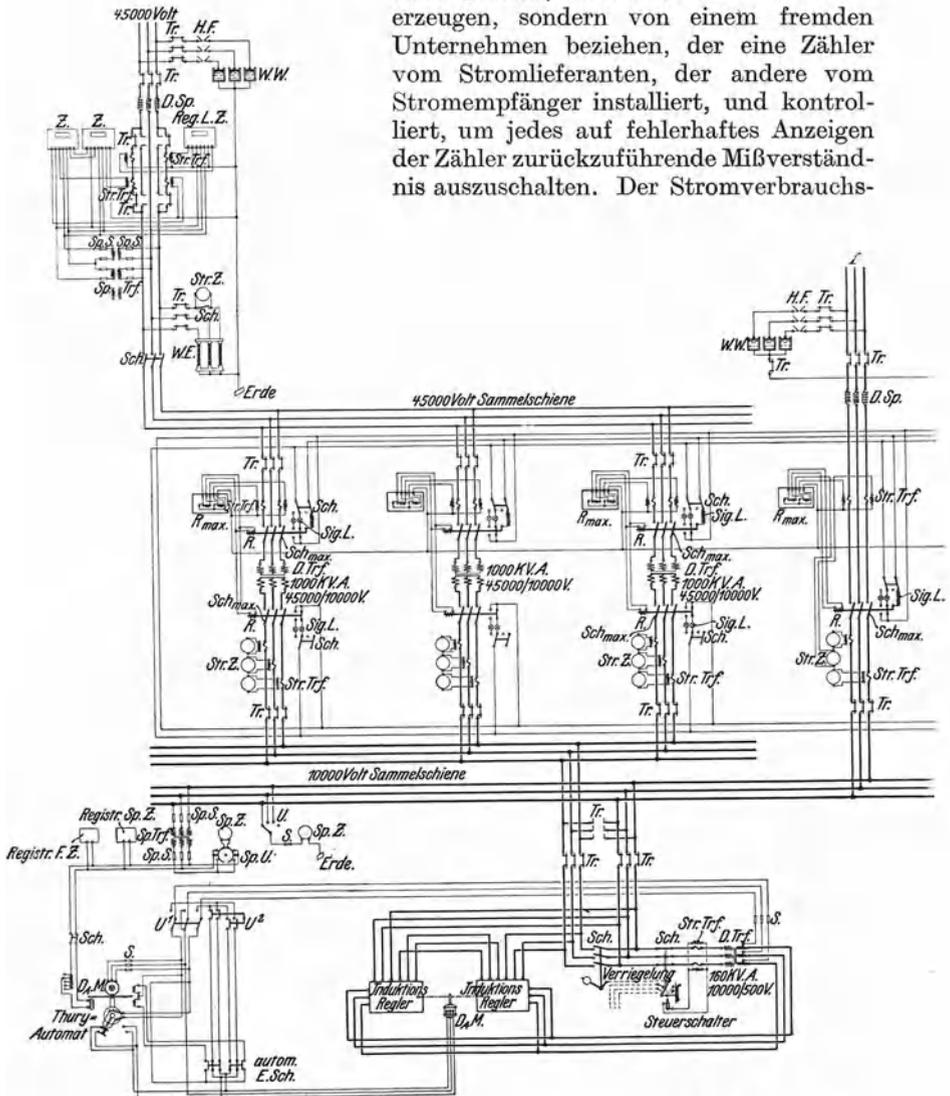
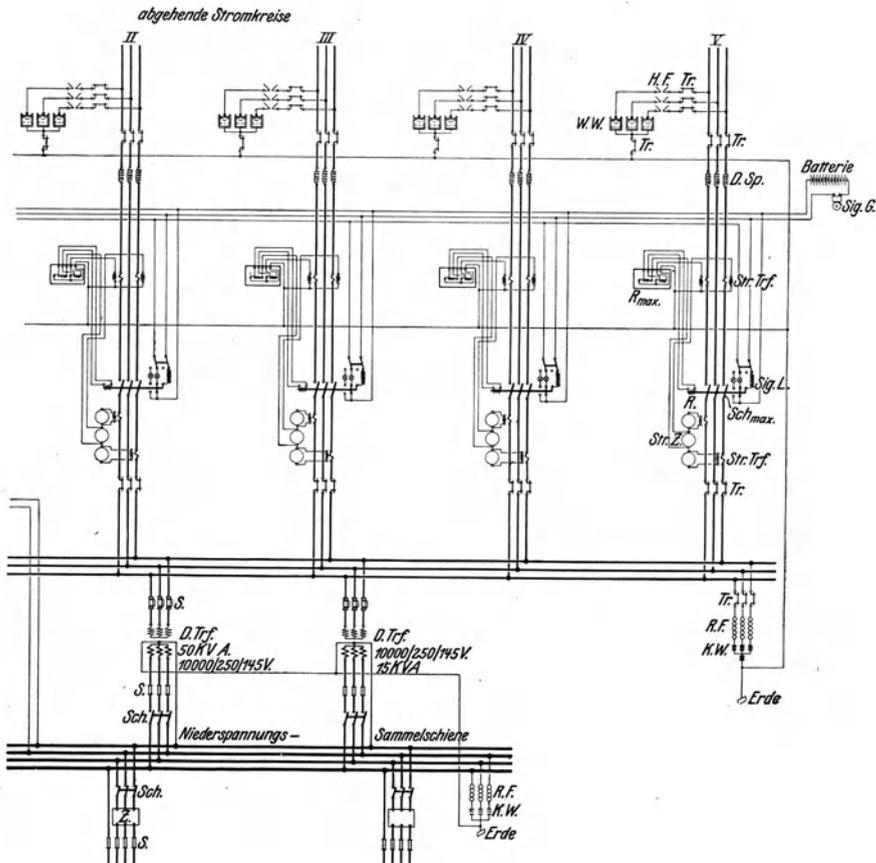


Fig. 250. Schaltungsschema der Transformatorenstation Neuhausen.

berechnung wird dann das arithmetische Mittel aus beiden Zählerablesungen zugrunde gelegt. Zur Speisung der Spannungsspulen der Zähler sind selbstverständlich Spannungstransformatoren *Sp.Trf.* (zwei Stück in V-Schaltung) vorhanden, die primär und sekundär durch kleine Sicherungen *Sp.S.* geschützt sind. Ein solcher kleiner Meßtransformator steht ferner noch in Reserve.

Treten Störungen an diesen Meßinstrumenten oder ihren Transformatoren ein, so können sie ohne Beeinflussung des ganzen Betriebes einfach durch das Schließen der Trennmesser in den parallelen Zweigen kurzgeschlossen und dann durch Öffnen der zugehörigen Abschalter ausgeschaltet werden.

Vor dem Haupt-Öausschalter ist ferner noch ein Überspannungs-Feinschutz an die Leitung angeschlossen, der aus einem ebenfalls durch Trennschalter abtrennbaren Wasserstrahler der *W.E.* besteht.



Der Stromzeiger *Str.Z.* dieses Apparates dient zur Prüfung der Höhe des dauernd nach Erde fließenden Stromes.

Damit nun bei Betriebsstörungen innerhalb der Schaltanlage oder eines Transformators nicht jedesmal die ganze Station selbsttätig ausgeschaltet, und weil ferner jeder Transformatorstromkreis selbst primär und sekundär durch automatische Schalter geschützt wird, ist hier der Haupt-Ölschalter *Sch.* nicht mit Relais versehen worden. Diese Anordnung ist dann statthaft, wenn die Sammelschienen und die Zuführungsleitungen bis zu dem Transformatorschalter für jede Phase in besonderer Zelle liegen, oder in einem solchen Abstand sicher verlegt sind, daß Kurzschlüsse nicht eintreten können.

Die ankommende Leitung führt dann nach den 45 000 Volt Hochspannungs-Sammelschienen; von diesen zweigen die einzelnen Transformatorstromkreise ab.

Jeder Transformatorstromkreis besitzt auf der Oberspannungsseite Trennschalter *Tr.*, Stromtransformatoren *Str.Trf.* für die Zeitrelais *R.* des Ölschalters und einen selbsttätig wirkenden dreipoligen Ölschalter *Sch._{max}* mit Signallampen *Sig.L.* Letztere zeigen dem Bedienungspersonale an, ob der Schalter offen oder geschlossen bzw. durch irgendein Vorkommnis automatisch ausgeschaltet ist. Diese Lampen erhalten ihren Strom von den 250 Volt-Sammelschienen, die für den Eigenbedarf der Station vorhanden sind.

Die Transformatoren *D.Trf.* sind solche für Drehstrom, besitzen Ölisolierung, und haben Wasserkühlung erhalten. Es sind gegenwärtig zwei Stück vorhanden mit je einer Leistung von 1000 KVA bei einem Übersetzungsverhältnisse von 25 000 auf 10 000 Volt. Platz für einen dritten gleichgroßen Transformator ist vorgesehen. Durch Übergang von der Dreieck- auf die Sternschaltung der Primärwicklung können sie von 25 000 auf 45 000 Volt umgeschaltet werden.

Auch auf der Sekundärseite dieser Transformatoren sind automatische Ölschalter *Sch._{max}* mit Zeitrelais *R.* vorhanden, und zwar sind diese Relais mit denjenigen der Schalter auf der Oberspannungsseite so elektrisch miteinander gekuppelt, daß die selbsttätige Ausschaltung des Transformators stets primär und sekundär gleichzeitig erfolgt. Auch die 10 000 Volt-Schalter besitzen Signallampen *Sig.L.*

Im 10 000 Volt-Stromkreise der einzelnen Transformatoren sind noch Stromzeiger mit Stromtransformatoren eingebaut.

Bevor nun der auf 10 000 Volt transformierte Strom den einzelnen abgehenden Leitungen zugeführt wird, passiert derselbe eine Spannungs-Regelungsvorrichtung, und zwar weil infolge der großen Ausdehnung des Überlandnetzes der Beznau-Löntschi-Werke zuzeiten beträchtliche Spannungsschwankungen auftreten, die sich namentlich im Lichtbetriebe unangenehm bemerkbar machen. Um nun von diesen Einflüssen vollständig unabhängig zu sein, wurde die Spannungs-Regulierung eingerichtet, die schon beim ersten Ausbau, der nur 2000 KVA umfaßt, für die volle Leistung von 3000 KVA und

einen Regelbereich von $\pm 5\%$ bemessen worden ist. Da die Regler für alle Transformatoren dienen, so müssen die letzteren auf Sammelschienen arbeiten.

Unter den im Kapitel 45 behandelten Spannungsreglern für Wechsel- und Drehstrom ist der Induktionsregler als der günstigste bezeichnet worden, und deshalb hat die Maschinenfabrik Oerlikon auch für die Neuhausener Station Induktionsregler zur Anwendung gebracht. Ein solcher Apparat gestattet, wie schon auf S. 276 angegeben, eine kontinuierliche und feine Regelung bzw. eine gute Konstanthaltung der Spannung. Zur Beseitigung des Einflusses eines solchen Apparates auf die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung des Netzes wurden, wie auch bereits auf S. 273 erwähnt, zwei Induktionsregler aufgestellt, und so geschaltet, daß in jeder Stellung die Resultante der von den beiden Reglern erzeugten Spannungsvektoren in die gleiche Richtung (in die Richtung des Spannungsvektors des Netzes) fällt. Infolgedessen addiert sich in allen Stellungen der beiden Regler die Zusatzspannung arithmetisch zur Netzspannung.

Die Ständerwicklungen der beiden Induktionsregler sind unmittelbar für 10 000 Volt gewickelt und in Hintereinanderschaltung miteinander verbunden. Die Läufer werden mit Niederspannungsstrom gespeist, der mit einer Spannung von 500 Volt einem besonderen Transformator *D.Trf.* entnommen wird. Beide Läufer sind mechanisch miteinander gekuppelt. Zum Antriebe dient ein kleiner Drehstrom-Asynchronmotor mit Kurzschlußanker unter Zwischenschaltung von Schnecke und Schneckenrad. Aus dem Schaltungsschema Fig. 250 und aus der Fig. 261 ist das Gesagte ersichtlich.

Dieser Hilfsmotor *D_AM.* erhält seinen Strom von dem besonderen Transformator für die Läufer der Induktionsregler, der für diesen Zweck noch mit einer Anzapfung bei 220 Volt versehen ist; der Motor kann sowohl von Hand, als auch automatisch mittels eines Thury-Regulators gesteuert werden. Ein dreipoliger Umschalter *U.* vermittelt den Übergang vom Hand- zum automatischen Betriebe und umgekehrt. Die Handregelung erfolgt durch einen Druckknopfschalter, während der Thury-Regler die Umschaltung der Drehrichtung des Hilfsmotors und damit die Stellung der Läufer des Induktionsreglers selbsttätig besorgt.

Nach dem Schaltungsschema können die Ständerwicklungen beider Regler mit Hilfe eines Ölschalters *Sch.* kurzgeschlossen, und damit also die ganze Anlage abgeschaltet werden. Dieser Ölschalter ist mit einem zweiten solchen Schalter im Transformatorstromkreise derartig zwangsläufig verbunden, daß beim Kurzschluß der Ständerwicklungen auch der Transformator abgeschaltet wird, und damit die Läufer spannungslos werden. Beide Ölschalter sind als Automaten ausgebildet, und sobald der Transformatorschalter auslöst, werden sofort auch die Ständerwicklungen der Regler kurzgeschlossen. Schließlich sei noch erwähnt, daß die Regleranlage mit Hilfe von Trennschaltern *Tr.* von den 10 000 Volt Sammelschienen abtrennbar ist; dann müssen aber die Verbin-

dungs-Trennschalter *Tr.* geschlossen werden, da anderenfalls der Stromkreis für die abgehenden Linien unterbrochen wird.

Die 10 000 Volt-Sammelschienen für die Energieverteilung sind mit einem Überspannungsschutze (Walzenblitzschutzapparat *R.F.* in Verbindung mit Kohlenwiderständen *K.W.*) versehen. Unter Zwischenschaltung eines wiederum doppelseitig gesicherten Drehstrom-Spannungstransformators sind ferner angeschlossen: ein auf die drei Phasen umschaltbarer General-Spannungszeiger *Sp.Z.*, ein Frequenzmesser mit Registriereinrichtung (*Registr.F.Z.*) und ein registrierender Spannungszeiger (*Registr.Sp.Z.*). Diese Instrumente gestatten der Betriebsleitung eine jederzeitige, einwandfreie Überwachung der gelieferten Energie nach Spannungshöhe und Frequenz, und sichern sie gegen unberechtigte Ansprüche oder Beanstandungen von seiten der Konsumenten, bzw. bieten ihr andererseits einen Rückhalt gegen Einwendungen des stromliefernden Werkes. Besonders Frequenzschwankungen können oftmals unliebsame Betriebsstörungen in angeschlossenen Werkstätten (z. B. Papierfabriken, Druckereien, Spinnereien, deren Maschinen stets mit konstanter Drehzahl arbeiten müssen) hervorrufen, weil die Umlaufzahl der Drehstrom-Asynchronmotoren von der Frequenz abhängig ist. Zur Prüfung der Isolation dient schließlich ein gesicherter statischer Spannungszeiger mit einem dreipoligen Hochspannungs-Umschalter *Ü*.

Zurzeit sind fünf abgehende Linien für Mittelspannung (10 000 Volt) vorhanden, die jede mit einem automatischen Ölschalter *Sch._{max}* mit Maximal-Zeitrelais *R.*, drei Stromzeigern *Str.Z.* mit Stromtransformatoren *Str.Trf.* — davon einer mit Maximumzeiger —, Drosselspulen *D.Sp.* und Hörnerfunkenstrecken *H.F.* mit Wasserwiderständen *W.W.* ausgerüstet ist. Von den Stromzeigern liegen zwei vor und der dritte hinter dem Ölschalter. Mittels Trennschaltern *Tr.* kann jede Linie von beiden Seiten, d. h. sowohl von den Sammelschienen als auch hinter den Drosselspulen spannungsfrei gemacht werden. Es sei hierbei auf das auf S. 281 Gesagte und in der Fig. 227 besonders zur Darstellung gebrachte Rückwärtstransformieren nochmals aufmerksam gemacht.

Jeder Überspannungsschutz ist sowohl von den Leitungen, als auch in der Erdleitung durch Trennmesser abschaltbar.

Schließlich sind noch zwei kleine Drehstromtransformatoren — ein Stück für 50 KVA und ein Stück für 15 KVA — mit einem Übersetzungsverhältnis von 10 000 auf 250 Volt in Sternschaltung sekundär mit Nullpunktsanschluß vorhanden, so daß neben 250 Volt auch eine Spannung von 145 Volt zwischen Phase und Nulleiter zur Verfügung steht¹⁾. Der 15 KVA-Transformator dient lediglich zur Speisung der Stationsbeleuchtung und der eigenen Betriebsanlagen. Diese Transformatorenstromkreise haben hochspannungsseitig abschaltbare Schmelzsicherungen *S.*, und ihre Niederspannungs-Sammelschienen eine Walzen-

¹⁾ Im Schaltungsschema Fig. 250 ist irrtümlich der Phasen- und Nullpunktsanschluß der Transformatoren an die Sammelschienen vertauscht gezeichnet worden, was dem Leser wohl sofort aufgefallen sein wird.

blitzschutzvorrichtung erhalten. Der größeren Betriebssicherheit wegen sind die Nullpunkte der sekundären Transformatorwicklungen geerdet.

Die abgehenden Niederspannungsstromkreise enthalten einfache Momentehebelschalter *Sch.*, Schmelzsicherungen *S.* und Zähler *Z.*

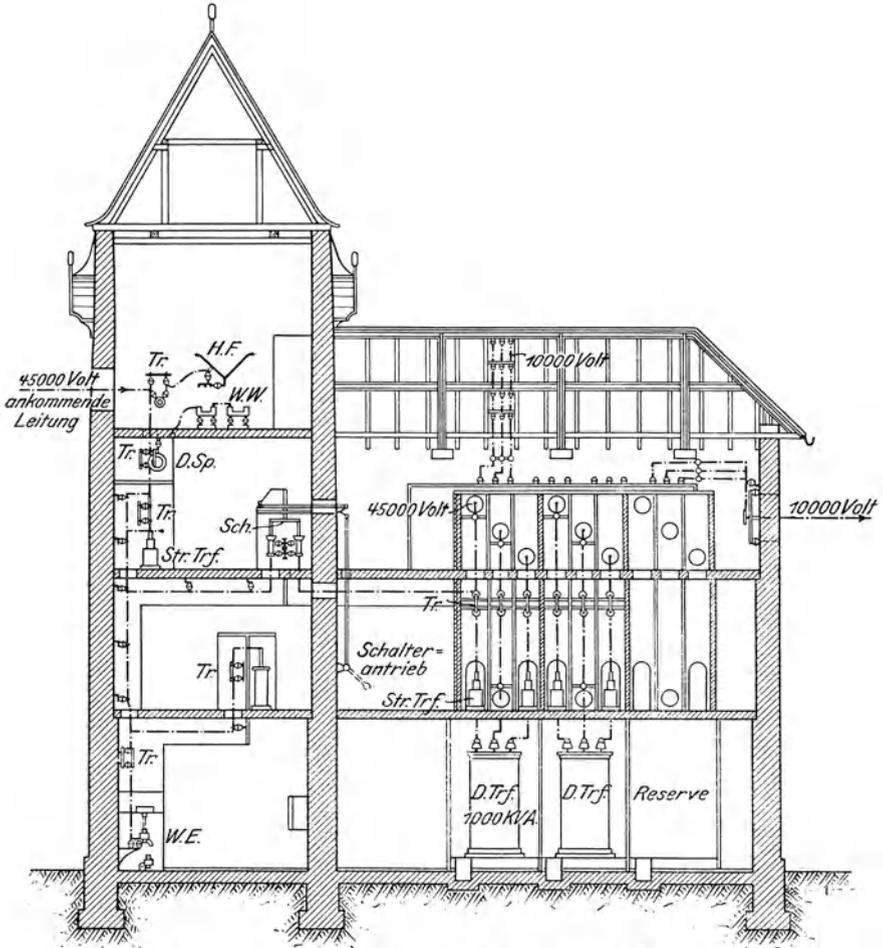


Fig. 251. Längsschnitt durch den Turm und das Hauptgebäude.

Besonders ist noch auf die Schaltung der Signallampen für die automatischen Ölschalter aufmerksam zu machen. Die Lampen leuchten nicht dauernd, sondern nur wenn sie mit Hilfe des kleinen Umschalters *U.* eingeschaltet werden, und zwar kann man durch das Aufleuchten der roten oder grünen Lampe prüfen, in welcher Stellung sich der Ölschalter befindet. Durch die Wahl dieser Form ist unnötiger Energieverbrauch und Lampenersatz vermieden. Der Strom für die

Signallampen wird den 250 Volt-Drehstrom-Sammelschienen entnommen. Für den Fall, daß diejenige Lampe, die den eingeschalteten Zustand des Ölschalters anzeigt, defekt sein sollte, ist noch eine besondere Kontrolleinrichtung bestehend aus einem Lätswerke und einer kleinen

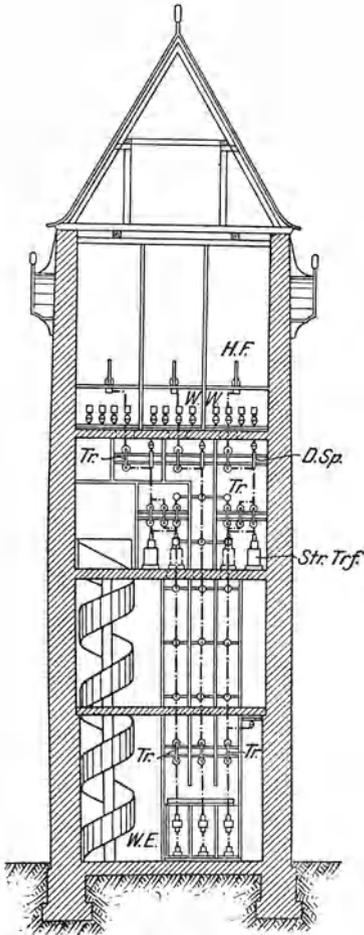


Fig. 252. Schnitt durch den Einführungsturm.

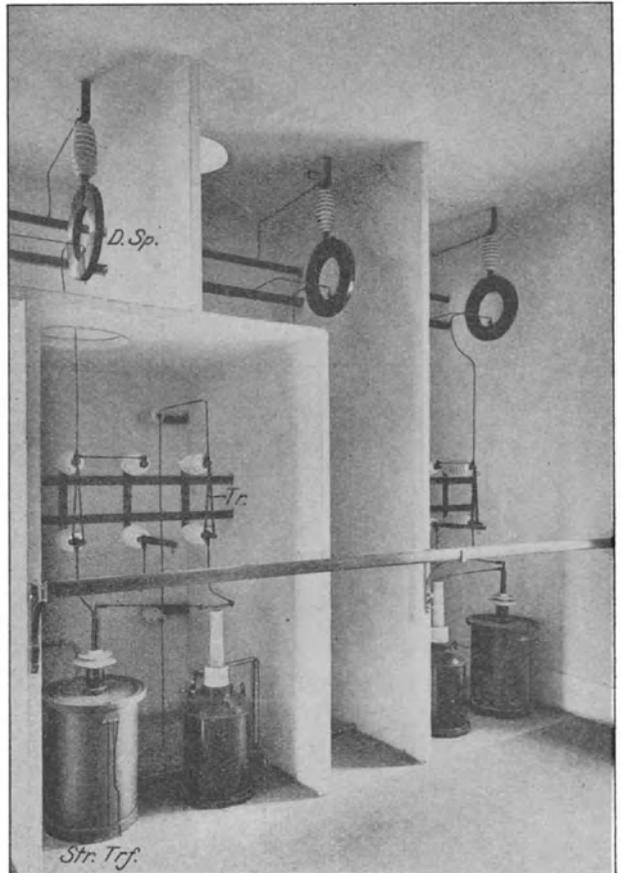


Fig. 253. Drosselspulen und Stromtransformatoren mit Trennschaltern im II. Stockwerke des Turmes.

Batterie installiert worden, so daß also auch nach dieser Richtung alle Bedingungen für eine sichere Betriebsführung erfüllt sind.

Es soll nunmehr der Einbau der Apparate bzw. die gesamte Inneneinrichtung der Station erläutert werden. Des besseren Verständnisses und einer leichteren Vorstellung wegen sind im nachfolgenden neben den Schnittzeichnungen auch noch photographische Aufnahmen der einzelnen besonders interessanten Teile der Anlage wiedergegeben.

Wie bereits auf S. 326 gesagt, besteht das Gebäude aus dem Einführungsturm, in welchem alle für die ankommende Leitung vorhandenen Apparate untergebracht sind, und aus dem Hauptgebäude zur Aufnahme der Transformatoren, der Schaltapparate sowohl für diese, als auch für die abgehenden 10 000 Volt-Stromkreise, der Induk-

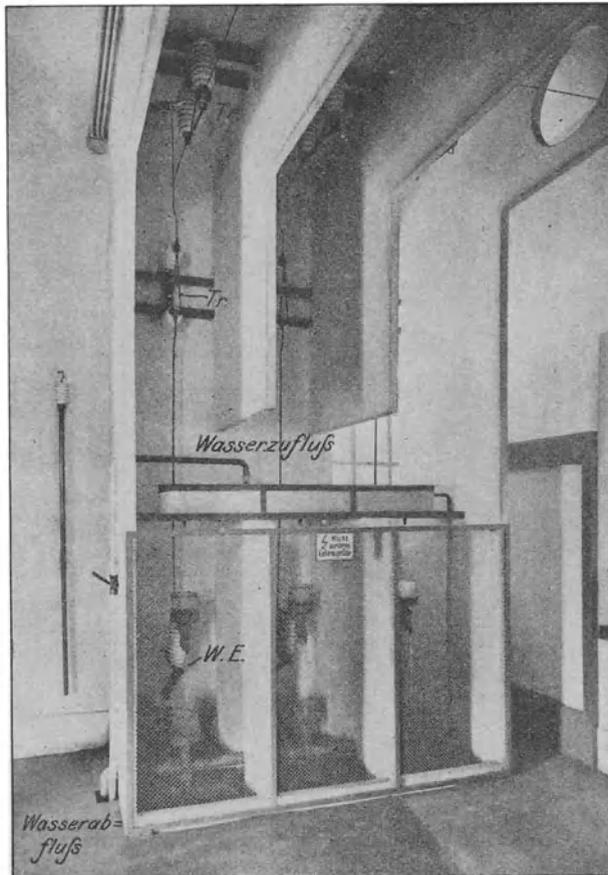


Fig. 254. Wasserstrahlerder mit Trennschaltern im Erdgeschoß des Turmes.

tionsregleranlage und einer Reparaturwerkstätte. Daran schließt sich dann das Wohnhaus.

Die Fig. 252 zeigt nun zunächst einen Längsschnitt durch den Turm und das Hauptgebäude. Durch große, freie Mauerausschnitte, vor denen an der äußeren Wand Isolatoren auf eisernen Traversen zum Abspannen der Leitungen befestigt sind, treten die 45000 Volt Hochspannungsleitungen in den Turm ein. Im obersten Stockwerke ist der Grobschutz untergebracht; die Leitungsführung zu den Hörner-

funkenstrecken ist fast gradlinig mit der ankommenden Linie, eine Bedienung, auf die schon auf S. 316 hingewiesen worden ist. Die Wasserwiderstände sind zum Schutze gegen das Einfrieren mit einer Mischung von Wasser und Alkohol gefüllt. Die Trennschalter haben Gestängeantriebe erhalten, um sie noch vor dem Betreten des Raumes von dem darunterliegenden Stockwerke ausschalten zu können.

Vom III. Turmgeschoß führt die Leitung über die im II. Stockwerke eingebauten Haupttrennschalter, die Drosselspulen und die Stromtransformatoren bis zur Decke des I. Stockwerkes herab, dann wieder nach dem II. Geschoß bis zu dem 45 000 Volt-Ölschalter, und

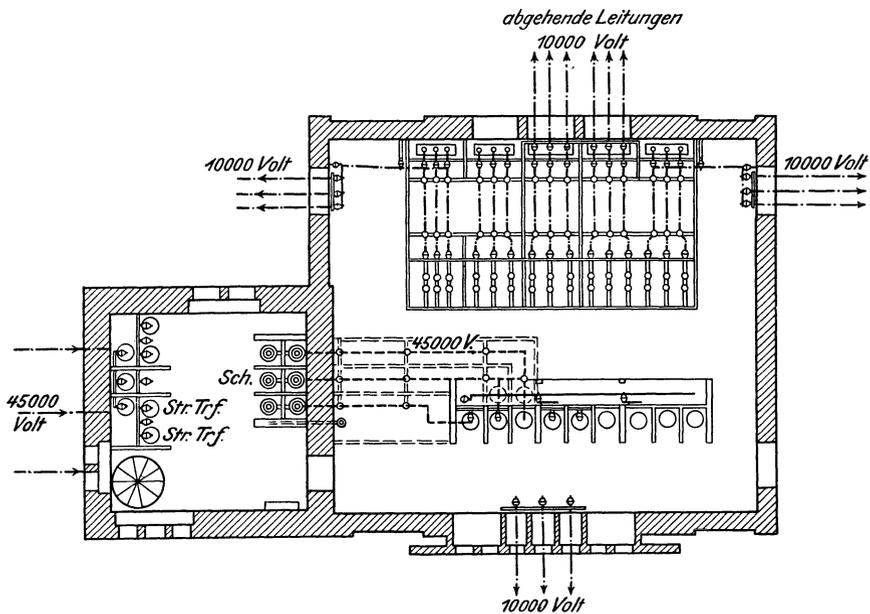


Fig. 255. Grundriß des II. Stockwerkes von Turm und Hauptgebäude.

von dort zu den Hochspannungssammelschienen nach dem Hauptgebäude. Wie aus Fig. 252 (Schnitt durch den Einführungsturm) und Fig. 253 ersichtlich, liegt jede Phase in einer besonderen Zelle; es ist also die vollständige Phasentrennung gewählt worden. Deckendurchführungen aus Porzellan sind nicht verwendet, sondern nur Löcher mit großem Durchmesser für diesen Zweck angelegt. Die Befestigung der Drosselspulen, der Abschalter, und die Aufstellung der Meßtransformatoren ist aus Fig. 253 weiter erkenntlich. Ein Abzweig der Leitung geht nun gradlinig nach unten durch das I. Stockwerk, in welchem die Spannungstransformatoren stehen, herab zum Erdgeschoß, wo der Wasserstrahler der Aufstellung gefunden hat (Fig. 254). Ein engmaschiges Drahtgitter schützt das Bedienungspersonal vor zufälliger Berührung des Apparates bzw. der Wasserstrahlen. Die Wasserbeschaffung wird bei den Transformatoren erwähnt werden.

Aus dem Grundrisse des II. Stockwerkes (Fig. 255) ist der Verlauf der 45000 Volt-Leitung und die Hochspannungssammelschienen zu ersehen. Die Abzweigleitungen zu den einzelnen Transformatoren führen nun nach dem I. Geschoß des Hauptgebäudes (Fig. 256), wo sie zunächst die Stromtransformatoren und die automatischen Überspan-

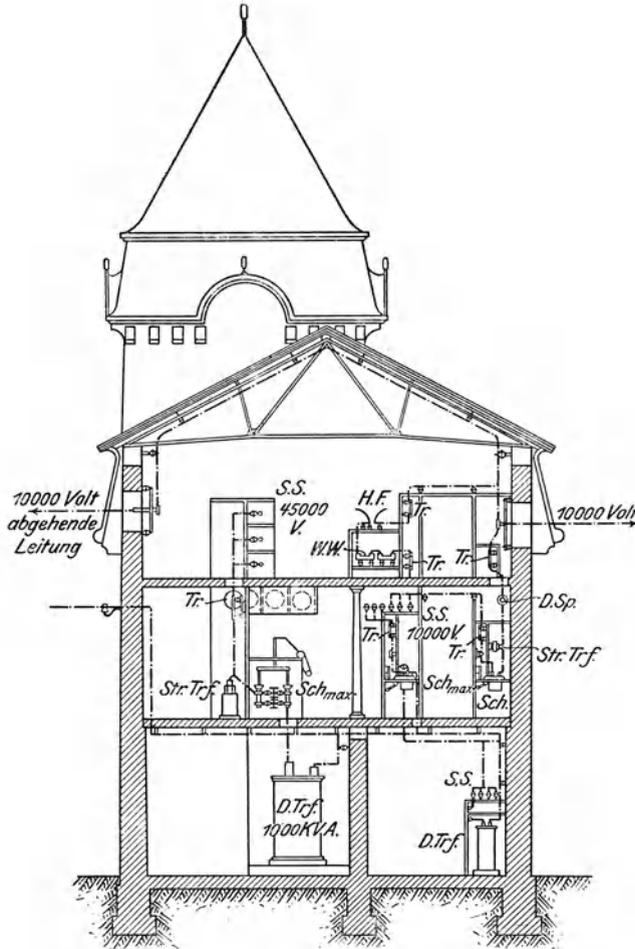


Fig. 256. Querschnitt durch das Hauptgebäude.

nungs-Ölschalter passieren. Hier liegt auch der Antriebshebel für den Hauptölschalter der ankommenden Linie (Fig. 251). Von dort aus gelangen sie dann zu den im Erdgeschoße aufgestellten Transformatoren.

Es sind zurzeit zwei Drehstromtransformatoren von je 1000 KVA Leistung mit Ölisolierung und Wasserkühlung vorhanden. Die Primärwicklungen sind gegenwärtig in Dreieck geschaltet, so daß

das Übersetzungsverhältnis 25 000 : 10 000 Volt beträgt. Wie bereits früher erwähnt, können die Transformatoren durch den Übergang von Dreieck- auf Sternschaltung auf der Hochspannungsseite mit 45 000 Volt betrieben werden. Die Oberspannungsschalter in der Ausführung als Dreikesselschalter sind in vollständig gemauerten, belüfteten Zellen aus armiertem Beton untergebracht; die Antriebs- bzw. Auslösevorrichtung ist auf diesen Zellen montiert (Fig. 257). Den Einbau der Unterspannungsschalter zeigt zusammen mit der Sammelschienanordnung die Fig. 258. Es sind hier Eisengestelle und die freie Anordnung, also ohne Zellen, gewählt worden.

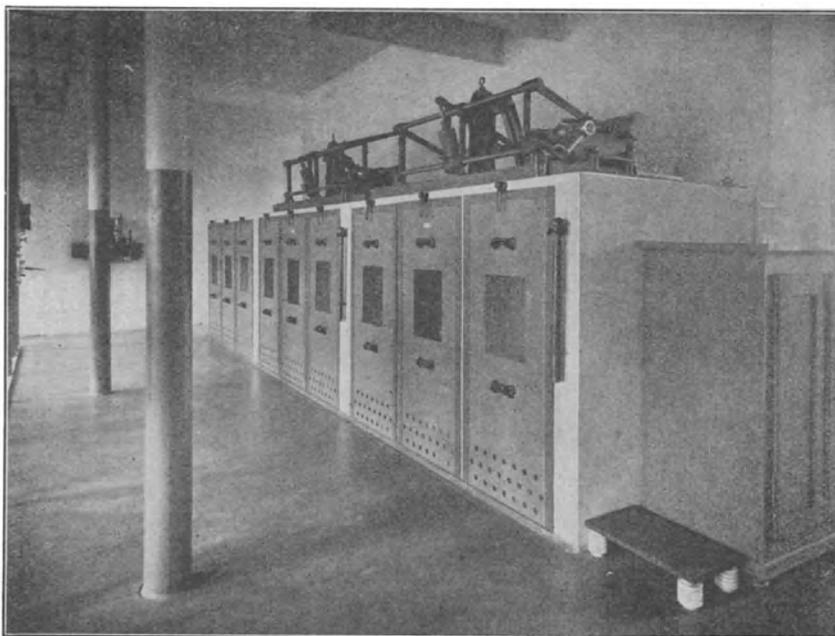


Fig. 257. Transformatorölschalter für 45 000 Volt mit Schaltvorrichtungen.

Das Wasser für die Kühlung der Transformatoren und für den Wasserstrahler der wird von der Wasserleitung Neuhausen geliefert. Das Reservoir dieser Wasserversorgung ist nur um ein wenig höher gelegen als die Transformatorstation, und es treten infolgedessen in der Zuleitung häufig Druckschwankungen auf. Da außerdem die Betriebsausgaben bei einem ununterbrochenen Verbräuche stets neuen Wassers erheblich steigen, hat man sich entschlossen, eine Rückkühlanlage zu bauen. So wird das Wasser immer wieder verwendet, und die Neuhausener Wasserleitung dient nur zur Reserve und zur Deckung des durch Verdunstung usw. auftretenden Wasserverlustes. Das warme Wasser von den Transformatoren fließt nach einem Kühl-

turme, der in Fig. 249 im Vordergrund zu sehen ist, und rieselt in demselben über einen mit Schwarzdornzweigen ausgefüllten Lattenrost. Außerdem kann dem Kühlturme durch einen Schraubenventilator Frischluft zugeführt werden. Unterhalb des Kühlturmes, der naturgemäß nur geringe Abmessungen hat, befindet sich ein Kühlwasserreservoir, das mittels eines in die Zuleitung eingebauten Schwimmers je nach Bedarf von der Neuhausener Wasserleitung gefüllt wird. Eine Niederdruck-Zentrifugalpumpe, angetrieben durch einen 1 PS asynchronen Drehstrommotor, pumpt das gekühlte Wasser nach einem im

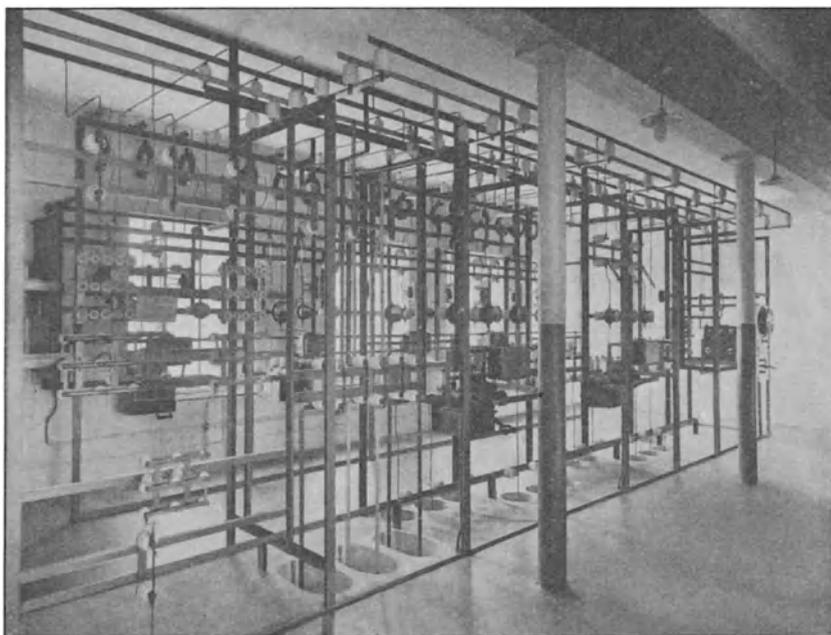


Fig. 258. Die 10 000-Volt-Schaltanlage der Transformatoren.

I. Stock des Transformatorhauses aufgestellten Behälter, von wo es wieder den Transformatoren und dem Wasserstrahlerder zufließt.

Die Transformatoren ausgerüstet mit Signalthermometer, Ölstandszeiger und Ölablaßhahn sind in offenen Zellen in einem durch eiserne Rolltüren von den übrigen Teilen der Anlage getrennten Raume aufgestellt (Fig. 259). Sie sind auf Rollen fahrbar, und können aus den Zellen auf einen auf Schienen laufenden Transportwagen gebracht werden. Im Anschlusse an den Transformatorenraum ist das Gebäude mit einer offenen überdachten Vorhalle versehen, in der sich eine im Boden eingelassene Ölgrube für das Entleeren der Transformator-kessel befindet. Hier ist ferner eine Laufkatze vorhanden, mit Hilfe derer ein Transformator zum Zwecke der Untersuchung oder

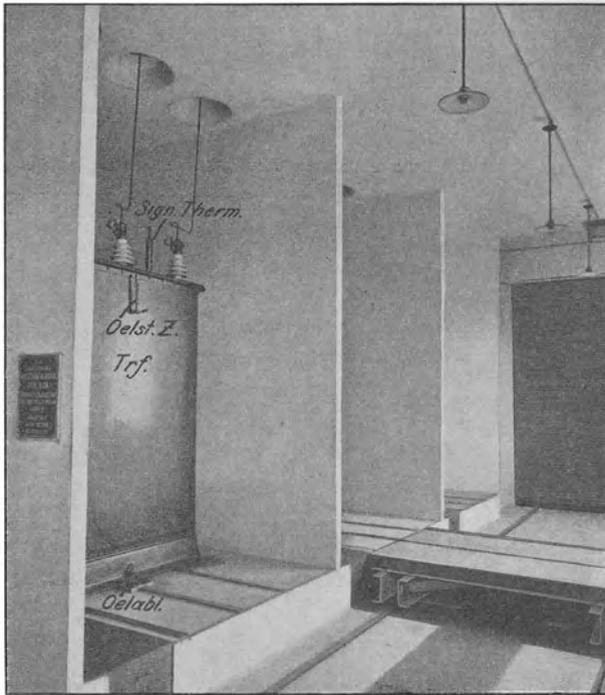


Fig. 259. Der Transformatorraum.

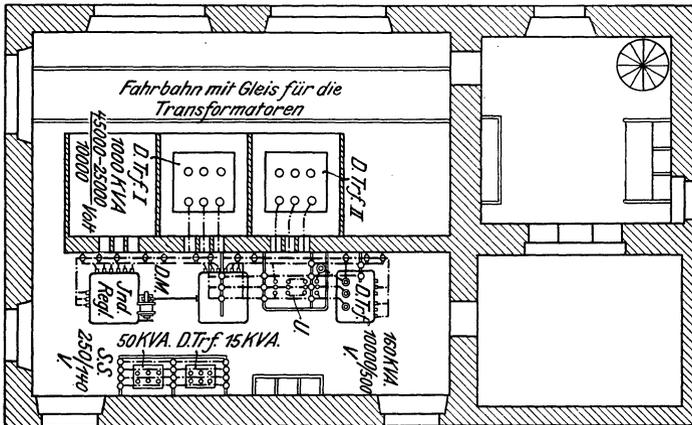


Fig. 260. Grundriß des Erdgeschosses im Hauptgebäude.

Instandsetzung leicht aus dem Ölkessel herausgehoben werden kann. Die Fig. 260 zeigt den Grundriß des Erdgeschosses mit Fahrbahn usw.

Entsprechend dem Schaltungsschema gelangt der auf 10 000 Volt transformierte Strom nun zunächst zu der Induktionsregler-Anlage, die mit dem zugehörigen Transformator, aber mit Ausnahme der Vorrichtungen für den Hand- bzw. automatischen Schalterantrieb, ebenfalls im Erdgeschosse Aufstellung gefunden hat. Die Fig. 261 gibt ein Bild von diesem Teile der Station, das ferner noch zeigt, wie die Leitungsanordnung und die Decken- bzw. Wanddurchführungen ausgeführt

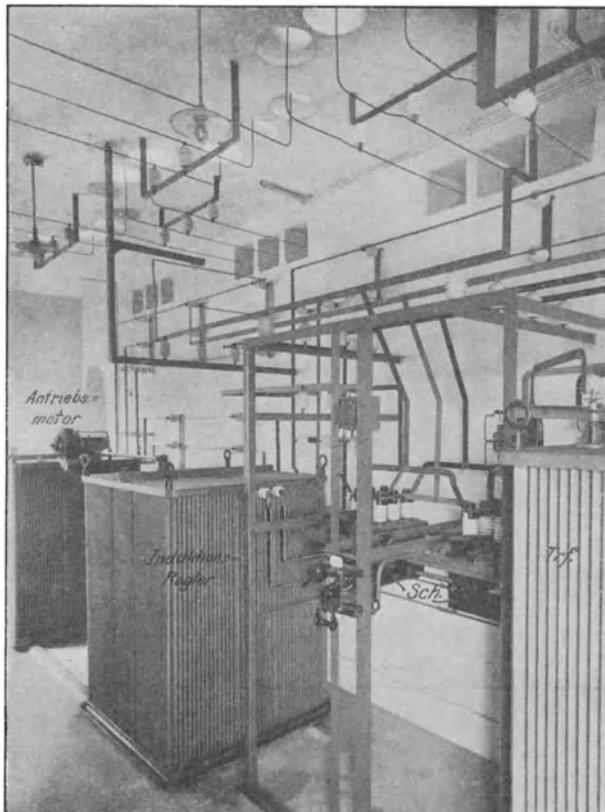


Fig. 261. Die Induktionsregleranlage.

sind, wobei auch für die 10 000 Volt-Leitungen Maueröffnungen statt Porzellandurchführungen gewählt wurden. Die Trennschalter für die Außerbetriebsetzung bzw. Umschaltung der ganzen Regleranlagen befinden sich dagegen im I. Stockwerke des Hauptgebäudes.

Nach Passieren der Regler führt die Leitung zu den 10 000 Volt-Sammelschienen für die abgehenden Verteilungsstromkreise. Die Sammelschienen sowohl wie auch die Schalt- und Meßapparate liegen ebenfalls im I. Stockwerke des Hauptgebäudes (Fig. 262). Es ist hier eine

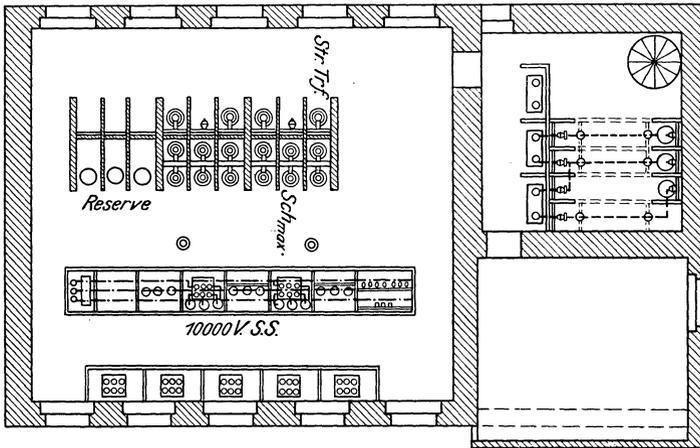


Fig. 262. Grundriß des I. Stockwerkes des Hauptgebäudes mit der 10 000-Volt-Verteilungsanlage.

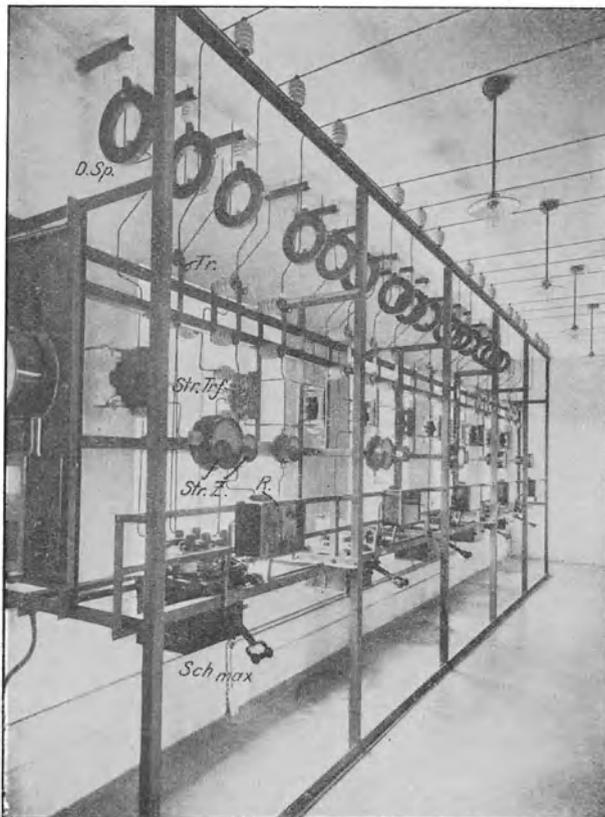


Fig. 263. 10 000-Volt-Schaltanlage für die abgehenden Verteilungsstromkreise.

in fünf Felder eingeteilte, aus Eisengerüsten ohne Marmorverkleidung hergestellte Schaltanlage errichtet worden, die in Fig. 263 abgebildet ist. Von der Trennung der Phasen bzw. der Stromkreise durch Zwischenwände ist Abstand genommen worden, weil genügend Platz für die notwendigen Entfernungen zwischen den einzelnen Leitungen vorhanden war. Diesem Schaltgerüste gegenüber befindet sich ein ähnliches für die Sekundärtransformatoren von 50 und 15 KVA, die selbst im Erdgeschoße neben den Induktionsreglern untergebracht sind (Fig. 256

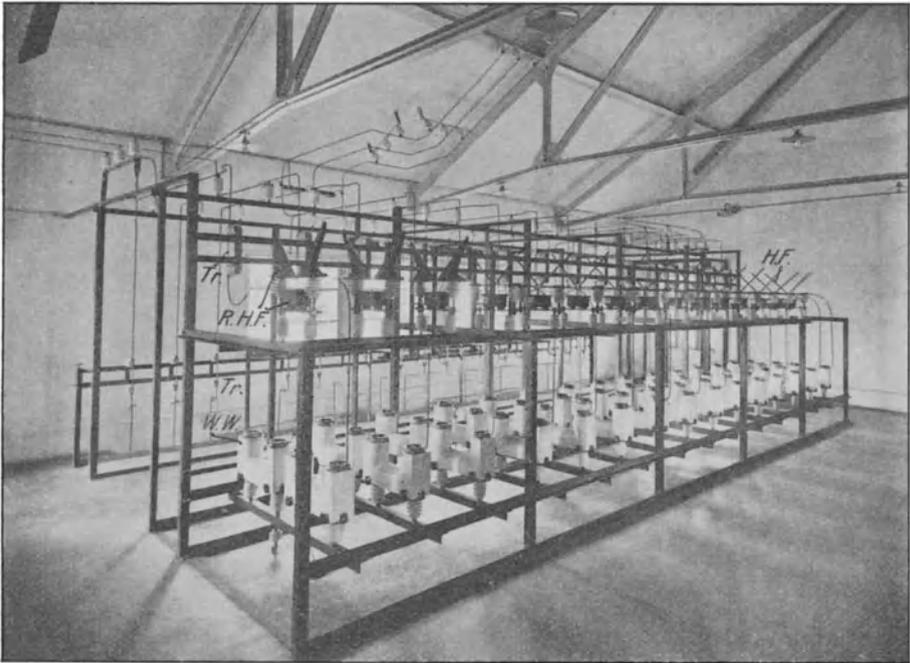


Fig. 264. Blitz- und Überspannungsschutzanlage für die 10 000 Volt abgehenden Stromkreise im II. Stockwerke des Hauptgebäudes.

und 260). Vom I. Geschoß ist demnach die ganze Anlage hoch- und niederspannungsseitig bedienbar.

Von den Blitz- und Überspannungsschutzapparaten für die 10 000 Volt abgehenden Linien sind die Drosselspulen in der Schaltanlage und die Hörnerfunkenstrecken mit den zugehörigen Wasserwiderständen und Trennschaltern im II. Stockwerke montiert, von wo aus auch der Austritt der Leitungen erfolgt (Fig. 256 und 264).

Auf reichlich bemessene Bedienungsgänge, leichte Zugänglichkeit zu allen Apparaten, gute Belüftung und Übersichtlichkeit ist in weitgehendstem Maße Rücksicht genommen worden. Desgleichen sorgen zahlreiche Glühlampen für eine richtige Beleuchtung aller Räume.

51. Masttransformatorstationen.

a) **Allgemeines über die Ausführung.** Handelt es sich um den Anschluß von kleineren Stromverbrauchsstellen z. B. kleiner Ortsgemeinden, landwirtschaftlicher Betriebe (Güter, Vorwerke) u. dgl. an das als Freileitung ausgeführte Hochspannungs-Verteilungsnetz einer Überlandzentrale, dann wird der Bau eines besonderen Häuschens aus Stein oder Eisen zur Aufstellung des Transformators und zur Unterbringung seiner Apparate im Vergleich zu dem Gewinne aus der Stromlieferung für das angeschlossene Objekt in der Regel zu kostspielig. Man benutzt in solchen Fällen vielmehr sog. Masttransformatoren, d. h. man verzichtet auf jede bauliche Umkleidung des Transformators, befestigt denselben vielmehr einfach an einem Maste der Fernleitung. Dadurch werden natürlich die Ausgaben für die Beschaffung einer solchen Transformatorstation außerordentlich gering, weil der Grunderwerb und alle teuren Einrichtungen, die bei einer Anlage mit gedeckten Räumen notwendig sind, in Fortfall kommen.

Die Masttransformatoren werden für Drehstrom bis zu einer Leistung von etwa 15 KVA und für Spannungen bis etwa 15 000 Volt¹⁾ gebaut. Darüber sind Gewicht und Abmessungen derselben zu groß, und zwingen dann dazu, schon besondere Eisen- oder Holzkonstruktionen an Stelle der einfachen und billigen Holzmasten zu verwenden, also zu Ausgaben, die die ganze Ausführung unter Umständen so verteuern, daß kein nennenswerter Vorteil mehr gegenüber einem einfachen Transformatorenhause besteht. Ferner sind die größeren Transformatoren umständlicher und schwieriger zu montieren und zu demontieren, also z. B. an den Tragekonstruktionen hochzuwinden und ähnliches mehr. Steigt die Leistung über 15 KVA — eine Zahl, die sich aus der Praxis heraus ergeben hat — so bringt man den Transformator besser in einem Raume der Baulichkeiten des Stromabnehmers unter (vgl. S. 300), wenn man mit Rücksicht auf die Kosten von einem eigenen Transformatorhause absehen muß, und Niederspannungs-Verteilungsleitungen zu anderen Interessenten nicht abgezweigt sind. Ist letzteres dagegen der Fall, dann muß man notgedrungen zur Errichtung einer festen Transformatorstation übergehen, um die Stromlieferung vollständig unabhängig von jedem der Interessenten zu machen (schikanöses Ausschrauben von Sicherungen oder sonstige Stromunterbrechung in der zum Nachbar führenden Niederspannungsleitung und ähnliches), und für das Aufsichtspersonal des Kraftwerkes jederzeit ungehindert Zutritt zu besitzen.

Als Transformatoren zur Befestigung an Masten dürfen naturgemäß nur die ölisolierten Typen Verwendung finden. Der Ölkessel ist vollständig luftdicht abschließend auszuführen²⁾, da der Transformator unmittelbar den Witterungseinflüssen

¹⁾ Die Firma Alioth hat indessen neuerdings auch Masttransformatoren für 30 000 Volt installiert.

²⁾ Die Siemens-Schuckert-Werke benützen auch für solche Transformatoren den auf S. 244 beschriebenen Ölkonservator (siehe Fig. 270).

(Kälte, Wärme, Regen, Staub, Schnee) ausgesetzt ist. Die Fig. 265 zeigt einen derartigen Masttransformator der A. E. G., auf den weiter unten noch zurückgekommen werden wird.

Besondere Sorgfalt ist auf die Wahl und Anbringung der für solche Masttransformatorstationen notwendigen Schalt- und Sicherheitsapparate zu verwenden, weil sie nicht nur ebenfalls im Freien mehr oder weniger unmittelbar zu installieren sind, sondern weil sie auch gegen zufällige Berührung geschützt und dennoch so ausgeführt und montiert sein müssen, daß sie schnell und bequem untersucht bzw. bedient und gegebenenfalls ausgewechselt werden können. Aus diesen Forderungen ergibt sich schon von selbst, daß die Zahl der Sicherheits- und Schaltapparate auf das betriebstechnisch geringst zulässige Maß beschränkt werden muß, um Betriebsstörungen durch Vorkommnisse an diesen Apparaten soviel wie möglich zu verhüten. Man wählt daher in der Mehrzahl der Fälle je nach der Lage des Masttransformators zur Hochspannungsleitung, von der er abzweigt wird, das folgende:

hochspannungsseitig: entweder gar keine Schalter, wenn der Transformator am Ende einer Abzweigung (Stichleitung) liegt, oder nur Trennmesser, wenn er unmittelbar von der Hochspannungsleitung abzweigt ist; Sicherungen (Streifensicherungen) sollen nur ganz ausnahmsweise eingebaut werden; Ölschalter, Meßinstrumente u. dgl. sind ganz zu vermeiden;

niederspannungsseitig: nur abschaltbare Streifen- oder Patronensicherungen, je nach Stromstärke und Höhe der Spannung; Meßinstrumente, Hebelschalter usw. sind ebenfalls unzweckmäßig.

Ferner soll ein besonderer Blitz- und Überspannungsschutz nicht angebracht werden, weil derselbe einer dauernden Wartung unterworfen werden muß, wenn er ordnungsmäßig arbeiten soll, und die billigen Anlagekosten für eine solche Station durch die höheren Ausgaben für Untersuchung, Reparatur usw. dieser Apparate ungünstig beeinflußt werden. Die Stromlieferungsgesellschaft läßt entweder die Transformatorwicklungen besser isolieren, oder beschafft vorteilhafter eine geringe Zahl von Reservetransformatoren, und wechselt im Bedarfsfalle einen defekten Transformator in kurzer Zeit aus, als im Gegensatz dazu ständiges Personal für Revisionen der Überspannungsschutzvorrichtungen in einer noch größeren Anzahl als für die Leitungsbeaufsichtigung an sich notwendig zu unterhalten. Aus dieser Maß-

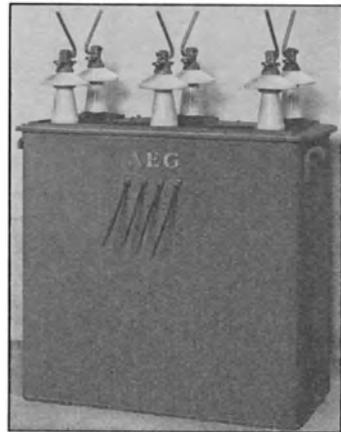


Fig. 265. Drehstrom-Masttransformator mit aufgebauten Sicherungen.

regel entspringt dann weiter die selbstverständliche Folgerung, z. B. in einem Überlandzentralennetze nur einheitlich durchgebildete und in den Leistungs- und Spannungsverhältnissen annähernd übereinstimmende Masttransformatoren zu verwenden, also die Leistungen auf ein oder zwei Werte zu beschränken, und die Schaltapparate und Sicherungen ebenfalls in nur wenigen, für alle Stationen gleichen Typen zu benutzen. So wird die Haltung des Reservelagers einfach, und Auswechselungen können schnell und ohne Fehler bewerkstelligt werden.

b) Die Schaltung der Masttransformatorstationen hat im allgemeinen nach folgenden Gesichtspunkten zu geschehen, die als Ergänzung zu den Ausführungen auf S. 288 anzusehen sind.

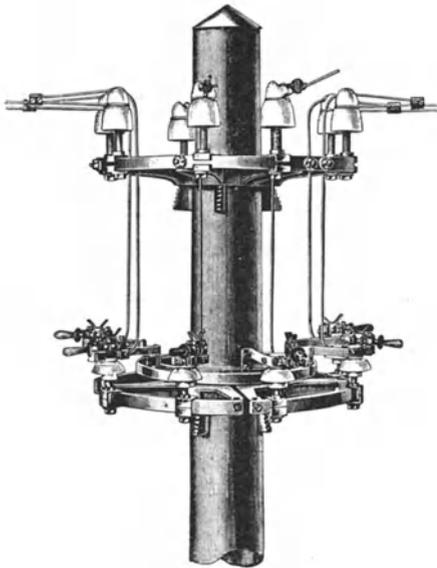


Fig. 266. Knotenpunktmast.

Führt zu dem Stromabnehmer von der Hochspannungsleitung eine Stichleitung, an deren Ende der Transformator aufgestellt werden soll, und ist diese Stichleitung am Anfange mit einem Trennschalter wie z. B. dem Mastschalter in Fig. 245 versehen, so daß sie spannungslos gemacht werden kann, dann gibt man dem Masttransformator nur abschaltbare Niederspannungssicherungen. Sollen auch auf der Hochspannungsseite Sicherungen vorgesehen werden, so sind dieselben nach früherem zweckmäßig nicht nach der Leistung des Transformators, sondern nach dessen Kurzschlußstromstärke, die ungefähr dem vierfachen Betrage der Normalstromstärke entspricht, zu bemessen, damit sie nur bei einem Fehler innerhalb des Transformators selbst ansprechen,

in allen anderen Fällen (Überlastungen, Kurzschluß im Niederspannungsnetze) dagegen stets die Niederspannungssicherungen durchgehen.

Ein zweiter Fall ist der, daß der Transformator unmittelbar von der Hauptstrecke der Hochspannungsleitung abzweigt wird. Hier ist es dann notwendig, noch besondere Trennschalter hochspannungsseitig einzubauen, um den Transformator unbeschadet des anderen Betriebes leicht spannungslos machen zu können. Die Trennschalter müssen bequem von unten bedienbar sein.

Schließlich sei nochmals besonders darauf hingewiesen, daß bei der Speisung eines Niederspannungsnetzes parallel von zwei Transformatoren bei der Auswechslung von Hochspannungssicherungen Vorsicht geboten und die Niederspannungsseite auch spannungslos zu

machen ist, wenn nach Fig. 227 eine Rückwärtstransformierung eintreten kann.

Im allgemeinen wird niederspannungsseitig nur ein Leitungsstrang zum Konsumenten führen. Sind indessen deren mehrere vorhanden, so empfiehlt es sich, die notwendigen Sicherungen entweder in handlicher Höhe in einem verschlossenen Kasten unterzubringen, oder den benachbarten Mast mit Leitungs-Verteilungsringen und aufgebauten Sicherungen zu versehen, um unbefugtes Abschalten einer Leitung zu verhindern. In Fig. 266 ist ein solcher Knotenpunktmast nach der Ausführung der Siemens-Schuckert-Werke abgebildet. Die Schmelzeinsätze der Sicherungen sind mit Holzgriffen versehen, und dienen gleichzeitig als Abschalter. Wenn auch Hochspannungssicherungen vorhanden sind, werden dieselben vorteilhaft mit den Niederspannungssicherungen konstruktiv derart verbunden, daß beim Öffnen der letzteren auch die ersteren geöffnet werden, damit auf diese Weise der Transformator stets vollständig spannungslos wird. Das ist besonders dann zwingende Notwendigkeit, wenn Rückwärtstransformierung befürchtet werden muß; Trennschalter sind in diesem Falle entbehrlich.

Es sollen nun an Hand ausgeführter Anlagen noch weitere Einzelheiten solcher Masttransformatorstationen behandelt werden, wobei selbstverständlich aus den mannigfaltigen Ausführungsformen nur einige besonders charakteristische herausgegriffen worden sind. Der projektierende Ingenieur wird hieraus aber wohl ebenfalls unschwer für bestimmte Verhältnisse neue Konstruktionen schaffen können.

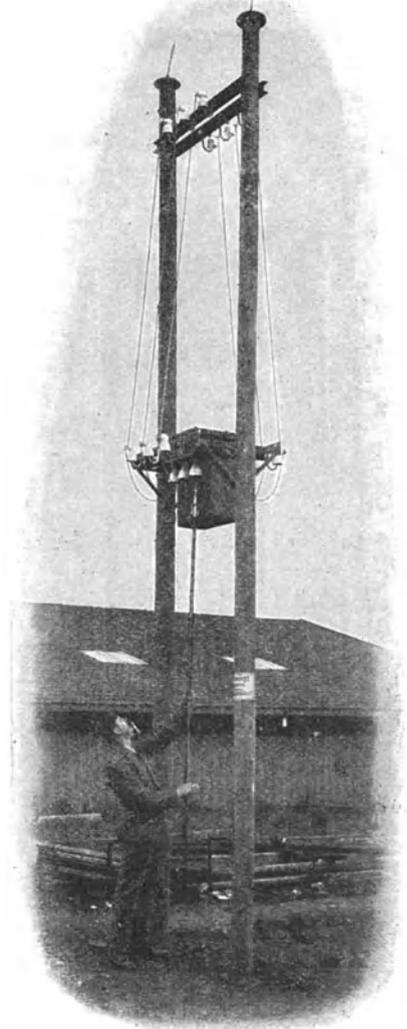


Fig. 267. Masttransformatorstation auf einem Fabrikhofe.

c) **Ausgeführte Stationen.** In Fig. 267 ist eine Ausführung der Maschinenfabrik Oerlikon abgebildet. Hier handelt es sich um eine ganz einfache Anlage. Der Transformator ist auf Eisentraversen, die mit allen sonst noch vorhandenen Eisenteilen zuverlässig zu erden sind, zwischen zwei Holzmasten aufgehängt. Die Hochspannungssicherungen sind vorn am Ölkessel des Transformators angebaut, und bilden gleichzeitig den Hochspannungsanschluß. Die Schmelzeinsätze können zwecks Erneuerung des Schmelzdrahtes, oder zum Abschalten des Transformators vom Erdboden mit Hilfe einer besonderen Zange,



Fig. 268. Masttransformatorstation auf dem Felde.

die auf einer Stange befestigt ist, herausgenommen werden. Niederspannungsseitig sind am Mast keine Sicherungen vorhanden. Dieselben befinden sich vielmehr an der Hauptverteilungstafel in einem der angeschlossenen Gebäude, was in diesem Falle zulässig ist, weil der Transformator unmittelbar auf dem Grundstücke des Stromabnehmers steht, und für letzteren nur allein bestimmt ist.

Die Fig. 268 zeigt eine andere Masttransformatorstation, wie sie besonders für landwirtschaftliche Betriebe häufiger zur Anwendung kommt. Hier steht der Transformator auf eisernen Traversen ebenfalls zwischen zwei Holzmasten. Über denselben sind Trennschalter

und Hörnerfunkenstrecken montiert. Letztere kommen besser nicht zur Anwendung, wie auf S. 345 bereits erwähnt. Wenn sie nicht ständig untersucht werden, dann können sie z. B. infolge Überbrückung des Hörnerabstandes durch Insekten usw. die Ursache eines dauernden Energieverlustes sein, weil ein Erdschluß hergestellt wird. Sie sind so natürlich für die Ableitung von Überspannungen unwirksam. Stellt man sie aber zu weit ein, um diesen Übelstand zu beseitigen, dann sind die Überspannungen namentlich bei geringeren Hochspannungen (5000, 10 000, 15 000 Volt) nicht imstande, den großen Luftzwischenraum zwischen den Hörnern zu überschlagen, und die Gefährdung des Trans-

formators bleibt bestehen. Auf der Niederspannungsseite sind in Fig. 268 in einem gußeisernen Kasten eingeschlossen Sicherungen vorhanden, und außerdem befindet sich unterhalb dieses Kastens noch eine Anschlußdose zur Befestigung eines auf einem Kabelwagen transportierten beweglichen Kabels, durch welches der Niederspannungsstrom z. B. dem Motor zum Creschen od. dgl. zugeführt wird.

Der in Fig. 265 dargestellte Transformator der A. E. G. ist mit aufgebauten Hochspannungssicherungen ausgeführt, die als Streifensicherungen ausgebildet sind. Um beim Durchschmelzen einer solchen Sicherung den entstehenden Lichtbogen schnell und sicher zu vernichten, ist jede derselben mit einer Hörner-

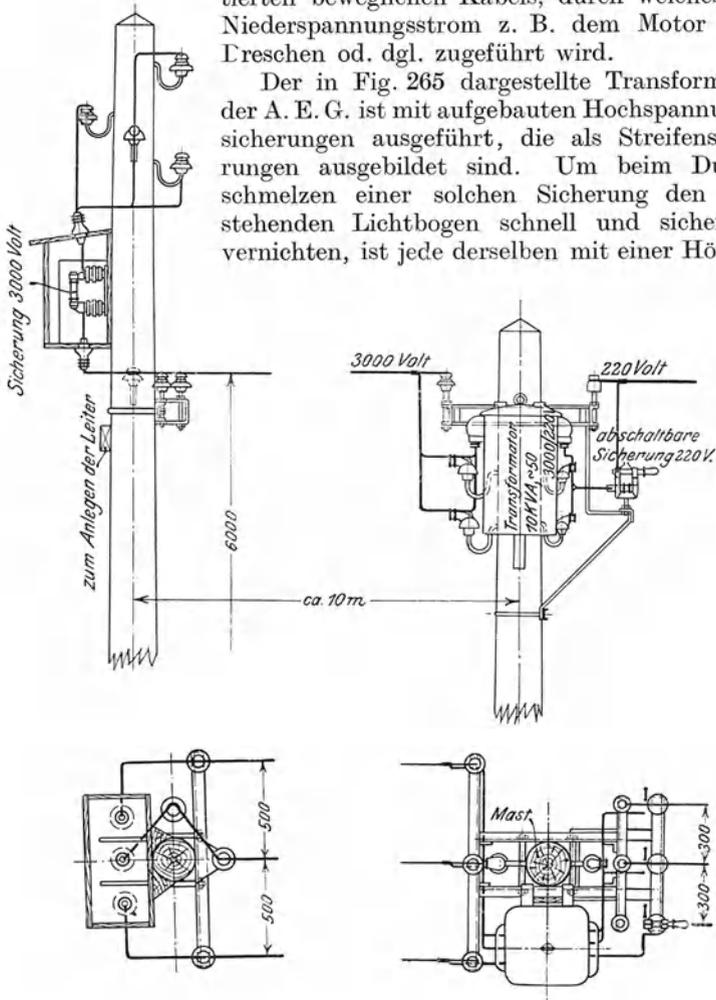


Fig. 269. Masttransformatorstation unmittelbar an der Hochspannungsleitung.

funkstrecke versehen. Dadurch wird ferner vermieden, daß der Lichtbogen zwischen den Kontakten stehen bleiben und dann durch Wind zur benachbarten Phase hinübergetrieben werden kann, wodurch ein völliger Kurzschluß zwischen diesen beiden Phasen hervorgerufen werden würde. Eine derartige Ausführung ist durch die Höhe der Spannung

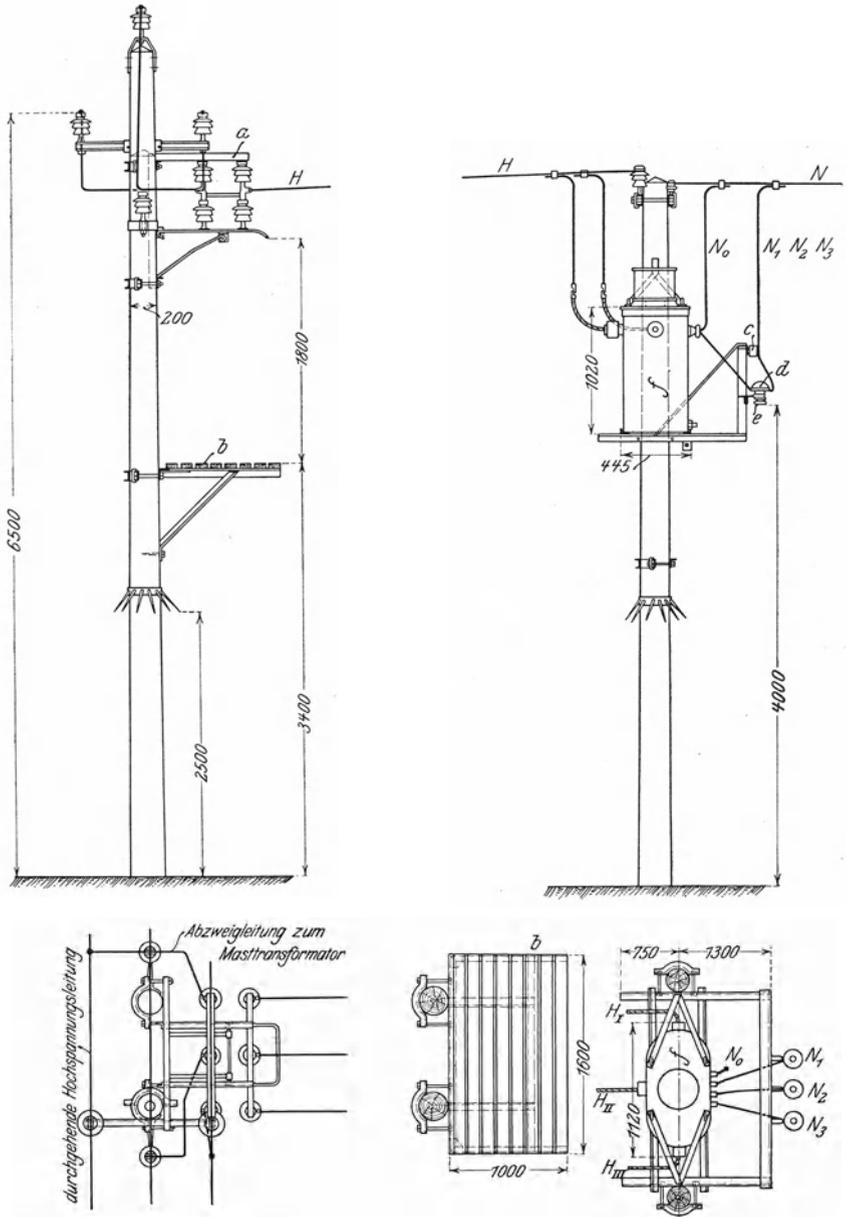


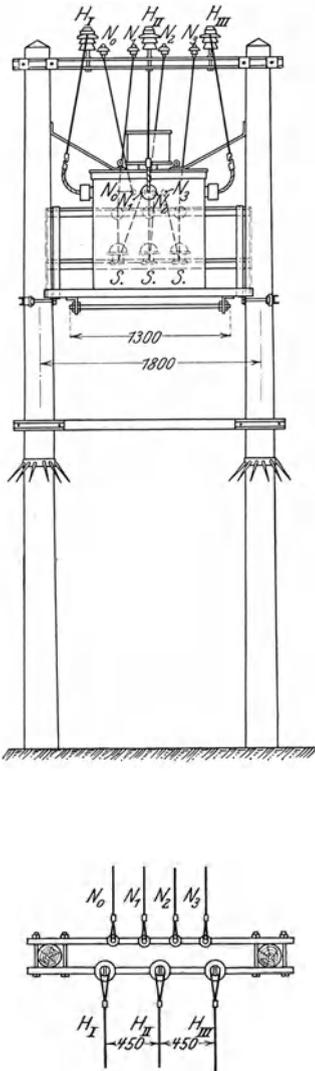
Fig. 270. Größere Masttransformatorstation am Ende einer Sticheitung.

a Hochspannungs-Trennmesser, *b* Bedienungspodium, *c* Isolatoren, *d* Niederspannungssicherungen *S.*, *e* Schmelzeinsätze zu *d*, *f* Drehstromtransformator mit Ölkonservator 15 KVA, 15 000/380, 220 Volt, Freq. = 50, *H, H_I, H_{II}, H_{III}* Hochspannungsleitungen, *N, N₁, N₂, N₃, N₀* Niederspannungsleitungen.

begrenzt, wenn man zwischen die einzelnen Sicherungen nicht isolierende Platten einbaut. Dieses ist aber bei Masttransformatoren nicht zugänglich, weil die dadurch gebildeten Kästen bald mit Ästen, Blättern, umherfliegendem Papier, kleinen Vögeln, Spinnweben usw. ausgefüllt sein würden, und dadurch Betriebsstörungen eintreten könnten.

Eine Masttransformatorstation in wesentlich anderer Ausführung zeigt die Fig. 269, und zwar ist hier der Transformator unmittelbar an der Hochspannungsleitung abgezweigt. Die Leistung desselben beträgt 10 KVA und das Spannungs-Übersetzungsverhältnis 3000/220 Volt. An dem Mast der Hochspannungsleitung ist ein Holzkasten angebaut, in welchem die mittels Isolierzange abschaltbaren 3000-Volt-Streifensicherungen untergebracht sind. Nur unter Benutzung einer Leiter können dieselben bedient werden. Von diesen Sicherungen führt die Leitung zu einem in einer Entfernung von etwa 10 m (in der Regel auf der anderen Straßenseite) aufgestellten zweiten Mast, an welchem der Transformator aufgehängt ist, und die Niederspannungssicherungen montiert sind. Die Art der Transformatorbefestigung ist aus der Fig. 269 ohne weiteres zu erkennen. Die Niederspannungssicherungen sind auf einer eisernen Quertraverse aufgebaut und liegen etwa 5 m über dem Erdboden, so daß ein unbeabsichtigtes Berühren ausgeschlossen ist. Sie sind nach Fig. 266 beschaffen, haben wie die A. E. G.-Sicherungen Hörner, und die Schmelzeinsätze tragen Holzgriffe, so daß sie wiederum als Abschalter benutzt werden können.

Bei noch größeren Transformatorleistungen genügt ein normaler Holzmast zur sicheren Aufhängung des Transformators nicht mehr. Man muß dann entweder zu einem Eisenmast übergehen oder, was unter Umständen billiger ist, zwei Holzmasten zusammenstellen, zwischen denen der Transformator z. B. auf einem Bedienungs-
podium Aufstellung findet. Die Fig. 270 zeigt eine derartige Masttransformatorstation in allen Einzelheiten. Hier ist der Transformator f am Ende einer Stichleitung angeschlossen. Die Leistung desselben beträgt



am Ende einer Stichleitung angeschlossen. Die Leistung desselben beträgt

15 KVA bei 15 000/380, 220 Volt; es ist also sekundär ein Vierleiter-netz vorhanden.

Um den Transformator hochspannungsseitig abtrennen zu können, sind Trennmesser (*a*) vorhanden, die von dem Podeste *b* aus bedient werden. Die Hochspannungsleitung *H* führt dann ungesichert als Stichleitung zum Transformatormast, ist dort abgespannt und durch bewegliche, besondere Leitungsstücke mit den Hochspannungsklemmen des Transformators verbunden. Sekundär sind die drei Phasenleitungen



Fig. 271. Masttransformatorstation mit Eisenmast innerhalb eines Dorfes.

N_1 , N_2 , N_3 über Patronensicherungen *S*. geführt, während die Nullleitung N_0 ungesichert bleibt. Die Sicherungspatronen (*e*) können, ohne den Mast besteigen zu müssen, mittels einer besonderen Stange vom Erdboden leicht ausgeschraubt, also ausgewechselt werden.

Die eisernen Zacken an den Masten der Fig. 270 dienen als Schutz gegen das unbefugte Beklettern derselben, was namentlich auf dem Lande häufig als sportliche Übung von der Schuljugend geübt wird, und schon oftmals zu tödlichen Unglücksfällen geführt hat. Warnungstafeln allein schützen den Besitzer der Leitungen gegen Schaden-

ersatzansprüche nicht, wie eine Reichsgerichtsentscheidung der jüngsten Zeit bewiesen hat.

Schließlich zeigt die Fig. 271 noch eine von der A. E. G. für eine kleine Gemeinde hergestellte Masttransformatorstation unter Verwendung eines Eisenmastes. Es sind mehrere abgehende Stromkreise vorhanden, die sämtlich besondere Sicherungen erhalten haben. Hochspannungsseitig ist wiederum ein Kasten zur Unterbringung der Streifenicherungen benutzt. Weitere Erklärungen können wohl unterbleiben, da aus der Abbildung alles Erforderliche ersichtlich ist. Bei der Höhe des Mastes wird allerdings die Beseitigung einer Störung nicht allzu leicht sein, und darum sollte man, wenn wie hier die Verhältnisse nicht besonders dazu zwingen, nicht über eine Befestigungshöhe für den Transformator von etwa 5 bis 6 m gehen, um Montagearbeiten bequemer und schneller ausführen zu können.

Selbstverständlich gilt für alle Masttransformatorstationen, daß die Tragmasten von bester Beschaffenheit und außerordentlich zuverlässig im Erdboden eingesetzt sein müssen, weil die Fläche, die dem Winde ausgesetzt ist, durch den Transformator natürlich sehr groß ist, und ein Sturm der Station nichts anhaben darf.

52. Fahrbare Transformatorstationen.

Die fest aufgestellten Transformatoren hatten die Aufgabe, solchen Verbrauchsstellen die elektrische Energie mit der gewünschten Spannung zur Verfügung zu stellen, an die der Strom für Licht oder Kraft oder beides zusammen jederzeit geliefert werden muß. Aus diesem Grunde ist daher stets auch ein mehr oder weniger ausgedehntes sekundäres Verteilungsnetz vorhanden. Handelt es sich nun aber um den Anschluß einzelner Elektromotoren an die Hochspannungsleitung, die je nach Bedarf ihren Aufstellungsort wechseln, und nie längere Zeit an ein und derselben Stelle ihre Arbeit zu verrichten haben, dann wäre es mit Rücksicht auf die Kosten undurchführbar, für alle derartigen Anschlußstellen ein festes Niederspannungs-Leitungsnetz zu verlegen, wenn nicht der Motor für die Hochspannung selbst gewickelt werden kann, was z. B. bei Überlandzentralen in der Regel nicht möglich und wegen der Bedienung der Hochspannungs-Schaltapparate durch ungeübte Leute auch nicht empfehlenswert ist. Derartige Verhältnisse finden sich häufig in landwirtschaftlichen Betrieben z. B. für das elektrische Pflügen, Dreschen auf dem Felde an den Stakenplätzen, Wasserpumpen für die Be- und Entwässerung von Feldern und Wiesen, und ferner auch für Moorkultur, größere Bohrfelder, Steinbrüche u. dgl. Für alle solche Fälle geht man daher vorteilhafter und vor allen Dingen auch wirtschaftlicher in der Form vor, daß man den zur Verminderung der Spannung notwendigen Transformator fahrbar ausführt, und ihn dann jedesmal dort an die Hochspannungsleitung anschließt, wo der Elektromotor gerade gebraucht wird. Zu diesem Zwecke setzt man den Transformator auf einen Wagen, und bringt in letzterem

auch alle Schalt-, Sicherheits- und Meßapparate unter. Die Fig. 272 zeigt einen derartigen Transformatorwagen der Siemens-Schuckert-Werke mit seiner Inneneinrichtung und der Form des Anschlusses an die Hochspannungsleitung. Auch für vorübergehende Beleuchtungsanlagen kann die Benutzung einer fahrbaren Transformatorstation manche Ausgaben ersparen. Desgleichen ist sie als Augenblicks-

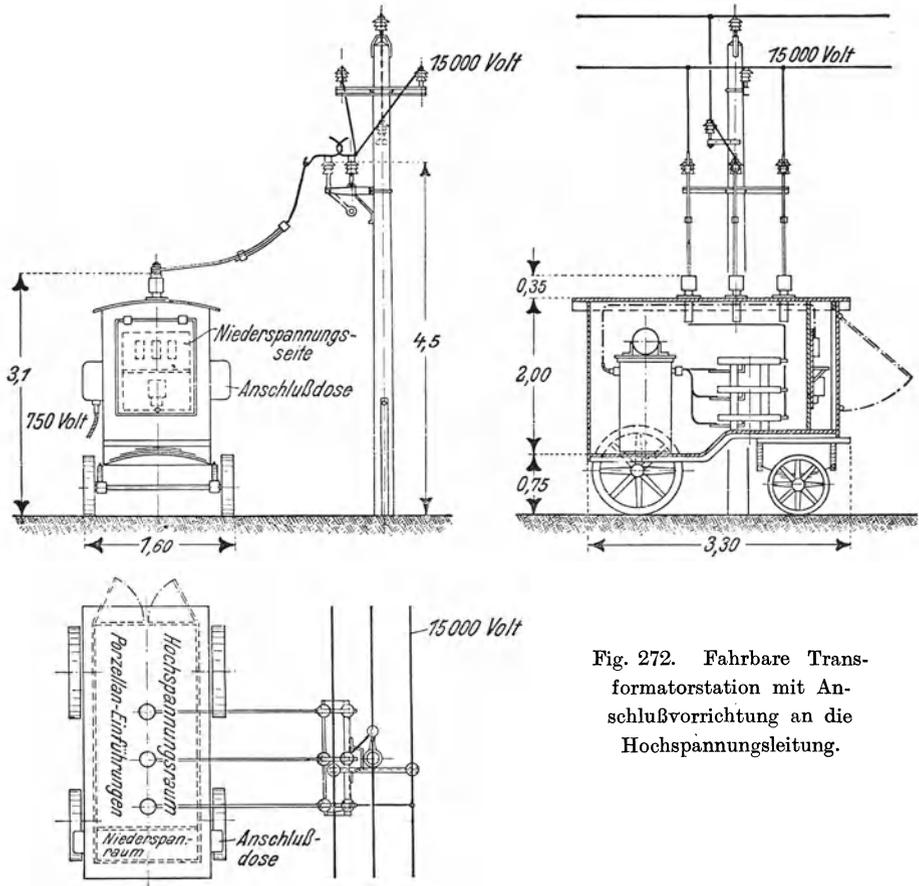


Fig. 272. Fahrbare Transformatorstation mit Anschlußvorrichtung an die Hochspannungsleitung.

reserve für stationäre Transformatoren in ausgedehnten Überlandkraftwerken vorteilhaft verwendbar.

Als Transformator kann aus bereits bekannten Gründen nur wiederum die ölisierte Type benutzt werden, weil bei einem Trockentransformator trotz der Umkleidung desselben durch die Wagenwände auch bei geschlossenen Türen durch die Fugen, Belüftungsöffnungen usw. Wind und Wetter, Kälte und Hitze Zutritt haben, und die Wicklungen durch Feuchtigkeitsaufnahme, Taubildung u. dgl. schon nach kurzer Betriebszeit Schaden nehmen würden.

Der Wagen in Fig. 272 zeigt eine besondere Bauform und zwar darin, daß der hintere Teil desselben, in welchem der Transformator untergebracht ist, tiefer liegt als der vordere, der zur Aufnahme der Apparate dient. Infolge dieses Einbaues des Transformators wird der Schwerpunkt des Wagens tiefer gelegt, und dadurch größere Stabilität beim Fahren, sowie geringere Bauhöhe erreicht. Die Hinterachse ist gekröpft, und es können somit große Hinterraddurchmesser

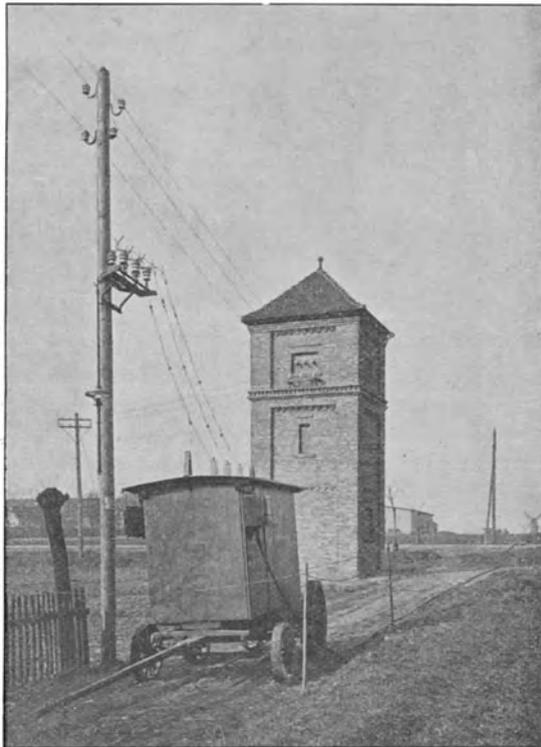


Fig. 273. Fahrbare Transformatorstation betriebsfertig mit ausgelegtem Niederspannungskabel.

gewählt werden, was ebenfalls für das leichtere Fahren auch auf schlechten Wegen, auf dem Felde usw. von ganz besonderem Vorteile ist. Zur Dämpfung von Erschütterungen und Stößen, die nicht nur für den Ölkessel und die Wicklungen des Transformators, sondern auch für die Apparate wie Zähler, Stromzeiger usw. schädlich sind, empfiehlt es sich, beide Radachsen gut und weich zu federn, und außerdem den Transformator in seinem inneren Aufbau noch besonders durchzubilden (Wicklungsversteifung), sowie Zähler und andere Meßapparate federnd zu befestigen.

An Apparaten sollte für solche fahrbaren Transformatoren wiederum nur das Allernotwendigste genommen werden, und zwar je nach der Höhe der Spannung und der Größe der Leistung hochspannungsseitig entweder Sicherungen oder Ölschalter. Muß auf sehr große Billigkeit gesehen werden, so kann beides auch fortgelassen werden, wenn sekundär Sicherungen vorhanden sind, und der Anschluß an die Hochspannungsleitung in Form eines Abschalters ausgebildet ist. Bei Spannungen von 10 000 Volt aufwärts verwenden die Siemens-Schuckert-Werke noch Drosselspulen als Überspannungsschutz. Da die Entfernung des Transformatoranschlusses von der nächsten festen Transformatorenstation in der Regel 3 bis 4 km nicht überschreitet, und in letzterer Ableitungsvorrichtungen

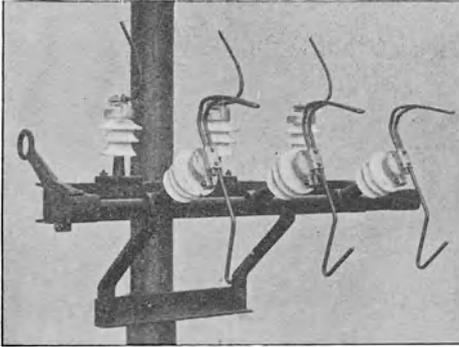


Fig. 274. Mastschalter, geöffnet.

zur Erde für die Überspannungen (Fein- oder Grobschutz) zumeist vorhanden sind, so brauchen solche in den Wagen nicht mehr installiert zu werden. Unterspannungsseitig sind stets Sicherungen, und ferner ein Zähler je nach den Spannungsverhältnissen mit oder ohne Meßtransformatoren vorzusehen. Das Innere des Wagens wird dann nach Fig. 272 in zwei Räume, den Hoch- und den Niederspannungsraum, geteilt, und dadurch verhindert, daß Unberufene z. B. beim Beobachten des Zählers, Anstecken des Niederspannungskabels usw. mit hochspannungsführenden Teilen in Berührung kommen können.

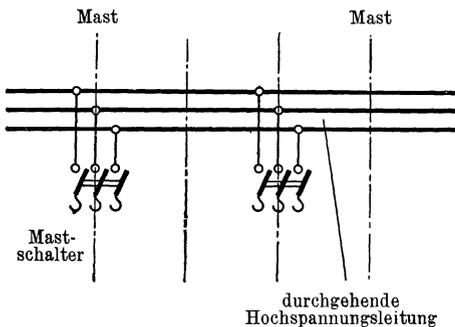


Fig. 275. Schaltbild für die Anordnung von Mastschaltern bei fahrbaren Transformatorenstationen.

(Fig. 274) und beweglicher blanker oder isolierter Leitungen (Fig. 272 und 273), die je nach der Entfernung zwischen Wagen und Mast innerhalb bestimmter Grenzen leicht verlängert oder verkürzt werden können.

Der Mastschalter besteht z. B. bei Drehstrom aus sechs ähnlich den Hörnerfunkenstrecken ausgebildeten Kupferbügeln, von denen drei Stück mit ihren Isolatoren drehbar gelagert und mit Haken versehen sind

Der Anschluß des Transformatorwagens an die Hochspannungsleitung erfolgt unter Benutzung besonders ausgebildeter Mastschalter

in welche die beweglichen Anschlußleitungen, die zu diesem Zwecke an einem Ende kupferne Ringe erhalten, unter Zuhilfenahme einer Schaltstange eingehängt werden. Diese Arbeit erfolgt in spannungslosem Zustande der Einhängehaken. Sind alle drei Leitungen eingehängt, dann wird mit derselben Schaltstange der Schalter geschlossen, und damit der Transformator unter Spannung gesetzt. Die Fig. 274 zeigt den Mastschalter in geöffnetem Zustande, während in Fig. 272 und 273 der Schalter geschlossen und die Transformatorstation betriebsfertig ist. Zum Abschalten größerer Leistungen sind diese Mastschalter nur in Fällen der Gefahr bestimmt, weil ein Verbrennen der Kupferhörner und ein Stehenbleiben des Lichtbogens zu fürchten ist. Für gewöhnlich ist zunächst der Transformator stromlos zu machen, und dann erst der Schalter zu öffnen.

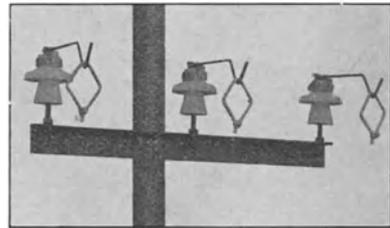


Fig. 276. Mastanschlußhaken.

Aus dem Schaltbilde Fig. 275 geht hervor, wie einfach mit Hilfe solcher Schalter der Anschluß des Transformators an die Hochspannungsleitung bewirkt und wie bequem und ohne jede Störung das Zu- und Abschalten desselben vorgenommen werden kann. Es ist also nicht notwendig, die Hochspannungsleitung durch besondere Streckenabschalter vor Anschluß des Transformators auszuschalten, oder Anschlußhaken und getrennt zu installierende Schalter zu verwenden.

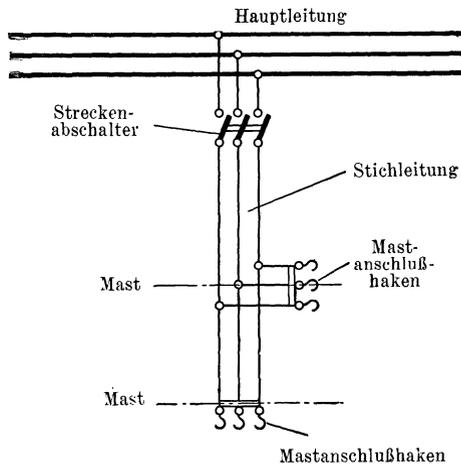


Fig. 277. Schaltbild für die Anordnung von Mastanschlußhaken und Streckentrennschalter bei fahrbaren Transformatorstationen.

Liegt indessen eine Anzahl von Anschlußstellen für den Transformator an einer Stichleitung, die ohne Störung des übrigen Betriebes ausschaltbar ist, also z. B. lediglich für die Zwecke eines Landwirtes dient, so können an Stelle der Mastschalter auch einfach Mastanschlußhaken nach Fig. 276 zusammen mit einem Strecken-Abschalter am Anfange der Stichleitung verwendet werden. Das Schaltbild ist in Fig. 277 dargestellt. Zum Einhängen der Leitungen muß ebenfalls eine Schaltstange benutzt werden. Nachteilig bei einer derartigen Anordnung ist erstlich, daß nach dem Einhängen

der Leitungen der oft weit entfernt gelegene Mastschalter geschlossen werden muß, und daß ferner in Gefahrenfällen öfters ein Zerstören des Transformators oder sonstige unangenehme Vorkommnisse bereits eingetreten sind, bis man dazu gekommen ist, den Streckenschalter zu öffnen.

Zur Weiterleitung des Stromes von der Sekundärseite des Transformators benutzt man Kabel, die auf einer Kabeltrommel im Transformatorwagen mitgeführt, oder auf einem besonderen Kabelwagen untergebracht werden (Fig. 268). Die Verbindung geschieht durch Anschlußdose und Stecker. Erstere erhalten bei Spannungen über 250 Volt gegen Erde nach den Vorschriften des V. D. E. einen eingebauten Schalter und eine Verriegelung derart, daß der Stecker erst dann eingesteckt bzw. aus der Dose herausgezogen werden kann, wenn der Schalter geöffnet ist, die Steckkontakte also spannungslos sind.

Solche fahrbaren Transformatorstationen sind bereits für Leistungen bis 100 KVA und Spannungen bis 30 000 Volt ausgeführt worden.

Zusammenstellung der in den Formeln verwendeten Buchstaben.

Lateinische Buchstaben.

- $2a$ Zahl der Ankerstromzweige beim Gleichstrommotor.
 a_M Arbeitszeit eines Motors bei intermittierendem Betriebe.
 c Frequenz, Periodenzahl eines Wechselstromes.
 c_G Periodenzahl der in einer Gleichstromwicklung induzierten EMK. beim Einanker- und Kaskadenumformer.
 c_R Periodenzahl des Wechselstromes im Läufer des Motors beim Kaskadenumformer.
 D Flügeldurchmesser eines Ventilators.
 D Praktisches- oder Nutzdrehmoment.
 D_A Anlaufdrehmoment.
 D_B Bremsdrehmoment.
 D_G Drehmoment des als Generator laufenden Motors.
 D_R Reibungsdrehmoment.
 D_i Theoretisches Drehmoment.
 d Durchmesser oder Seite eines Kanalquerschnittes.
 d_S Durchmesser einer Seiltrommel.
 E_a Die im Anker eines Motors induzierte elektromotorische Kraft (EMK.).
 E_{a_1} Primär induzierte EMK. } in den Wicklungen eines Transformators.
 E_{a_2} Sekundär induzierte EMK. }
 E_{a_p} Induzierte EMK. bei Parallelschaltung } zweier Motoren.
 E_{a_r} Induzierte EMK. bei Reihenschaltung }
 E'_a Induzierte EMK. bei einem als Generator laufenden Motor.
 E_B Bürstenspannung.
 E_G Gleichstromspannung beim Einankerumformer.
 E_k Klemmenspannung beim Motor.
 E'_k Klemmenspannung bei einem als Generator arbeitenden Motor.
 E_{k_1} Primäre Klemmenspannung } beim Transformator.
 E_{k_2} Sekundäre Klemmenspannung }
 E_{k_3} Sekundäre Klemmenspannung eines Transformators im Leerlauf.
 E_p Phasenspannung bei Wechselstrom.
 E'_p Primäre Phasenspannung } beim Transformator.
 E''_p Sekundäre Phasenspannung }
 E_s, E'_s EMK. der Selbstinduktion.
 $E_{T.K.}$ Kurzschlußspannung beim Transformator.
 E_w Wechselstromspannung beim Einankerumformer.
 E_w Wattkomponente } der Wechselstromspannung.
 E_{w_i} Wattlose Komponente }
 F Fläche.
 G_T Gewicht eines Transformators.
 g Beschleunigung durch die Erdschwere (= 9,81).
 g_m Güteverhältnis beim Motor.
 H Pressung von Luft.
 H_T Pressung der Luft innerhalb eines Transformators.

h	Höhe.
J	Stromstärke (allgemein).
J	Resultierender Strom bei Wechselstrom.
J'	Stromstärke bei einem als Generator arbeitenden Motor.
J_A	Anlaufstromstärke.
$J_{A.M.}$	Stromstärke auf der Wechselstromseite beim asynchronen Motor-generator.
J_a	Ankerstrom beim Motor.
J_k	Kurzschlußstrom.
J_m	Magnetisierungsstrom.
J_p	Phasenstrom bei Wechselstrom.
J'_p	Primärer Phasenstrom
J''_p	Sekundärer Phasenstrom
	} beim Transformator.
$J_{s.M.}$	Stromstärke auf der Wechselstromseite beim synchronen Motor-generator.
J_W	Wattstrom
J_{Wl}	Wattloser Strom
	} bei Wechselstrom.
J_0	Leerlaufstrom.
J_1	Ständerstrom beim Wechselstrommotor.
J_1	Primärer Belastungsstrom beim Transformator.
J_2	Läuferstrom beim Wechselstrommotor.
J_2	Sekundärer Belastungsstrom beim Transformator.
i_n	Strom in der Nebenschlußwicklung eines Gleichstrommotors.
ΣK	Summe aller Geschwindigkeits- und Widerstandshöhen einer Kanalanlage.
$k_1, k_2 \dots$	Konstanten in Gleichungen.
L_M	Leistung eines Motors.
L_M^0	Die vom Motor aufgenommene elektrische Energie.
L_{M1}	Vom Ständer eines Drehstrom-Asynchronmotors aufgenommene elektrische Energie.
L_{M1}	Leistung des Drehstrommotors I bei der Kaskadenschaltung.
L_{M2}	Die vom Läufer abgegebene mechanische Arbeit.
L_{Mp}	Leistung bei Parallelschaltung
L_{Mr}	Leistung bei Reihenschaltung
	} zweier Motoren.
$L_{s.M.}$	Leistung eines Synchronmotors.
L_T	Leistung eines Transformators.
L_T^0	Leerlaufenergie eines Transformators.
L_x	Unbekannte Leistung des Synchronmotors bei Abgabe wattlosen Stromes in das Netz.
L_2	Selbstinduktionskoeffizient des sekundären Streufeldes beim Drehstrom-Asynchronmotor.
l	Länge einer Stromleitung oder eines Kanals.
m	Phasenzahl bei Wechselstrom.
N	Zahl der in Reihe geschalteten Ankerleiter bei Motoren.
N_1	Windungszahl des Ständers
N_2	Windungszahl des Läufers
	} beim Drehstrom-Asynchronmotor.
n	Drehzahl in der Minute (ganz allgemein).
n_p	Drehzahl bei Parallelschaltung
n_r	Drehzahl bei Reihenschaltung
	} zweier Motoren.
n_s	Synchrone Drehzahl beim Asynchronmotor.
n_z	Drehzahlverlust.
n_1	Drehzahl des Ständerdrehfeldes
n_2	Drehzahl des Läufers
	} beim Asynchronmotor.
$2p$	Zahl der Pole eines Motors.
p_1	Polpaarzahl beim Motor I
p_2	Polpaarzahl beim Motor II
	} in der Kaskadenschaltung.
Q	Luftmenge.
q	Querschnitt einer Stromleitung oder eines Kanals.

q_A	Querschnitt einer Maueröffnung für den Luftaustritt.
q_F	Querschnitt einer Maueröffnung für den Frischlufteintritt.
R_n	Luftreibungswiderstand innerhalb der Kanalstrecken.
r	Halbmesser (Radius).
r_M	Ruhepause eines Motors bei intermittierendem Betriebe.
r_s	Halbmesser einer Seiltrommel.
s	Schlüpfung beim Asynchronmotor.
s'	Schlüpfung beim übersynchronen Lauf eines Asynchronmotors.
t_B	Benutzungsdauer eines Transformators im Jahre.
t_a	Außentemperatur der Luft.
t_b	Raumtemperatur der Luft.
t_j	Gesamte Stundenzahl im Jahre.
t_u	Temperaturunterschied.
t_x	Mischungstemperatur.
u	Übersetzungsverhältnis bei Getrieben, von Spannungen bei Umformern, Transformatoren usw.
u	Umfang eines Kanals.
V	Verlust.
V_E	Eisenverlust
V_K	Kupferverlust
	} beim Transformator.
V_{r1}	Verluste innerhalb einer Kanalanlage.
v	Luftgeschwindigkeit.
v_s	Umfangsgeschwindigkeit einer Seiltrommel.
W	Widerstand des Generatorstromkreises.
W_B	Bremswiderstand.
W_a	Ankerwiderstand
W_g	Gesamtwiderstand
W_h	Widerstand der Hauptstromwicklung
W_n	Widerstand einer Nebenschlußwicklung
	} eines Motors.
W_v	Vorschaltwiderstand.
$W_1, W_2, W_3 \dots$	Stufen von Anlaßwiderständen.
W_1	Widerstand des Ständers
W_2	Widerstand des Läufers
	} beim Wechselstrommotor.
Z	Zugkraft.

Deutsche Buchstaben.

\mathcal{E}_2	Abzugebende Energiemenge bei der Berechnung einer Drehstromleitung.
\mathfrak{W}	Wärmemenge.
\mathfrak{W}_e	Durch besondere Belüftung abzuführende Wärmemenge.
\mathfrak{W}_g	Gesamte erzeugte Wärmemenge.
\mathfrak{W}_v	Wärmemengenverlust durch die Wärmewanderung.
w_1	Primäre Windungszahl
w_2	Sekundäre Windungszahl
	} beim Transformator.

Griechische Buchstaben.

α	Winkelbezeichnung.
α	Ausdehnungskoeffizient der Luft.
γ	Streuungskoeffizient.
ε	Spannungsabfall im Transformator.
ε	Energieverlust.
ζ	Strömungswiderstände innerhalb einer Kanalanlage.
$\eta_{E. U.}$	Wirkungsgrad eines Einankerumformers.
η_G	Wirkungsgrad eines Generators.
η_M	Wirkungsgrad eines Motors.
η_T	Wirkungsgrad eines Transformators.
η_U	Wirkungsgrad einer Umformung.

η_V	Wirkungsgrad eines Ventilators.	
η_j	Jahreswirkungsgrad beim Transformator.	
η_u	Wirkungsgrad eines Vorgeleges.	
α	Wärmedurchlässigkeitswert.	
π	= 3,14.	
ρ	Spezifischer Widerstand von Leitungsmaterial.	
ρ	Erfahrungsziffer bei der Berechnung einer Kanalanlage.	
Φ	Wirksamer Kraftfluß (Kraftlinienmenge pro Pol).	
φ	Winkelbezeichnung.	
ω	Winkelgeschwindigkeit.	
ω	Winkelgeschwindigkeit des Ständerdrehfeldes	} beim Wechselstrommotor.
ω	Winkelgeschwindigkeit des Läufers	
$\cos \varphi_M$	Leistungsfaktor beim Wechselstrommotor.	

Zusammenstellung der Zeichnungsabkürzungen.

	<i>A.</i>	Anker.
	<i>Anl.</i>	Anlasser.
	<i>Ausgl. W.</i>	Ausgleichswiderstand.
	<i>D_s. G.</i>	Drehstrom-Synchrongenerator.
	<i>D_A. M.</i>	Drehstrom-Asynchronmotor.
	<i>D_s. M.</i>	Drehstrom-Synchronmotor.
	<i>D. Trf.</i>	Drehstrom-Transformator.
	<i>D. Sp.</i>	Drosselspule.
	<i>E_A. M.</i>	Einphasen-Asynchronmotor.
	<i>E. Reg.</i>	Erregerregulator.
	<i>E. Sch.</i>	Endausschalter.
	<i>E. Trf.</i>	Einphasentransformator.
	<i>E. Tr.</i>	Erdungstrennschalter.
	<i>E. W.</i>	Erregerwicklung.
	<i>F. W.</i>	Feldwicklung.
	<i>F. Z.</i>	Frequenzzeiger.
	<i>G. G.</i>	Gleichstromgenerator.
	<i>G_g. G.</i>	Gleichstrom-Erregergenerator.
	<i>G. M.</i>	Gleichstrommotor.
H_1, H_2, \dots		Hilfsschalter.
	<i>H. F.</i>	Hörnerfunkenstrecke.
	<i>H. W.</i>	Hauptstromwicklung.
	<i>K. A.</i>	Kurzschlußanker.
	<i>K. B.</i>	Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung.
	<i>K. W.</i>	Kohlenwiderstand.
	<i>Kps. W.</i>	Kompensationswicklung.
	<i>L. W.</i>	Läuferwicklung.
	<i>L. Z.</i>	Leistungszeiger.
	<i>N. R_g.</i>	Nebenschlußregler für den Generator.
	<i>N. R_M.</i>	Nebenschlußregler für den Motor.
	<i>N. Reg.</i>	Nebenschlußregler.
	<i>N_{str}.</i>	Nebenschluß für Gleichstrom-Stromzeiger (Chunt).
	<i>N. W.</i>	Nebenschlußwicklung.
	<i>Ö. W.</i>	Ölwiderstand.
	<i>Ph. Lp.</i>	Phasenlampe.
	<i>R.</i>	Relais.
	<i>Registr. F. Z.</i>	Registrierender Frequenzzeiger.
	<i>Registr. L. Z.</i>	Registrierender Leistungszeiger.
	<i>Registr. Sp. Z.</i>	Registrierender Spannungszeiger.

- Registr.Str.Z.* Registrierender Stromzeiger.
Reg.Trf. Regeltransformator.
Reg.W. Regulierwiderstand.
R.F. Rollenfunkenstrecke.
R.H.F. Relais-Hörnerfunkenstrecke.
R.R. Rückstrom-Relais.
S. Sicherung.
Sch. Schalter (Hebelschalter).
Sch.max Automatischer Maximalschalter.
Sch.max+Sp. Automatischer Maximal- und Spannungsrückgangs-Schalter.
S.Sch.max Automatischer Maximal-Schutzschalter.
Sig.G. Signalglocke.
Sig.Lp. Signallampe.
S.K. Signalkontakt.
Sp.S. Spannungssicherung.
Sp.Trf. Spannungstransformator (Meßtransformator).
Sp.U. Spannungszeiger-Umschalter.
Sp.Z. Spannungszeiger.
S.S. Sammelschienen.
St.Sch. Stufenschalter.
Str.Trf. Stromtransformator (Meßtransformator).
Str.Z. Stromzeiger.
St.W. Ständerwicklung (Statorwicklung).
Sy.V. Synchronisiervorrichtung.
Trf. Transformator.
Tr. Trennschalter.
U. Umschalter.
V. Verriegelungskontakt.
V.Tr. Verbindungs-Trennschalter.
W.E. Wasserstrahlerder.
W.W. Wasserwiderstand.
Z. Zähler.
Z.G. Zweiphasengenerator.
Z.Sch. Zellschalter.
-

Sachregister.

Bei der Benutzung des Sachregisters sei auch auf das ausführliche Inhaltsverzeichnis verwiesen.

- Abkühlungsfläche bei Transformatoren 264.
Abschalter siehe Trennschalter.
Akkumulatoren
Ladung und Entladung 160, 167, 192.
bei Motorregelung 37.
„ Parallelbetrieb mit Umformern 130, 160, 162, 164, 167, 173.
zur Spannungstransformierung 192.
Wirkungsgrad 130.
Amperemeter siehe Stromzeiger.
Ankerrückwirkung
beim Einankerumformer 150.
„ Gleichstrommotor 27, 46.
Anlassen von Motoren, Umformern siehe Inhaltsverzeichnis.
Anlasser siehe Steuerwalzen.
Anlaßmaschinen 34, 35.
Anlaßschalter 87.
Anlaßtransformator (siehe auch Spartransformator, Stufentransformator)
beim Drehstrom-Asynchronmotor 66.
„ Wechselstrom-Kommutatormotor 94, 103.
Anlaßstufenschalter (siehe auch Stufenschalter) 67.
Anlaufmoment
des Doppelschlußmotors 106.
„ Drehstrom-Asynchronmotors mit Kurzschlußanker 61.
„ Polumschaltung 78.
„ Schleifringanker 49, 53, 54.
des Einphasen-Asynchronmotors 88.
„ Einphasen-Kommutatormotors 89.
des Einphasen-Reihenschlußmotors 93.
des Einphasen-Repulsionsmotors 97.
„ Gleichstrom-Compoundmotors 46.
„ Gleichstrom-Hauptstrommotors 4, 14.
des Gleichstrom-Nebenschlußmotors 29.
von Motoren allgemein 48.
- Anlaufstrom
des Drehstrom-Asynchronmotors 60.
„ Einphasen-Asynchronmotors 87.
„ Gleichstrom-Compoundmotors 45.
„ Gleichstrom-Hauptstrommotors 14.
„ Gleichstrom-Nebenschlußmotors 29.
Anschlußdose 358.
Anwendung
des Drehstrom-Asynchronmotors
in chemischen Fabriken 66.
„ explosionsgefährlichen Räumen 66.
in feuergefährlichen Räumen 66.
bei Hebezeugen 56.
„ Maschinen mit geringem Anlaufmoment 63, 66.
„ Maschinen mit hohem Anlaufmoment 64.
„ Maschinen mit Schwungmassen 56.
in Mühlen 66.
bei Stoffdruckmaschinen 76.
„ Transportvorrichtungen 70.
„ Ventilatoren 61, 70, 230.
„ Verladebrücken 56.
„ Walzwerken 58, 70, 81.
„ Wasserhaltungen 64.
„ Werkzeugmaschinen 56, 77.
„ Zentrifugalpumpen 61, 64, 81.
des Drehstrom-Kollektormotors 106, 111, 112.
des Einphasen-Kollektormotors
bei Aufzügen 100.
„ Druckereien 100.
„ Hebezeugen 95, 100.
„ Schiebebühnen 100.
„ Spinnereien 89, 98, 100.
„ Transportvorrichtungen 89.
„ Ventilatoren 100.
„ Webereien 89, 98, 100.
„ Werkzeugmaschinen 100.
„ Zentrifugalpumpen 100.

- Anwendung**
 des Gleichstrom-Compoundmotors bei Schwungradmaschinen 47.
 in Walzwerken 47.
 des Gleichstrom-Hauptstrommotors bei Bahnfahrzeugen 11.
 „ Hebezeugen 11, 13, 14, 15, 16, 21, 23.
 „ Maschinen mit Seiltrommeln 4, 21.
 „ Rollgängen 13, 21.
 „ Transportvorrichtungen 13.
 „ Verladebrücken 13.
 in Walzwerken 21, 48.
 des Gleichstrommotors allgemein 48.
 „ Gleichstrom-Nebenschlußmotors bei Arbeitsmaschinen allgemein 29, 34.
 „ Fördermaschinen 35.
 „ Hebezeugen 29, 41.
 „ Papiermaschinen 35.
 „ Walzwerken 35, 48.
 „ Werkzeugmaschinen 35, 41.
 des Spartransformators 260.
 „ Synchronmotors bei Arbeitsmaschinen 129.
 „ Umformern 126.
 „ Zentrifugalpumpen 129.
 „ Transformators, Trocken- 218, 243, 354.
 „ Transformators, Öl- 218, 243, 354.
 „ Wechselstrom-Induktionsmotors allgemein 48.
 „ Wechselstrommotors bei Hochspannung siehe Hochspannungsmotoren.
- Anwurfsmotor** (siehe auch Inhaltsverzeichnis) 129.
 Asynchronmotor als — 132.
 beim Asynchron-Motorgenerator 137.
 „ Einankerumformer 163.
 Erregermaschine als — 129.
 der Gleichstromgenerator als — 131.
- Arbeitsweise** (siehe auch Inhaltsverzeichnis)
 des Asynchron-Motorgenerators 135, 138, 174.
 „ Doppelstromgenerators 172.
 „ Einankerumformers 133, 161, 174.
 „ Gleichstrommotors im allgemeinen 1.
 der Gleichstrom-Transformierung 194.
 des Kaskadenumformers 174.
 „ Motorgenerators 131, 134, 138, 174.
 „ Synchron-Motorgenerators 142, 153, 174.
- Arbeitsweise**
 des Wechselstrom-Transformators 195.
 „ Zentrifugalventilators 237.
 Ausgleichstransformator 211.
 Auskochen von Öl 243.
 Autotransformator siehe Spartransformator.
- Bauform** von Transformatorstationen 326.
 Baustoffe 223.
 Belastungsfähigkeit eines Motors 10.
 „ Transformators 199, 200.
 Beleuchtung von Transformatorstationen 305.
 Belüftung von Induktionsreglern 275.
 „ Transformatoren 203, 216, 217, 219, 245, 246, 312, 322.
 durch Ventilatoren 240, 256.
 Belüftungskanal bei Transformatoren 231.
 Berry-Transformatorschaltung 261.
 Blech, Transformator- 216.
 Bremsdrehmoment 22.
 Bremsmagnet 17.
 Bremsung, elektrische beim Drehstrom-Asynchronmotor 58, 79, 81.
 „ Drehstrom-Reihenschlußmotor 110.
 „ Gleichstrom-Hauptstrommotor 15, 21.
 „ Gleichstrom-Nebenschlußmotor 33, 40.
 „ Wechselstrom-Kommutatormotor 95.
- Bürstenabhebevorrichtung 57, 74.
 Bürstenfeuer beim Einphasen-Kommutatormotor 90.
 „ Gleichstrommotor 9, 11, 30.
 Bürstenspannung 57.
- Charakteristikum**
 des Anlassens eines Gleichstrom-Hauptstrommotors 15.
 „ Anlassens bei Reihen-Parallelschaltung von Gleichstrom-Hauptstrommotoren 18.
 „ Doppelschlußmotors 103.
 „ Drehstrom-Induktionsmotors 50.
 „ Drehstrom-Kollektormotors 107.
 „ Drehstrom-Nebenschlußmotors 112.
 „ Drehstrom-Reihenschlußmotors 110.

- Charakteristikum
 des Einankerumformers 149, 153, 155, 161, 174.
 „ Einphasen-Induktionsmotors 86.
 „ Gleichstrom-Compoundmotors 45.
 „ Gleichstrom-Hauptstrommotors 4.
 „ Gleichstrom-Nebenschlußmotors 27, 33.
 „ Kaskadenumformers 175, 177.
 „ Motorgenerators (asynchron) 135.
 „ Motorgenerators (synchron) 126.
 „ Reihenschlußmotors, Einphasen- 91, 93.
 „ Repulsions-Induktionsmotors 101.
 „ Repulsionsmotors 97.
 „ Wechselstrom-Transformators 195, 199, 203.
 „ Zentrifugalventilators 237.
- Charakteristische Kurven
 des Doppelschlußmotors 105.
 „ Drehstrom-Asynchronmotors 51, 54, 77, 78, 84.
 „ Drehstrom-Reihenschlußmotors 111.
 „ Gleichstrom-Compoundmotors 46.
 „ Gleichstrom-Hauptstrommotors 5, 18.
 „ Gleichstrom-Nebenschlußmotors 28.
 „ Kaskadenumformers 181.
 „ Wechselstromtransformators 203.
 „ Zentrifugalventilators 238.
- Chunt 145.
- Compoundierung
 beim Einankerumformer 155, 165, 172.
 eines Gleichstrommotors 45.
 beim Kaskadenumformer 181.
- Dämpferwicklung
 beim Einankerumformer 167.
 „ Kaskadenumformer 180.
 „ Synchronmotor 129.
- Dämpfungswiderstand (siehe auch Überspannungsschutz) 294.
- Dauerbetrieb beim Motor 8.
- Deckendurchführung von Leitungen (siehe Durchführungen, Mauerdurchführungen, Wanddurchführungen).
- Derimotor 109.
- Doppel-Repulsionsmotor 100.
- Doppelsammelschienen 297, 307.
- Doppelschlußmotor, Wechselstrom- 103.
- Doppelsternschaltung beim Drehstromtransformator 208, 210.
- Doppelstromgenerator 146, 172.
- Drehfeld
 beim Drehstrommotor 49.
 „ Kaskadenumformer 176.
 „ Synchronmotor 127.
- Drehfeldrichtungsanzeiger 139.
- Drehmoment
 beim Doppelschlußmotor 104.
 „ Drehstrom-Asynchronmotor 49, 52, 75.
 „ Drehstrom-Reihenschlußmotor 110.
 „ Einphasenmotor 87.
 „ Gleichstrom-Compoundmotor 45.
 „ Gleichstrom-Hauptstrommotor 4, 7, 20.
 „ Gleichstrommotor im allgemeinen 2.
 „ Gleichstrom-Nebenschlußmotor 27, 33, 38.
 der Motoren im allgemeinen 48.
 beim Reihenschlußmotor 93.
 „ Repulsions-Induktionsmotor 101.
 „ Repulsionsmotor 97.
- Drehrichtungsänderung
 beim Doppelschlußmotor 106.
 „ Drehstrom-Asynchronmotor 61.
 „ Drehstrom-Kollektormotor 110.
 „ Drehstrom-Reihenschlußmotor 110.
 „ Gleichstrom-Compoundmotor 47.
 „ Gleichstrom-Hauptstrommotor 10, 15, 21.
 „ Gleichstrommotor im allgemeinen 10.
 „ Gleichstrom-Nebenschlußmotor 29, 35.
 „ Reihenschlußmotor 95.
 „ Repulsions-Induktionsmotor 102.
 „ Repulsionsmotor 98.
- Drehstromleitung 125.
- Drehstrom-Regelmaschinen mit Hintermotor 80.
- Drehstromtransformator 207, 337.
 aus Einphasentransformatoren 185, 263.
- Drehzahl
 beim Doppelschlußmotor 104, 106.
 „ Drehstrom-Asynchronmotor 49, 54, 70, 76, 132.
 „ Drehstrom-Nebenschlußmotor 112.
 „ Drehstrom-Reihenschlußmotor 109.

- Drehzahl
 beim Einphasenmotor 86.
 „ Gleichstrom-Compoundmotor 45
 „ Gleichstrom-Hauptstrommotor 4, 6, 9, 18, 20.
 „ Gleichstrommotor im allgemeinen 2.
 „ Gleichstrom-Nebenschlußmotor 26, 37.
 „ Kaskadenumformer 176.
 „ Reihenschlußmotor 93.
 „ Repulsions-Induktionsmotor 101.
 „ Repulsionsmotor 96.
 bei Übertragungsorganen (Riemen, Seile) 118.
 beim Umformer 118.
 Drehzahlregelung (siehe Inhaltsverzeichnis)
 Dreieckschaltung, offene— beim Zweiphasentransformator 206.
 beim Drehstrom-Transformator 210, 263, 330.
 Dreieck-Sternschaltung beim Drehstrommotor 64.
 Dreikesselschalter 338.
 Dreileitersystem
 beim Einankerumformer 167.
 „ Kaskadenumformer 180.
 Drosselspule
 beim Einphasen-Induktionsmotor 87.
 „ Spannungsregeln von Umformern 153, 156, 164, 173.
 „ Überspannungsschutz 295, 311, 327, 356.
 Druckhöhe 235.
 Druckventilator 228.
 Dunkelschaltung 141.
 Durchführungen für Leitungen 302, 303.
 Eichbergmotor 103, 111.
 Einankerumformer 80, 146.
 Transformator für — 277.
 Einfachzellenschalter 130, 145.
 Einphasenleitung 125.
 Einphasentransformator 204.
 in Drehstromnetzen 263.
 Eisenverlust beim Transformator 201.
 Elektrizitätswerke, Bemerkungen für — (siehe auch Kraftwerke, Überlandzentralen) 15, 26, 48, 49, 62, 81, 103, 113.
 Energierückgewinnung (siehe Nutzbrem-
 sung).
 Entflammungspunkt bei Öl 242.
 Erdbebengegend bei Transformator-
 stationen 318.
 Erdung
 von Apparaten 281, 294, 318.
 „ Transformatoren 260, 293, 296.
 Erdungsschalter 308.
 Erregertransformator 103.
 Erregung
 beim Doppelstromgenerator 172.
 „ Einankerumformer 151.
 „ Gleichstrom-Compoundmotor 45.
 „ Gleichstrom - Gleichstrom-
 Transformator 193.
 „ Gleichstrom-Hauptstrommotor 3, 10, 20.
 „ Gleichstrom-Nebenschlußmotor 26, 35.
 „ Synchronmotor 121, 128, 130.
 Erwärmung
 beim Motor 8.
 „ Transformator 199, 232.
 Fahrbarer Transformator 353.
 Feinschutz (siehe auch Drosselspulen,
 Überspannungsschutz) 295, 306, 329,
 356.
 Fernschaltung
 beim Anlassen von Drehstrommotoren 66.
 bei Transformatoren 263.
 Fliehkraftkupplung 87.
 Fliehkraftregler
 beim Drehstrom-Asynchronmotor 60.
 „ Wechselstrom-Kommutator-
 motor 93, 103.
 Fliehkraftschalter 66, 97.
 Flügeldurchmesser beim Ventilator 230.
 Fremderregung
 bei der Gleichstromtransformierung 192.
 „ Umformern 131, 171.
 Frequenzmesser 140, 141, 332.
 Frequenzwandler siehe Periodenumfor-
 mer.
 Frischlufteintritt 225, 228, 233.
 Gegenschaltung bei Motoren zur Dreh-
 zahlregelung 35, 64.
 Geschwindigkeit der Luft bei Belüf-
 tungsanlagen 233.
 Geschwindigkeitshöhe bei einer Kanal-
 anlage 234.
 Gewicht von Umformern 183.
 Gleichstromtransformierung 192.
 Görges 106.
 Gradierwerke 249, 338.
 Grobschutz (siehe auch Überspannungs-
 schutz) 295, 306, 310, 327, 335,
 356.

- Hauptmotor** 80.
Hebelschalter (siehe Schalter).
Hellschaltung 141.
Heubach-Diagramm 92.
Hilfscoumpoundwicklung 46.
Hilfspole 12, 31.
Hintermotor 80.
Hochspannungsmotoren 49, 62, 84, 94, 95, 105, 108, 149, 174.
Hörnerfunkenstrecken(siehe Feinschutz, Grobschutz, Überspannungsschutz).
Induktionsregler 271, 331, 341.
Intermittierender Betrieb 8, 29, 133.
Irisverschluß 230.
Isolierfähigkeit von Öl 243, 245.
Isolierung der Transformatorwicklungen 217, 296.
Jahreswirkungsgrad beim Transformator 201.
Jalousieverschluß 230.
Kabelanlagen, Anlassen von — 276.
Kabeltrommel 349, 358.
Kanalanlage, allgemeine Gesichtspunkte 232.
Kapazität beim Einphasen-Induktionsmotor 87.
Karbidöfen, Transformator für — 310.
Kaskadenschaltung 70, 82, 176.
Kaskadenumformer 173.
Kerntransformator 215.
Kettenantrieb bei Umformern 117.
Klappen
in Kanälen 241.
„ Maueröffnungen 227.
Klappenfenster 226.
Kollektor siehe Kommutator.
Kommutator
bei Einankerumformern 166, 172, 174
„ Einphasen-Kollektormotoren 90, 102, 106.
„ Gleichstrommotoren 9, 11, 38, 48.
Kompensationswicklung bei Einphasen-Kollektormotoren 90, 92.
Kondensator, Synchron- 126.
Kondenswasserbildung beim Öltransformator 245.
Kraftwerk, Bemerkungen für das —
bei Gleichstrom-Hauptstrommotoren 14, 23, 26.
„ Stromverbrauchern, allgemein 49.
„ Umformern, allgemein 113.
„ Wechselstrom-Induktionsmotoren 48, 62, 81.
„ Wechselstrom-Kommutatormotoren 103.
Kühlrippen am Transformator-kessel 242, 250.
Kühlschlangen im Transformator-kessel 250.
Kühlturm (siehe auch Gradierwerke) 338.
Kühlung (siehe auch Belüftung) von Motoren 64.
„ Transformatoren 248, 250, 305, 330.
Kupferverlust beim Transformator 201.
Kupplung
beim Anwurfsmotor 133.
bei der Erregermaschine 122.
„ zwei Gleichstrommotoren 19, 39.
„ Motorgeneratoren 118.
Kurzschlußanker-motor 61.
Kurzschlußbremsung 23.
Kurzschlußspannung beim Transformator 212.
Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung 57, 74.
Leerlaufcharakteristik 5.
Leerlaufenergie beim Transformator 68, 199, 261.
Leerlaufstrom beim Transformator 198.
Legiertes Blech 202.
Leistung
beim Drehstrommotor 53, 75.
„ Drehstrommotor im übersynchronen Betriebe 82.
„ Einankerumformer 149, 150.
„ Gleichstrom-Hauptstrommotor 5.
„ Gleichstrom-Hauptstrommotor bei Reihen-Parallelschaltung 18.
„ Gleichstrom-Nebenschlußmotor 27.
„ Motorgenerator (asynchron) 136.
„ Motorgenerator (synchron) 125.
„ Reihenschlußmotor 92.
„ Transformator 198.
Leistungsfaktor
beim Drehstrom-Asynchronmotor 53, 64, 75, 81.
„ Drehstrom-Kommutatormotor 100, 107.
„ Einankerumformer 155.
„ Kaskadenumformer 174.
bei der Kraftübertragung allgemein 124.
beim Motorgenerator (asynchron) 136.
„ Motorgenerator (synchron) 126.
„ Repulsionsmotor 99.
Leistungszeiger
registrierend 328.
bei Transformatoren 292.

- Leistungszeiger
bei Umformern 138.
- Leitungsquerschnitt
bei Drehstrom 125.
„ Einphasenstrom 125.
- Leonardschaltung 34.
- Luftaustrittsöffnung 227.
- Luft Eintrittsöffnung 227.
- Luftgeschwindigkeit bei Kühlanlagen 234.
- Luftkühlung bei Trockentransformatoren 190.
- Luftmenge bei Ventilatoren 236.
- Luftwechsel 226, 248.
- Magnetisierungskurve 5.
- Magnetisierungsstrom beim Transformator 198.
- Manometer bei Transformatoren 249.
- Manteltransformator 215.
- Mastanschlußhaken 357.
- Mastschalter 356.
- Masttransformator 344.
- Masttrennschalter 318, 346, 356.
- Mauerdurchführungen (siehe auch Durchführungen, Deckendurchführungen, Wanddurchführungen) 312, 315, 335.
- Meßapparate bei Transformatoren 249.
- Meßinstrumente (siehe Frequenzmesser, Leistungszeiger, Spannungszeiger, Stromzeiger, Zähler).
- Meßtransformatoren 74, 86, 140, 195, 306, 327.
- Motorgenerator, asynchroner — 69, 134.
synchroner — 121.
allgemein 117.
- Nebenschluß bei Stromzeigern 145.
- Neutrale Zone 225.
- Nulleiter 167, 181, 211.
- Nutzbremmung
beim Drehstrom-Asynchronmotor 74, 79, 82.
„ Drehstrom-Reihenschlußmotor 110.
„ Einphasen-Asynchronmotor 88.
„ Gleichstrom-Nebenschlußmotor 29, 41.
- Öl, Allgemeine Bedingung für das Transformator- 242, 245.
Ölausdehnungsgefäß 244.
- Öl, Auskochen von Transformator — 243.
- Ölkessel 241.
- Ölkonservator 244.
- Ölstandszeiger 249, 252.
- Öltemperatur 243, 252.
- Öltransformator 241, 354.
- Oxydation von Luft 243.
- Parallelschaltung
beim Einankerumformer 169, 173.
„ Kaskadenumformer 181.
„ Motorgenerator (asynchron) 136.
„ Motorgenerator (synchron) 126, 130, 139.
„ Periodenumformer 191.
„ Wechselstromtransformator 212, 273.
- Pendelung des Wechselstromes 136, 140, 155, 167, 180.
- Periodenumformer 191.
- Phasenlampen 140, 169.
- Phasentrennung in Schaltanlagen 302, 311, 336.
- Phasenverschiebung
bei Motoren 64, 81.
Regelung der — 81, 153, 157, 166, 171, 273.
- Phasenzahl
beim Einankerumformer 149.
„ Kaskadenumformer 178.
- Polumschaltung beim Drehstrom-Asynchronmotor 74, 83, 109.
- Porzellandurchführungen siehe Durchführungen.
- Potentialregler (siehe auch Induktionsregler, Zusatztransformator drehbar) 271, 331, 341.
- Pressung
innerhalb einer Kanalanlage 236.
innerhalb eines Transformators 233, 235.
- Primäranlasser 61.
- Pumpen für Wasserkühlung von Transformatoren 255, 339.
- Raumerfordernis
bei Transformatoren 264.
„ Umformern 118, 146, 174, 179, 183.
- Raumtemperatur 220, 225, 245.
- Reduktionskupplung bei Anwurfsmotoren 133.
- Regeltransformator 98, 110, 112.
- Regelung
der Drehzahl bei Motoren siehe Inhaltsverzeichnis.
„ Spannung bei Motoren siehe Inhaltsverzeichnis.
„ Spannung bei Transformatoren siehe Inhaltsverzeichnis.
„ Spannung bei Umformern siehe Inhaltsverzeichnis.

- Regulieranlasser
 bei Drehstrom-Asynchronmotoren 70.
 „ Gleichstrommotoren 33.
 Regulierung des Zentrifugalventilators 238.
 Reibungsdrehmoment 14.
 Reibungskoeffizient bei Kanalanlagen 235.
 Reibungswiderstand einer Kanalanlage 232.
 Reihen-Parallelschaltung bei Gleichstrom-Hauptstrommotoren 17.
 Reihentransformator 103, 108.
 Relais bei Schaltern (siehe auch Rückstromrelais, Schalter) 285.
 Remanenter Magnetismus 11.
 Riemenantrieb bei Motorgeneratoren 117.
 Ringsammelschienen 297.
 Rollenfunkenstrecke (siehe Feinschutz).
 Rückkühlanlage (siehe Gradierwerke, Kühlturm) 338.
 Rückstromrelais (siehe auch Relais, Schalter) 168.

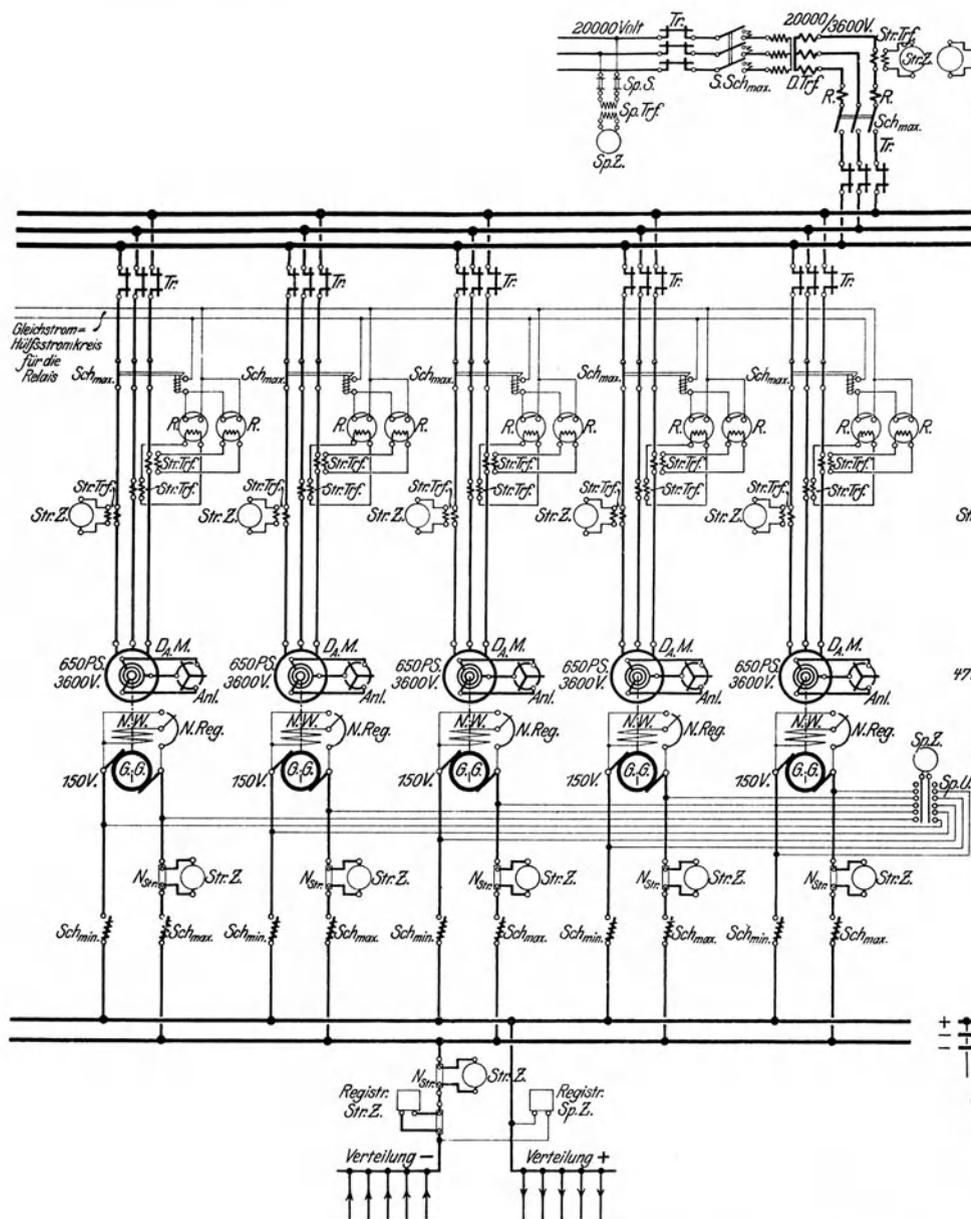
 Sammelkanal 240.
 Sammelschienen allgemein 297.
 Saugventilator 228.
 Schalter (siehe auch Dreikesselschalter, Relais, Rückstromrelais, Schutzschalter, Signallampen, Signalvorrichtungen)
 automatische Maximal-
 bei Drehstrommotoren 53, 74, 85.
 „ Gleichstrommotoren 15, 23.
 „ Transformatoren 195, 284, 304, 330.
 „ Umformern 143, 144, 164, 169.
 Hebel- 23, 44, 63, 85, 138.
 Magnet- 44.
 Öl- (siehe auch automatische Maximalschalter) 315, 330.
 Spannungs-Rückgangs- 25, 132, 164.
 Schaltstangen 281.
 Schalttafel 309, 343.
 Schaltwerk für Steuermotoren 274.
 Schlüpfung 50, 69, 79, 82.
 Schlüpfungsmesser 50, 137.
 Schlupf Widerstand
 beim Drehstrommotor 50.
 „ Gleichstrom-Compoundmotor 47.

 Schützensteuerung 58.
 Schutzschalter 74, 84, 263, 287.
 Seilantrieb bei Umformern 117.
 Sicherheitsventil an Ölkesseln 244.
 Sicherungen (siehe auch Schalter)
 bei Drehstrommotoren 53, 62, 85, 138.
 „ Erregermaschinen 142.

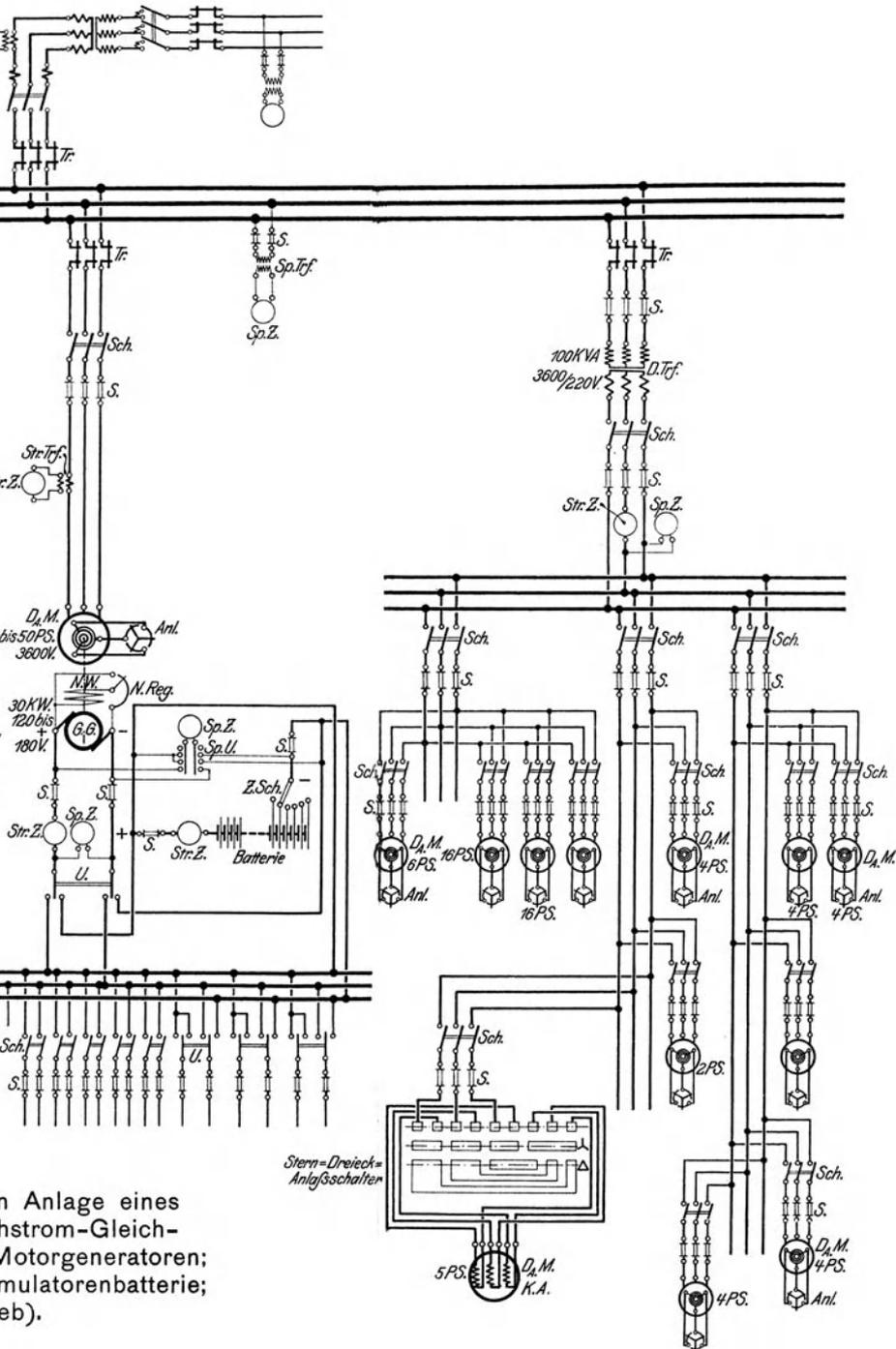
 Sicherungen
 bei Gleichstrommotoren 23.
 „ Transformatoren 284, 315, 345.
 Signallampen bei Schaltern 309, 333.
 Signalvorrichtungen
 bei Schaltern 288, 309, 333.
 „ Transformatoren 249, 339.
 „ Trennschaltern 283.
 Skott-Transformatorschaltung 100, 256.
 Sonns-Transformatorschaltung 259.
 Spaltpole 160.
 Spannungsabfall bei Transformatoren 200.
 Spannungsänderung beim Transformator 266.
 Spannungsverhältnis
 beim Einankerumformer 149.
 bei der Gleichstromtransformierung 194.
 beim Kaskadenumformer 175.
 beim Motorgenerator (asynchron) 117, 136, 138.
 „ Motorgenerator (synchro) 117, 134, 138.
 „ Wechselstromtransformator 197.
 Spannungszeiger
 bei Motoren 25, 86.
 registrierender — 145, 332.
 statischer — 332.
 beim Synchronmotor 128, 140.
 „ Transformator 292, 306, 332.
 Spartransformator (siehe auch Anwendung des —) 67, 108, 259, 268, 270, 272.
 Stern-Dreieckschalter 63.
 Stern-Dreieckschaltung
 beim Drehstrommotor 63.
 „ Transformator 207, 209.
 Sternschaltung beim Drehstromtransformator 211, 263, 330.
 Steuermotor 274.
 Steuerwalzen
 beim Drehstrommotor 58, 66, 69.
 „ Gleichstrom-Hauptstrommotor 15, 16, 17, 20, 22, 24, 26.
 „ Gleichstrom-Nebenschlußmotor 32, 38, 41, 43, 45.
 in Grubenanlagen 67.
 Streutransformator beim Einankerumformer 153, 164, 173.
 Stromart
 Gleichstrom 48.
 Wechselstrom 48.
 Strombegrenzkontroller 58.
 Stromverhältnis beim Einankerumformer 150.
 Stromzeiger
 beim Drehstrommotor 74, 86.

- Stromzeiger
 beim Gleichstrommotor 25.
 registrierender — 145, 332.
 beim Transformator 292, 308, 311,
 332.
 „ Umformer 138.
- Stufenläufer 66.
 Stufenmotor 76.
 Stufenschalter 261, 266.
 Stufentransformator 155, 261, 266.
 zum Anlassen von Einankerumformern 162.
- Stundenleistung beim Motor 9.
 Synchroner Betrieb beim Drehstrommotor 51, 136.
 Synchronisierende Kraft 128.
 Synchronisierung (siehe auch Parallelschaltung)
 eines Asynchronmotors 136.
 durch Asynchronoskop 137.
 eines Einankerumformers 169.
 „ Kaskadenumformers 180.
 „ Synchronmotors 139.
- Synchronkondensator 126.
 Synchronmotor 49, 121, 176.
 selbstanlaufender — 127.
- Teilweise Transformierung 183.
 Telephon in Transformatorstationen 325.
 Thermometer bei Transformatoren 249, 339.
 Thomson, Elihu 95.
 Tourenzahl siehe Drehzahl.
- Transformator
 Anwendung allgemein 48, 115, 195.
 beim Einankerumformer 173.
 „ Induktionsregler 272, 275.
 „ Kaskadenumformer 177.
- Transformierung von Gleichstrom 192.
 Transportplatte bei Transformatoren 305, 312, 339.
- Trennschalter (siehe auch Signalvorrichtungen)
 bei Motoren 74, 86.
 „ Transformatoren 264, 280, 308, 311, 327, 336, 345.
 „ Umformern 138.
- Trockentransformator 190, 218, 231, 241, 354.
 Turbogeneratoren 117.
- Übererregung
 beim Einankerumformer 153.
 „ Kaskadenumformer 180.
 „ Synchronmotor 124.
- Überlandzentralen, Bemerkungen für —
 (siehe auch Elektrizitätswerke, Kraftwerke) 15, 62, 81, 103, 113.
- Übersetzung (siehe auch Spannungsverhältnis)
 bei Getrieben 4.
 der Spannung beim Transformator 197.
- Überspannung
 bei Motoren 62, 84.
 „ Schaltern 284.
 „ Transformatoren 197, 263, 356.
- Überspannungsschutz (siehe auch Drosselspulen, Feinschutz, Grobschutz, Überspannung) 281, 294, 315, 317, 319, 345, 348.
- Übersynchronismus
 beim Drehstrom-Asynchronmotor 82
 „ Drehstrom-Nebenschlußmotor 112.
 „ Einphasen-Asynchronmotor 88.
- Übertemperatur
 bei Motoren 9.
 Raum- 220.
 bei Transformatoren 243.
- Umfangsgeschwindigkeit 5.
 Umlaufzahl siehe Drehzahl.
- Umsteuerung von Motoren siehe Drehrichtungsänderung.
- Vektordiagramm des Induktionsreglers 273.
- Ventilator (siehe auch Anwendung, Charakteristikum, Charakteristische Kurven)
 Antriebskraft 231, 237, 241.
 Druck- 228.
 Druckhöhe für den — 235.
 Saug- 228.
 Schrauben- 228, 246.
 Zentrifugal- 236, 246.
- Verbindungsleitungen bei Drehstrom-Schleifringankermotoren 57.
- Verluste
 innerhalb einer Kanalanlage 234.
 bei Transformatoren siehe Eisen-, Kupferverlust.
- Voltmeter siehe Spannungszeiger.
 Vorschaltwiderstand siehe Steuerwalzen.
- Wärmebeseitigung bei Öltransformatoren 241.
 Wärmedurchlässigkeitswerte von Baustoffen 223.
 Wärmeentwicklung von Transformatoren 219.
 Wärmemenge 219.
 Wärmewanderung 222.
- Wanddurchführungen (siehe auch Durchführungen, Mauerdurchführungen, Porzellandurchführungen) 312, 315, 341.

- Ward-Leonard-Schaltung 34.
 Wasser für Transformator Kühlung 248, 330, 338.
 Wasserstrahler (siehe auch Feinschutz, Überspannungsschutz) 310, 329, 336.
 Wasserwiderstand (siehe auch Grob-
 schutz, Überspannungsschutz) 294, 311, 327, 336.
 Wattloser Strom beim Synchronmotor 122.
 Wattstrom beim Synchronmotor 123.
 Wendepole
 beim Einankerumformer 165.
 „ Gleichstrom-Compoundmotor 47.
 „ Gleichstrom-Hauptstrommotor 9, 11.
 „ Gleichstrom-Nebenschlußmotor 30, 38.
 „ Kaskadenumformer 178.
 Widerstandshöhe bei einer Kanalanlage 234.
 Windungsschalter siehe Stufenschalter.
 Winter-Eichberg-Motoren 103, 111.
 Wirkungsgrad
 einer Akkumulatorenbatterie 130.
 beim Drehstrommotor 53, 78.
 „ Einankerumformer 150, 183.
 bei der Gleichstromtransformierung 194.
 Jahres- beim Transformator 201.
 beim Kaskadenumformer 174, 183.
 „ Motorgenerator (asynchron) 152, 183.
 „ Motorgenerator (synchron) 151, 152, 183.
 „ Spaltpolumformer 152.
- Wirkungsgrad
 beim Transformator 200.
 einer Umformeranlage 130, 183.
- Zähler
 bei Drehstrommotoren 86.
 „ Gleichstrommotoren 26.
 „ Transformatoren 292, 306, 317, 327, 355.
 „ Umformern 139.
- Zahnradübersetzung
 allgemein 4.
 bei Anwurfsmotoren 133.
- Zeitkurve
 für die Motorerwärmung 10.
 „ Ölerwärmung bei Transformatoren 243.
- Zellenanlage bei Transformatoren 246, 253, 302, 304, 339.
- Zentrifugalventilator (siehe auch Charakteristikum, Charakteristische Kurven, Ventilator) 236.
- Zickzackschaltung bei Drehstromtransformatoren 207, 211.
- Zone, Neutrale — 225.
- Zugkraft
 beim Drehstrom-Asynchronmotor 52.
 „ Gleichstrom-Hauptstrommotor 4.
 „ Reihenschlußmotor 93.
- Zusatztransformator, drehbarer — (siehe auch Induktionsregler, Potentialregler, Spartransformator) 155, 157, 167, 271, 331, 341.
 feststehender — 268.
- Zweiphasenstrom
 unverketteter — 205.
 verketteter — 205, 257.
- Zweiphasentransformator 205.

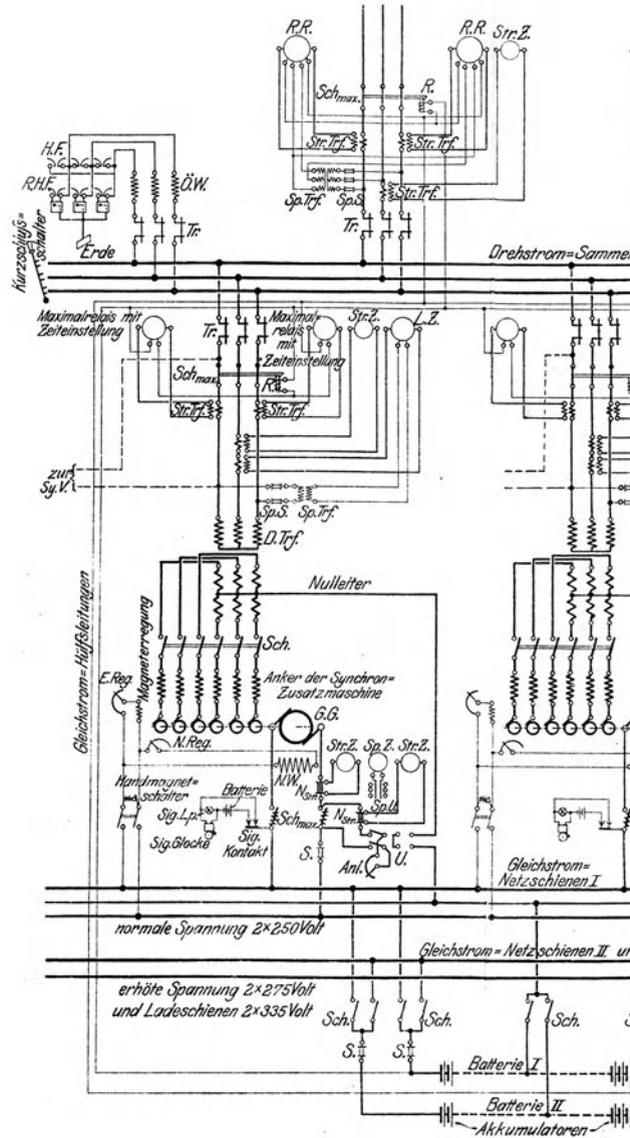


Schaltungsschema der elektrischen großen industriellen Werkes (Drehstromumformung durch Asynchron-Motoren, Gleichstrombeleuchtung durch Akkumulatoren, Drehstrommotorenbetrieb)



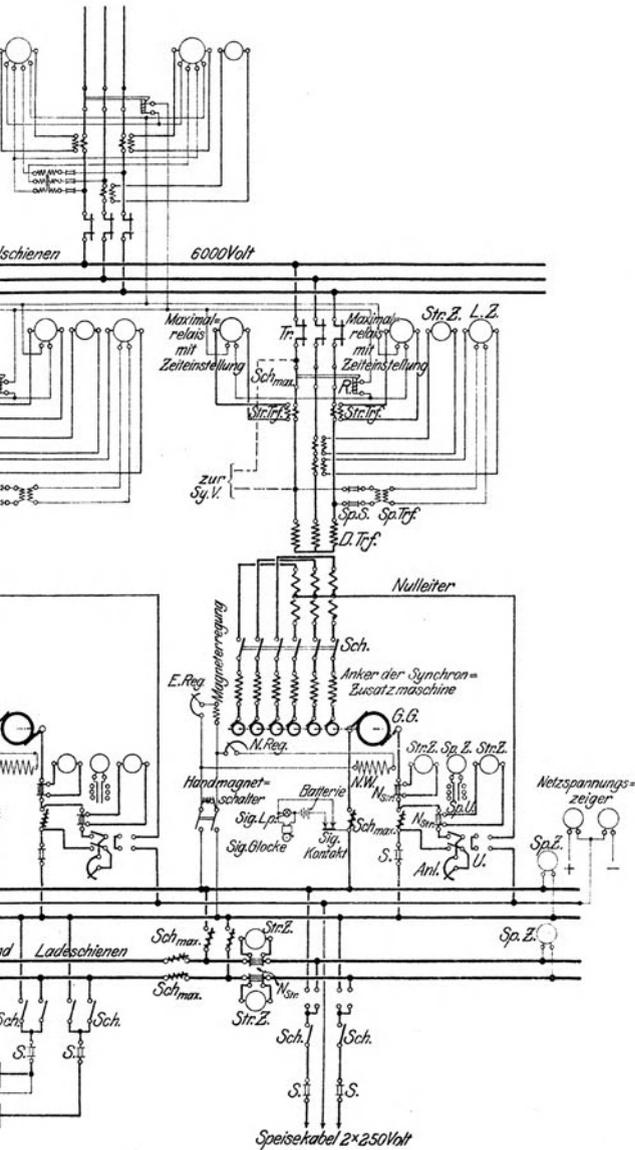
n Anlage eines
 Strom-Gleich-
 Motorgeneratoren;
 mulatorenbatterie;
 eb).

Schaltungsschema für eine D
Einankerumformeranlage m
durch synchrone Zusatma
von der Gleich

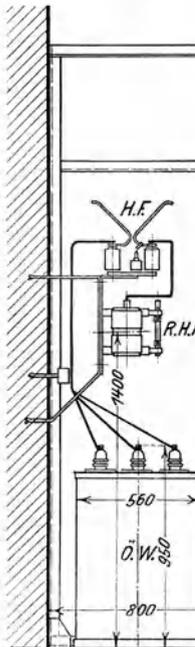
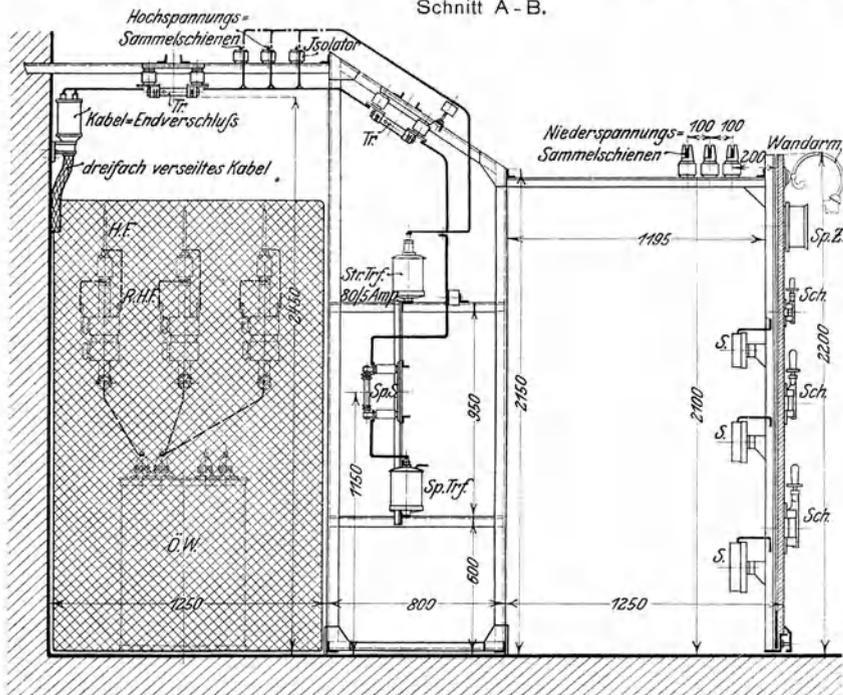


Tafel III.

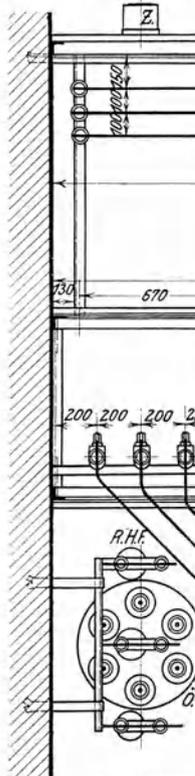
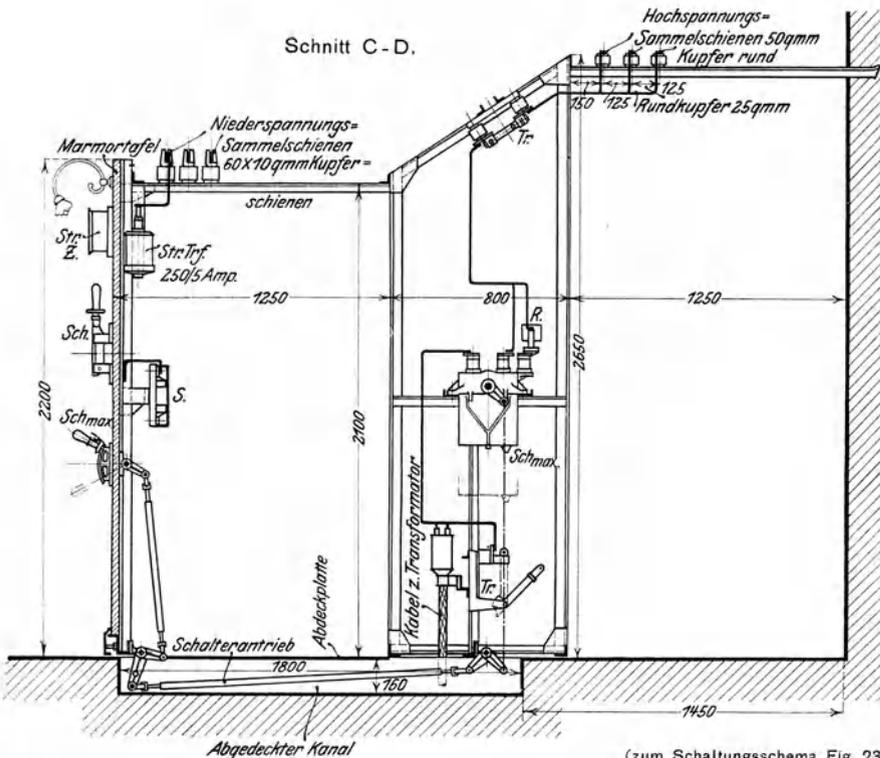
Drehstrom-Gleichstrom-
mit Spannungsregelung
schienen und Anlassen
stromseite.



Schnitt A - B.

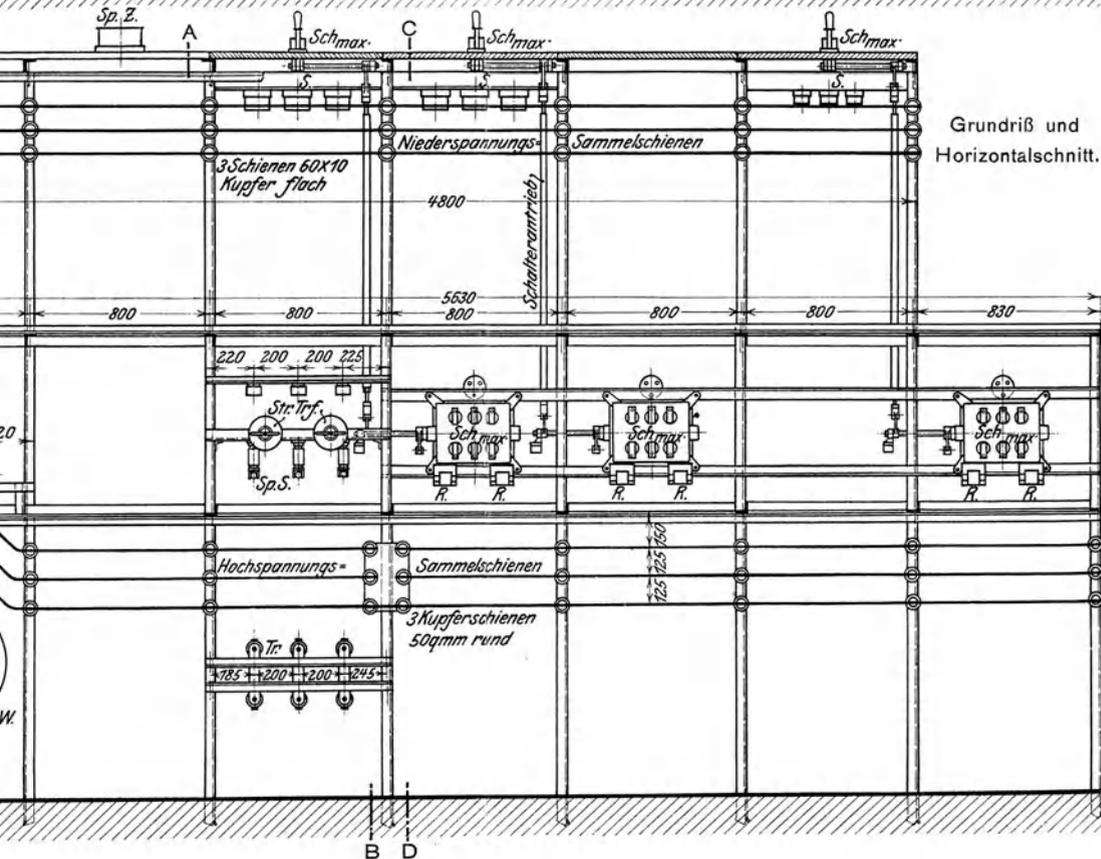
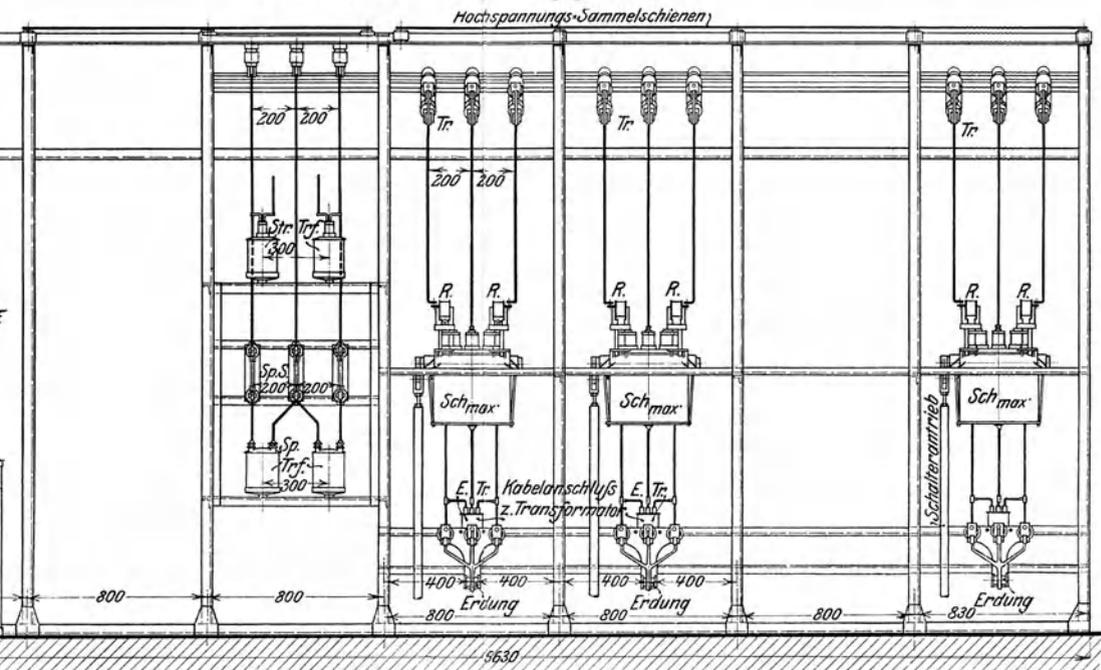


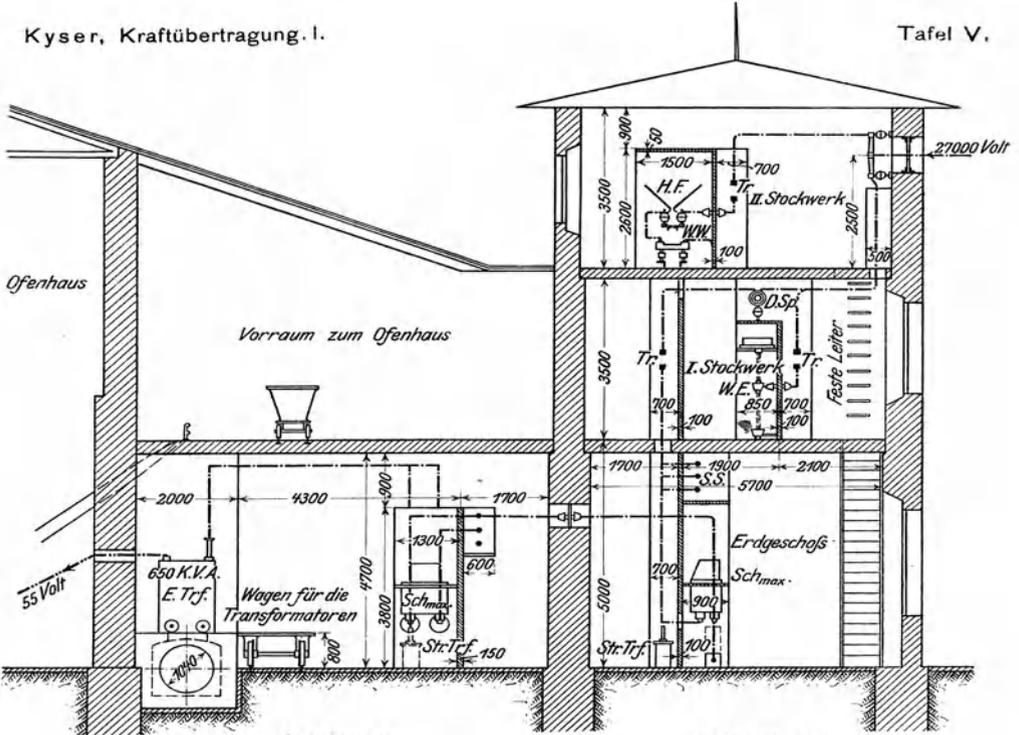
Schnitt C - D.



(zum Schaltungschema Fig. 238, Beschreibung siehe Seite 306.)

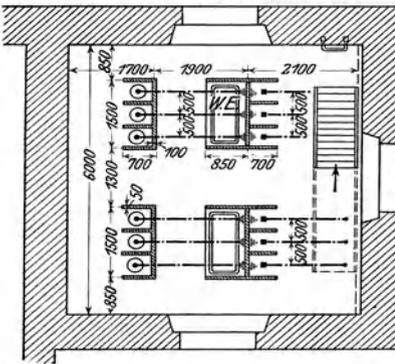
Rückansicht des Hochspannungsgerüsts.



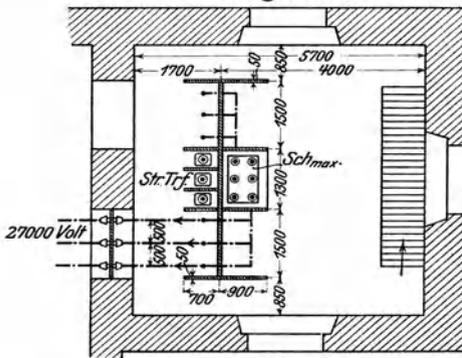
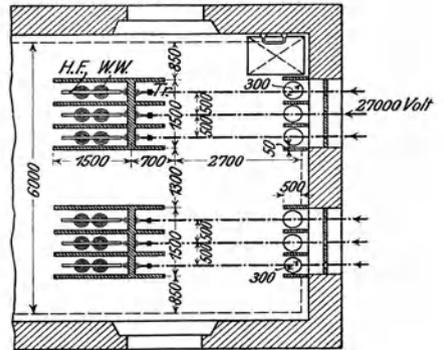


I. Stockwerk.

II. Stockwerk.



Erdgeschoß.



Transformatorstation
Narni.

(zum Schaltungsschema Fig. 240,
Beschreibung siehe Seite 310.)

Die Wechselstromtechnik. Herausgegeben von Dr. Ing. **E. Arnold** †
Geh. Hofrat, Professor und Direktor des Elektrotechnischen Instituts der Großherzogl. Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe. In fünf Bänden.

Erster Band: **Theorie der Wechselströme.** [Von J. L. la Cour und O. S. Bragstad. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 591 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 24.—.

Zweiter Band: **Die Transformatoren.** Ihre Theorie, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Von E. Arnold und J. L. la Cour. Zweite vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 443 Textfiguren und 6 Tafeln. In Leinwand gebunden Preis M. 16.—.

Dritter Band: **Die Wicklungen der Wechselstrommaschinen.** Von E. Arnold. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit ca. 470 Textfiguren und 5 Tafeln. Erscheint im Sommer 1912.

Vierter Band: **Diesynchronen Wechselstrommaschinen.** Von E. Arnold und J. L. la Cour. Zweite Auflage. Mit ca. 500 Textfiguren und ca. 10 Tafeln. Erscheint im Herbst 1912.

Fünfter Band: **Die asynchronen Wechselstrommaschinen.**

Erster Teil: **Die Induktionsmaschinen.** Von E. Arnold, J. L. la Cour und A. Fraenckel. Mit 307 Textfiguren und 10 Tafeln. In Leinwand gebunden Preis M. 18.—.

Zweiter Teil: **Die Wechselstromkommutatormaschinen.** Ihre Theorie, Berechnung, Konstruktion und Arbeitsweise. Von E. Arnold, J. L. la Cour und A. Fraenckel. Mit 400 in den Text gedruckten Figuren und 8 Tafeln. In Leinwand gebunden Preis ca. M. 20.—.

Die Gleichstrommaschine. Ihre Theorie, Untersuchung, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Von Professor Dr.-Ing. **E. Arnold** † (Karlsruhe). In 2 Bänden.

I. **Theorie und Untersuchung der Gleichstrommaschine.** Zweite, umgearbeitete Auflage. Mit 593 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 20.—.

II. **Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise der Gleichstrommaschine.** Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 502 Textfiguren und 13 Tafeln. In Leinwand gebunden Preis M. 20.—.

Arbeiten aus dem Elektrotechnischen Institut der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe. Herausgegeben von Dr.-Ing. **E. Arnold**, Direktor des Instituts.

I. Band 1908—1909. Mit 260 Textfiguren. Preis M. 10.—.

II. Band 1910—1911. Mit 284 Textfiguren. Preis M. 10.—.

Zu beziehen durch jede Buchhandlung.

Verlag von Julius Springer in Berlin.

Elektrische Starkstromanlagen. Maschinen, Apparate, Schaltungen, Betrieb. Kurzgefaßtes Hilfsbuch für Ingenieure und Techniker sowie zum Gebrauch an technischen Lehranstalten. Von Dipl.-Ing. **Emil Kosack**, Oberlehrer an den Königl. Vereinigten Maschinenbauschulen zu Magdeburg. Mit 259 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 7.—.

Hilfsbuch für die Elektrotechnik, unter Mitwirkung einer Anzahl Fachgenossen bearbeitet und herausgegeben von Dr. **K. Strecker**, Geh. Postrat und Professor. Achte, vermehrte und verbesserte Auflage. In Vorbereitung.

Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik. Von Dr. **A. Thomälen**, Elektroingenieur. Fünfte, verbesserte Auflage. Mit 408 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 12.—.

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik. Von Dr. **G. Benischke**. Zweite, erweiterte Auflage von „Magnetismus und Elektrizität mit Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis“. Mit 489 Textfiguren. Preis M. 12.— ; in Leinwand gebunden M. 13.20.

Die normalen Eigenschaften elektrischer Maschinen. Ein Datenbuch für Maschinen- und Elektroingenieure und Studierende der Elektrotechnik. Von Dr.-Ing. **Rudolf Goldschmidt**, Privatdozent an der Technischen Hochschule in Darmstadt. Mit 34 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 3.—.

Aufgaben und Lösungen aus der Gleich- und Wechselstromtechnik. Ein Übungsbuch für den Unterricht an technischen Hoch- und Fachschulen sowie zum Selbststudium von **H. Vieweger**, Professor am Technikum Mittweida. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 174 Textfiguren und 2 Tafeln. In Leinwand gebunden Preis M. 7.—.

Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom. Von **Gisbert Kapp**. Vierte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 255 in den Text gedruckten Figuren. In Leinwand gebunden Preis M. 12.—.

Elektromotoren für Gleichstrom. Von Dr. **G. Roebler**, Professor an der Königl. Technischen Hochschule zu Danzig. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 49 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 4.—.

Elektromotoren für Wechselstrom und Drehstrom. Von Dr. **G. Roebler**, Professor an der Königl. Technischen Hochschule zu Danzig. Zweite Auflage in Vorbereitung.

Zu beziehen durch jede Buchhandlung.

Verlag von Julius Springer in Berlin.

Der Drehstrommotor. Ein Handbuch für Studium und Praxis. Von **Julius Heubach**, Chef-Ingenieur. Mit 163 Textfiguren.
In Leinwand gebunden Preis M. 10.—

Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom. Eine Darstellung ihrer Theorie, Konstruktion und Anwendung. Von **Gisbert Kapp**. Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 185 Textfiguren.
In Leinwand gebunden Preis M. 8.—

Die Einphasenmotoren nach den deutschen Patentschriften. Mit Sachregister der deutschen Reichs-Patente über Einphasen- und Mehrphasen-Kommutator-Motoren. Von Dr.-Ing. **Erich Dyhr**. Mit 112 Textfiguren.
Preis M. 6.—

Das Pendeln bei Gleichstrommotoren mit Wendepolen. Von Dr. **Karl Humburg**, Diplomingenieur. Mit 50 Textfiguren. Preis M. 2.80.

Formspulen-Wicklung für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Von **Rudolf Krause**, Ingenieur. Mit 46 in den Text gedruckten Figuren.
Preis M. 1.20.

Das elektrische Kabel. Eine Darstellung der Grundlagen für Fabrikation, Verlegung und Betrieb. Von Dr. phil. **C. Baur**, Ingenieur. Zweite, umgearbeitete Auflage. Mit 91 Textfiguren. In Leinwand geb. Preis M. 12.—

Die Berechnung elektrischer Freileitungen nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Von Dr.-Ing. **W. Majerczik**-Berlin. Mit 10 in den Text gedruckten Figuren.
Preis M. 2.—

Beanspruchung und Durchhang von Freileitungen. Unterlagen für Projektierung und Montage. Von Dipl.-Ing. **Robert Weil**. Mit 42 Textfiguren und 3 Tafeln.
Preis M. 4.—

Die Fernleitung von Wechselströmen. Von Dr. **G. Roessler**, Professor an der Königl. Technischen Hochschule in Danzig. Mit 60 Textfiguren.
In Leinwand gebunden Preis M. 7.—

Zu beziehen durch jede Buchhandlung.

Verlag von Julius Springer in Berlin.

Elektrotechnische Meßkunde. Von Dr.-Ing. P. B. **Arthur Linker**,
Hagen i. W. Zweite, völlig umgearbeitete und verbesserte Auflage. Mit 380
in den Text gedruckten Figuren. In Leinwand gebunden Preis M. 12.—.

**Elektrische und magnetische Messungen und Meßinstru-
mente.** Von **H. S. Hallo** und **H. W. Land**. Eine freie Bearbeitung und
Ergänzung des holländischen Werkes „Magnetische en Elektrische Metingen“
von **G. J. van Swaay**, Professor an der technischen Hochschule zu Delft. Mit
343 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 15.—.

**Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen an elek-
trischen Starkstromleitungen.** Von **F. Charles Raphael**. Auto-
risierte deutsche Bearbeitung von Dr. **Richard Apt**. Zweite, verbesserte
Auflage. Mit 122 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 6.—.

Messungen an elektrischen Maschinen. Apparate, Instrumente,
Methoden, Schaltungen. Von **R. Krause**, Ingenieur. Zweite, verbesserte
Auflage. Mit 172 Textfiguren. In Leinwand gebunden Preis M. 5.—.

Handbuch der elektrischen Beleuchtung. Bearbeitet von Ober-
ingenieur **J. Herzog** und Professor **Cl. Feldmann**. Dritte, verbesserte Auf-
lage. Mit 707 Figuren. In Leinwand gebunden Preis M. 20.—.

Grundzüge der Beleuchtungstechnik. Von Dr.-Ing. **L. Bloch**, In-
genieur der Berliner Elektrizitätswerke. Mit 41 Textfiguren.
Preis M. 4.—; in Leinwand gebunden M. 5.—.

Elektrotechnische Winke für Architekten und Hausbesitzer.
Von Dr.-Ing. **L. Bloch** und **R. Zaudy**. Mit 99 in den Text gedruckten Figuren.
In Leinwand gebunden Preis M. 2.80.

**Herstellung und Instandhaltung elektrischer Licht- und
Kraftanlagen.** Ein Leitfaden auch für Nichttechniker unter Mitwirkung
von **Gottlob Lux** und Dr. **C. Michalke** verfaßt und herausgegeben von **S. Frhr.
v. Gaisberg**. Fünfte, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 56 Text-
figuren. In Leinwand gebunden Preis M. 2.40.

Zu beziehen durch jede Buchhandlung.