

Die elektrische Kraftübertragung

Von

Dipl.-Ing. **Herbert Kyser**
Oberbaurat

Erster Band

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

Dritte

vollständig umgearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 440 Abbildungen, 33 Zahlentafeln, 7 ein-
farbigen u. einer mehrfarbigen Tafel



Berlin
Verlag von **Julius Springer**
1930

ISBN 978-3-642-90005-1 ISBN 978-3-642-91862-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-91862-9

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

Copyright 1930 by Julius Springer in Berlin.

Softcover reprint of the hardcover 3rd edition 1930

Vorwort.

Die dritte Auflage der „Elektrischen Kraftübertragung“, die mit diesem ersten Bande in vollständiger Neubearbeitung herausgegeben wird, zeigt eine grundsätzliche Verschiedenheit in der Stoffbehandlung von den ersten Auflagen. Überall dort, wo auf die Erfahrungen des Betriebes, in erster Linie bei Neuentwürfen Rücksicht genommen werden muß, sind diese Erfahrungen und aus ihnen die Forderungen des Betriebes zum Ausgangspunkt der Stoffbehandlung gemacht worden. Die Eingliederung des Elektroingenieurs in weitestem Maße in den Betrieb und die unmittelbare Auswertung aller Erfahrungen an dieser Stelle haben die Entwurfsbearbeitung in den Büros der Elektrizitätsfirmen auf eine andere Grundlage gestellt. Beiden — dem Betriebs- und dem Entwurfsingenieur — soll daher die Neuauflage dienen. Im einzelnen kennzeichnet die Einleitung die erweiterten Aufgaben, die sich der Verfasser bei der Bearbeitung der dritten Auflage gestellt hat.

Mit dem Wunsche, daß auch diese Neuauflage die gleiche freundliche und interessierte Aufnahme in den Kreisen der Fachwelt und der Studierenden finden möge, wie bisher, verbindet der Verfasser den Dank an seine Fachkollegen, die ihm in den letzten Jahren Anregungen, Hinweise und auch Berichtigungen haben zugehen lassen, an die Elektrizitätsfirmen für die Überlassung von Bilddarstellungen und an die Verlagsbuchhandlung für die schwierige Arbeit der Drucklegung.

Weimar, im April 1930.

Kyser.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung.	Seite 1
---------------------	------------

Erster Abschnitt.

Die Motoren.

A. Die Gleichstrommotoren.	3—51
1. Die Arbeitsweise der Gleichstrommotoren im allgemeinen	3
a) Grundgleichungen	3
b) Wendepole und Kompensationswicklung.	5
2. Der Gleichstrom-Hauptschlußmotor	8
3. Die Regelung des Gleichstrom-Hauptschlußmotors	14
a) Der Drehrichtungswechsel	15
b) Die Regelung der Drehzahl im allgemeinen	16
c) Das Anlassen	17
d) Die Reihen-Parallelschaltung	20
e) Das Zusammenarbeiten von zwei Motoren.	22
f) Die Regelung durch Änderung des wirksamen Kraftflusses	24
g) Die elektrische Bremsung	24
4. Der Gleichstrom-Nebenschlußmotor	26
5. Die Regelung des Gleichstrom-Nebenschlußmotors	29
a) Der Drehrichtungswechsel	29
b) Die Regelung der Drehzahl im allgemeinen	30
c) Das Anlassen	31
d) Die Änderung der Drehzahl durch Änderung der induzierten EMK Die Ward-Leonard-Schaltung S. 33. — Die Zu- und Gegen- schaltung S. 35. — Die Akkumulatorenbatterie S. 37.	33
e) Die Änderung der Drehzahl durch Änderung der Erregung (des Kraftflusses Φ)	37
f) Das Zusammenarbeiten mehrerer Motoren	39
g) Die elektrische Bremsung	40
6. Der Gleichstrom-Doppelschlußmotor	42
7. Die Regelung des Gleichstrom-Doppelschlußmotors	43
8. Die Schalt-, Sicherungs- und Meßgeräte	44
B. Die Ein- und Mehrphasen-Wechselstrom-Induktionsmoto- ren	52—125
9. Der Ein- und Mehrphasen-Wechselstrommotor im allgemeinen	52
10. Der asynchrone Drehstrom-Induktionsmotor	53
11. Die Regelung des asynchronen Drehstrommotors	65
a) Der Drehrichtungswechsel	65
b) Die Regelung der Drehzahl im allgemeinen	66
c) Das Anlaufmoment	66
d) Der Schleifringläufermotor und sein Anlassen	68
e) Der Kurzschlußläufermotor und sein Anlassen	72
VDE-Bestimmungen S. 73. — Stern-Dreieckschaltung S. 76. — Der Doppelstab- oder Doppelkäfigmotor S. 79. — Der Anlaßtrans- formator S. 82.	
f) Das Anlassen durch Änderung der Frequenz	83
g) Die Regelung der Drehzahl durch Änderung der Schlüpfung	84
h) Die Regelung der Drehzahl durch Änderung der Polzahl	85

	Seite
i) Die Kaskadenschaltung	90
k) Die Regelung der Drehzahl durch besondere Regelsätze	95
1. Drehstromkaskade mit Hintermotor S. 96. — 2. Drehstrom-Gleichstromkaskade mit Hintermotor S. 97. — 3. Kaskade mit Umformer S. 99. — 4. Drehstrom-Nebenschlußkaskade S. 100.	
l) Die Auswahl eines Regelsatzes	102
m) Die elektrische Bremsung	103
n) Die besondere Leistungsfaktorverbesserung durch den Drehstrom-Asynchronmotor	105
1. Der kompensierte Drehstromasynchronmotor im allgemeinen S. 105. — 2. Der kompensierte Drehstrom-Asynchronmotor mit eigenerregter Erregermaschine S. 108. — 3. Der kompensierte Drehstrom-Asynchronmotor mit fremderregter Erregermaschine S. 110. — 4. Der kompensierte Drehstrom-Asynchronmotor mit Selbsterregung S. 110. — 5. Der synchronisierte Drehstrom-Asynchronmotor S. 114. — 6. Der Kondensator zur Leistungsverbesserung S. 116. — 7. Wirtschaftliche Untersuchungen über die Leistungsfaktorverbesserung S. 117.	
12. Der asynchrone Einphasen-Induktionsmotor	123
13. Das Anlassen und die Regelung des asynchronen Einphasenmotors	123
C. Die Ein- und Mehrphasen-Wechselstrom-Kollektorenmotoren	125—150
14. Der Einphasen-Kollektormotor im allgemeinen	125
15. Der Wechselstrom-Reihenschlußmotor	126
16. Die Regelung des Wechselstrom-Reihenschlußmotors	131
17. Der Repulsionsmotor	132
18. Die Regelung des Repulsionsmotors	135
a) Das Anlassen und die Reglung.	135
b) Der Doppelrepulsionsmotor	136
19. Der Repulsions-Induktionsmotor	137
20. Die Regelung des Repulsions-Induktionsmotors	138
21. Der Drehstrom-Kollektormotor im allgemeinen	140
22. Der Drehstrom-Kollektormotor mit Hauptschlußeigenschaft (Reihenschlußmotor) und seine Regelung	140
23. Der Drehstrom-Kollektormotor mit Nebenschlußeigenschaft (Nebenschlußmotor) und seine Regelung	145
24. Die Schalt-, Sicherungs- und Meßgeräte	147

Zweiter Abschnitt.

Die Umformer.

25. Der Zweck der Umformung und die Einteilung der Umformer	151
D. Der Motorgenerator	155—180
26. Der Motorgenerator im allgemeinen	155
27. Der Synchron-Motorgenerator	159
a) Der Drehstrom-Synchronmotor	159
b) Das Anlassen	166
1. Der selbstanlaufende Synchronmotor S. 167. — 2. Die eigene Erregermaschine als Anwurfsmotor S. 168. — 3. Der Gleichstromgenerator als Anwurfsmotor S. 169. — 4. Der Anwurf durch einen besonderen Asynchronmotor S. 170.	
c) Der Gleichstromgenerator	171
28. Der asynchrone Motorgenerator	172
29. Die Schalt- und Meßgeräte	174
a) Der Synchron-Motorgenerator	174
b) Der asynchrone Motorgenerator	178

	Seite
E. Der Einankerumformer	180—204
30. Der Einankerumformer im allgemeinen	180
31. Die Erregung und die Spannungsregelung	186
a) Die Erregung.	186
b) Die Spannungsregelung mittels Drosselspulen und Streutransformatoren	187
c) Die Spannungsregelung durch Änderung der Transformatorunterspannung	190
32. Die Arbeitsweise des Einankerumformers	191
a) Die Drehstrom-Gleichstromumformung	192
Betriebeigenschaften und Schaltgeräte S. 196.	
b) Die Gleichstrom-Drehstromumformung	201
c) Die Wechselstrom-Gleichstrom- und Gleichstrom-Wechselstromumformung.	203
d) Der Doppelstromgenerator	204
e) Der Parallellauf des Einankerumformers	204
F. Der Kaskadenumformer	205—212
33. Der Kaskadenumformer im allgemeinen	205
34. Die Arbeitsweise des Kaskadenumformers	207
a) Die Drehzahl und die Spannungsverhältnisse	207
b) Das Anlassen	209
c) Die Spannungsregelung	210
d) Die Verwendung des Kaskadenumformers	211
G. Der Gleichrichter	212—255
35. Wirkungsweise und Betriebseigenschaften im allgemeinen	212
a) Physikalisches	212
b) Die Strom- und Spannungsverhältnisse	215
c) Spannungsabfall und Wirkungsgrad.	217
d) Die Transformatorschaltung und -ausführung	219
e) Der Leistungsfaktor	220
f) Sonstige Betriebseigenschaften	222
36. Die Spannungsregelung und die Spannungsteilung für Dreileiteranlagen	226
37. Die Berechnung von Gleichrichteranlagen	228
38. Die Schalt- und Schutzgeräte	230
39. Der Glasgleichrichter und seine Schaltanlage.	232
Die Schaltanlage S. 234. — Die Anodendrosselspule S. 237. — Die Glättungsdrosselspule S. 237.	
40. Der Eisengleichrichter und seine Schaltanlage	237
a) Der Aufbau	237
b) Die Zündung und Erregung	241
c) Die Kühlung	243
d) Das Schaltbild und der Aufbau der Schaltanlage	245
41. Die selbsttätig arbeitende, bedienungslose Gleichrichteranlage	247
42. Die ferngesteuerte und fernüberwachte Gleichrichteranlage	249
43. Die betrieblichen Vorteile der Gleichrichter	251
44. Betriebs- und Wirtschaftsvergleich der verschiedenen Umformungsarten.	251
H. Der Frequenzumformer	255—265
a) Die Betriebsverhältnisse	255
b) Der Synchron-Synchron-Umformer	257
c) Der Asynchron-Synchron-Umformer	260
J. Spannungswandlung bei Gleichstrom	265—267
a) Motorgenerator	265
b) Teilweise Spannungswandlung	266

Dritter Abschnitt.

Die Transformatoren.

	Seite
45. Die Arbeitsweise des Transformators (Umspanners) im allgemeinen	268
46. Allgemeine Gesichtspunkte für die Bestimmung der Transformatorleistung	275
47. Belastung, Überlastung, Temperatur und Erwärmung	278
48. Kurzschlußspannung, Spannungsänderung und Wirkungsgrad	281
49. Die Schaltung der Transformatorwicklungen im allgemeinen (innere Schaltung)	290
a) Der Einphasentransformator	290
b) Der Zweiphasentransformator	291
c) Der Dreiphasen- oder Drehstromtransformator	292
d) Das Parallelarbeiten	300
e) Dreiwicklungstransformatoren	304
50. Die Bauart der Transformatoren im allgemeinen	309
a) Mantel- und Kerntransformatoren	309
b) Der konstruktive Aufbau	311
51. Die Trockentransformatoren	319
52. Die Öltransformatoren	321
a) Das Öl	322
b) Die Kühlung der Öltransformatoren	326
c) Prüf- und Meßeinrichtungen	342
53. Die Wärmeentwicklung und Wärmebeseitigung in Transformatorenräumen	344
a) Die Wärmeentwicklung	345
b) Die Raumtemperatur	350
c) Die natürliche Wärmebeseitigung	352
d) Die Bauausführung der Lüftungsanlage	359
e) Die zusätzliche Wärmebeseitigung durch Lüfter	362
54. Gebräuchliche Sonderschaltungen von Transformatoren (äußere Schaltung)	370
a) Die Zweiphasen-Dreiphasen-Umwandlung	370
b) Der Spartransformator	373
c) Schaltung zur Verminderung der Transformator-Leerlaufverluste	375
d) Die Benutzung von Einphasentransformatoren in Drehstromanlagen	377
55. Die Spannungsregelung	379
a) Die Spannungsregelung im allgemeinen	379
b) Die Spannungsregelung ohne Last	381
c) Die Spannungsregelung unter Last	383
1. Der regelbare Leistungstransformator S. 385. — 2. Der reine Zusatztransformator S. 388. Zu- und Gegenschaltung S. 390. — 3. Der Zusatztransformator mit festen Vorstufen S. 392. — 4. Der drehbare Zusatztransformator (Drehtransformator, Induktions- oder Potentialregler) S. 392. — 5. Der Schubtransformator S. 403. — 6. Die synchrone und asynchrone Blindleistungsmaschine S. 405.	
K. Schaltbild und Aufbau vollständiger Transformatoranlagen	407—479
56. Der Entwurf des Schaltbildes	407
a) Allgemeine Regeln	407
b) Das Schaltbild	409
c) Transformatorenwerk mit einer Speiseleitung	419
d) Transformatorenwerk mit zwei Speiseleitungen	421
e) Transformatorenwerk als Durchgangsanlage für einseitige Speisung	422
f) Transformatorenwerk als Durchgangsanlage in einer Ringleitung oder für zweiseitige Speisung	424
g) Transformatorenwerk mit Einphasentransformatoren in Drehstromschaltung	425

	Seite
57. Die Schaltgeräte	427
a) Die Trennschalter (Trennmesser)	427
b) Sicherungen und Schalter	431
c) Die Meßgeräte	434
d) Der Überspannungsschutz	436
58. Der Aufbau der Schaltanlage und die Aufstellung der Transformatoren	440
a) Allgemeine Gesichtspunkte.	440
b) Gesamtanlage im geschlossenen Gebäude mit Abtrennung der Öl enthaltenden Einrichtungen von den übrigen Teilen der Anlage (Kammerbau)	449
c) Hallenbau	452
d) Gesamtanlage im geschlossenen Gebäude ohne Abtrennung einzel- ner Anlagenteile	454
e) Schaltanlage im geschlossenen Gebäude, Aufstellung der Trans- formatoren im Freien	455
f) Die Freiluftausführung	456
g) Anlagen für Mittelspannungen	463
h) Kleine Einzeltransformatoren	466
i) Bautechnische Einzelheiten	469
k) Schaltwärterwohnhäuser	478
L. Ausgeführte Transformatorenanlagen	479—532
59. Transformatorenwerke für Fabriken und Überlandanlagen	479
a) Fabrikanlage	479
b) Transformatorenwerke für Überlandanlagen	482
60. Transformatorenwerke innerhalb großer Städte	485
a) Oberirdische Aufstellung der Transformatoren	485
b) Unterirdische Aufstellung der Transformatoren	486
61. Masttransformatoren	488
a) Allgemeines über die Ausführung	488
b) Die Schaltung	489
c) Ausgeführte Anlagen	491
62. Fahrbare Transformatorenanlagen	494
63. Große Transformatorenanlagen	497
a) Die 100-kV-Zuführung	498
b) Die 100-kV-Leitung	499
c) Die Aufgaben des Werkes	501
d) Das Schaltbild	501
e) Die 100- und 50-kV-Ölschalter und ihre Antriebe	508
f) Die Trennschalter mit ihren Antrieben	510
g) Die Meßwandler	512
h) Der bauliche Teil und der elektrische Aufbau	513
i) Die Transformatoren, ihre Regelung und ihr Einbau	523
k) Die Preßluftkühlung	525
l) Die Spannungsregelung	525
m) Schutzlampen (Warnlampen)	529
n) Schaltwärterwohnhäuser	530
o) Schlußbemerkungen	532
Sachverzeichnis	533

VDE-Bestimmungen (Vorschriften, Regeln, Normen und Leitsätze), die für den 1. Band besonders beachtlich sind.

- Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die **Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V**, V.E.S. 1./1930.
- Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die **Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber**, V.E.S. 2./1930.
- Vorschriften nebst Ausführungsregeln für den Betrieb von **Starkstromanlagen**, V.B.S./1929.
- Vorschriften für die Ausführung **schlagwettergeschützter elektrischer Maschinen, Transformatoren und Geräte.**
- Elektrische Anlagen in der **Landwirtschaft.**
- Leitsätze für **Schutzerdungen in Hochspannungsanlagen.**
- Leitsätze für **Erdung und Nullung in Niederspannungsanlagen.**
- Leitsätze für den Schutz elektrischer Anlagen gegen **Überspannungen.**
- Leitsätze betreffend **Anfressungsgefährdung des blanken Nulleiters** von Gleichstrom-Dreileiteranlagen.
- Kupfernormen.**
- Vorschriften für die Prüfung von **Eisenblechen.**
- Vorschriften für die Prüfung elektrischer **Isolierstoffe.**
- Leitsätze für die Bestimmung **elektrischer Eigenschaften von festen Isolierstoffen.**
- Leitsätze für die Prüfung von **Vergußmassen für Geräte unter 1000 V Nennspannung.**
- Vorschriften für **Transformatoren- und Schalteröle.**
- Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen **Maschinen R.E.M./1930.**
- Regeln für die Bewertung und Prüfung von **Transformatoren R.E.T./1930.**
- Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen **Maschinen und Transformatoren auf Bahn- und anderen Fahrzeugen R.E.B./1930.**
- Regeln für die Bewertung und Prüfung von **Anlassern und Steuergeräten R.E.A./1928.**
- Regeln für die Bewertung und Prüfung von **Steuergeräten, Widerstandsgeräten und Bremslüftern für aussetzenden Betrieb R.A.B./1927.**
- Normen für die Bezeichnung von **Klemmen** bei Maschinen, Anlassern, Reglern und Transformatoren.
- Normalbedingungen für den **Anschluß von Motoren an öffentliche Elektrizitätswerke.**
- Regeln für **Meßgeräte.**
- Regeln für die Bewertung und Prüfung von **Meßwandlern.**
- Regeln für **Elektrizitätszähler R.E.Z./1927.**
- Leitsätze für die Errichtung von **Fahrleitungen für Hebezeuge und Transportgeräte.**
- Vorschriften, Regeln und Normen für die Konstruktion und Prüfung von **Installationsmaterial bis 750 V Nennspannung K.P.I./1928.**
- Regeln für die Konstruktion, Prüfung und Verwendung von **Schaltgeräten bis 500 V Wechselfspannung und 3000 V Gleichspannung R.E.S./1928.**
- Leitsätze für **Motorschutzschalter mit thermisch-verzögerter Überstromauslösung.**
- Regeln für die Konstruktion, Prüfung und Verwendung von **Wechselstrom-Hochspannungsgeräten für Schaltanlagen R.E.H./1929.**
- Leitsätze für die Prüfung von **Isolatoren aus keramischen Werkstoffen für Spannungen von 1000 V an.**
- Leitsätze für die Prüfung von **Hochspannungsisolatoren mit Spannungsstößen.**
- Normen für häufig gebrauchte **Warnungstafeln.** [Nähe.]
- Leitsätze für die **Bekämpfung von Bränden** in elektrischen Anlagen und in deren Anleitung zur ersten **Hilfeleistung bei Unfällen** im elektrischen Betriebe.
- Bestimmungen über die **Beglaubigung von Elektrizitätszählern.**
- Bestimmungen über die **Beglaubigung von Meßwandlern.**
- Formelzeichen, Einheitzeichen und mathematische Zeichen des **AEF.**

Zusammenstellung der Zahlentafeln.

	Seite
1. Bedingungen für Schmelzsicherungen nach den VDE-Vorschriften	45
2. Vergleichende Zusammenstellung der Verluste und Leistungsfaktoren für Regelung des Drehstrom-Asynchronmotors mit Schleifringanker und Läuferwiderstand gegenüber Polumschaltung	89
3. Strom und Drehmoment beim polumschaltbaren Drehstrom-Asynchronmotor	90
4. Werte für $\cos \varphi$, $\sin \varphi$ und $\tan \varphi$	119
5. Wirtschaftlicher Vergleich für die Leistungsfaktorverbesserung durch verschiedene Drehstrommotoren und Kondensatorbatterie	122
6. Wirkstromverlust, Blindstromverlust und Gesamtverlust bei verschiedenen Leistungsfaktoren	162
7. Spannungsverhältnisse beim Einankerumformer	182
8. Stromverhältnisse beim Einankerumformer	183
9. Leistungsverhältnisse beim Einankerumformer	183
10. Wirkungsgradvergleich für Motorgenerator und Einankerumformer	184
11. Wirkungsgrade, Gewichte und Bodenflächen von 25 und 60 Perioden Drehstrom-Gleichstromumformern mit einem Spannungsbereiche von 240 bis 300 V bei einer mittleren Gleichstromspannung von 275 V	185
12. Stromverhältnisse beim Gleichrichter verschiedener Phasenzahl	215
13. Verzerrungs- oder Belastungswert einer Gleichrichteranlage bei verschiedener Transformatorschaltung und sekundärer Phasenzahl	222
14. Zusammenstellung der elektrischen und mechanischen Werte für verschiedene Ausführungen eines Drehstrom-Gleichstrom-Umformers	251
15. Transformatorleistung in Abhängigkeit von der Frequenz	273
16. Zulässige Überlastung für Öltransformatoren mit natürlicher Luftkühlung bei einer maximalen Lufttemperatur von $+35^{\circ}\text{C}$	280
17. Vergleichende Zusammenstellung der technischen Daten verschiedener Drehstrom-Öltransformatoren mit außenliegender Wasserkühlung	288
18. Transformator-Klemmenanschlüsse für den Parallellauf verschiedener Schaltgruppen	303
19. Vergleich zwischen Mantel- und Kerntransformator	310
20. Vergleich zwischen einem Trocken- und einem Öltransformator	323
21. Änderung der Öldurchschlagfestigkeit bei verschiedenem Wassergehalt	324
22. Vergleich zwischen einem Drehstromtransformator mit Selbstlüftung und mit Wasserkühlung bei innenliegender Kühlschlange	335
23. Zusammenstellung der Kühlformen, ihre Anwendungsgebiete und Vorteile	343
24. Wärmedurchlässigkeitswerte für Luft an Luft bei verschiedenen Baustoffen	349
25. Rechnungstafel für $1+\alpha \cdot t$	350
26. Reibungswerte gemauerter Kanäle bei verschiedenem Umfange	357
27. Vergleich zwischen Drehstrom- und Einphasentransformatoren	378
28. Vergleich zwischen Transformatorenwerken verschiedener Bauform	465
29. \sqrt{H} -Anteile der Bauhandwerkerarbeiten an der Gesamtsumme des baulichen Teiles verschiedener Transformatorenwerke	477
30. \sqrt{H} -Anteile der einzelnen Bauhandwerkerarbeiten an Wohnhäusern	479
31. Die Isolation der elektrischen Einbauten eines großen Transformatorenwerkes	499
32. Vergleich zwischen Hallenbau und Kammerbau bei Ein- und Doppelsammelschienen	504
33. Einzelbaukosten eines Transformatorenwerkes	530

Zusammenstellung der Bildtafeln.

	Seite
I. Schaltbild für Synchron-Motorgeneratoren	174
II. Schaltbild für die elektrische Anlage eines Industrierwerkes	178
III. Bauformen von Freiluftanlagen (Stockwerksbau)	459
IV. Bauformen von Freiluftanlagen (Flachbau)	459
V. Bauformen von Freiluftanlagen (Flachbau)	459
VI. Schaltanlage für einen Industrieanschluß	482
VII. Vergleich verschiedener Bauformen für das 100 kV-Transformatorenwerk im 63. Kapitel	504

Berichtigung.

Auf Seite 302 sind die Abbildungen 227 und 228 vertauscht.
Für die Benutzung des Textes muß also die erste Abbildung die
Nr. 228, die zweite die Nr. 227 erhalten.

Kyser, Kraftübertragung I, 3. Aufl.

Einleitung.

Die elektrische Kraftübertragung hat in den letzten zehn Jahren eine Entwicklung genommen, die den besten Beweis dafür liefert, wie sehr sich das gesamte Wirtschaftsleben auf die Benützung des elektrischen Stromes in jeglicher Form und für alle Zwecke einstellt. Wenn gleich daraus immermehr die zwingende Notwendigkeit zutage getreten ist, daß sich der Elektroingenieur auf diesem wohl am weitesten ausgedehnten Arbeitsgebiete nur Sonderzweigen zuwenden kann, weil es fast zur Unmöglichkeit geworden ist, die gesamte Starkstromtechnik mit allen ständig fortschreitenden Entwicklungen auf den Einzelgebieten zu beherrschen, so macht hiervon eine Ausnahme der Ingenieur, der an verantwortungsvoller Stelle im Betriebe steht gleichgültig, ob der Betrieb eine Anlage für Stromerzeugung und Stromverwertung oder nur für eines von beiden umfaßt. Als Anlage im ersteren Sinne ist ein Industrierwerk mit Selbsterzeugung (Eigenanlage) anzusehen, im zweiten Sinne entweder nur die Stromerzeugung oder nur die Stromverwertung, also Fremdstromerzeugung bzw. Fremdstromverwertung. Jede Neuanlage, jede Erweiterung, jede Änderung im bisherigen Zustande der elektrischen Einrichtungen bedingt eingehendes Studium aller in Frage kommenden Einzelheiten, um das technisch Beste in wirtschaftlich und betriebstechnisch günstigster Form zu finden und allen Betriebseigenarten zu entsprechen. Die Fülle der Ausführungsmöglichkeiten, die sich in den Angeboten der in Frage kommenden Lieferfirmen widerspiegelt, macht dem Betriebsingenieur die Auswahl oft sehr schwer, und er wird nach einer Unterstützung suchen müssen, die es ihm ermöglicht, kurz tunlichst alle Gesichtspunkte allgemeinerer oder auch besonderer Art kennenzulernen, um seinen Entschlüssen eine sichere Grundlage zu geben. Andererseits wird der entwerfende Ingenieur bei seiner Entwurfsbearbeitung auf eine Reihe von Fragen stoßen, die ihm nur der Betrieb beantworten kann. Werden dabei nicht alle, auch die nur mittelbar im Zusammenhange stehenden Einzelheiten geklärt, so können Unvollständigkeiten entstehen, die später oft unangenehm empfunden werden. Es bedarf daher nach beiden Richtungen einer Unterstützung, die — und nur diese — das vorliegende Werk geben soll. Auf den folgenden I. Abschnitt bezogen bedeutet das, daß der Betriebsingenieur hinsichtlich der Motoren eine kurze Übersicht über deren Arbeitsweise und besondere Betriebseigenschaften, der entwerfende Ingenieur über Betriebsforderungen gewinnen soll. Es kann und soll nicht Aufgabe der Behandlung der einzelnen Stoffgebiete der „elektrischen Kraftübertragung“ sein, Konstruktionseinzelheiten, Sonderausführungen, Patente u. dgl. zu beschreiben. Solche Angaben

machen die Lieferfirmen in großem und für die Beurteilung ausreichendem Maße. An einigen Beispielen soll gezeigt werden, welcher Grundgedanke zum Aufbau dieses Werkes schon immer und in besonders betonter Form zu dieser Neubearbeitung geführt hat.

Ein industrielles Werk entstehe neu und bedarf elektrischer Energie für den Arbeitsmaschinenantrieb. Welche Stromart und Spannung ist zu wählen nach den Bedingungen der Arbeitsmaschinen; welche Arbeitsweise zeigen die Gleich- bzw. Wechselstrommotoren, erscheint es vorteilhafter, sich an ein benachbartes Überlandwerk anzuschließen, in welcher Weise wirken sich wirtschaftlich die Anschlußbedingungen und betrieblich die Stromlieferung an sich mit wenn auch selten, so doch nicht immer zu vermeidenden Schwankungen, gelegentlich auch einer Stromunterbrechung aus? Ist trotz des Fremdstrombezuges mit hochgespanntem Drehstrom für die Arbeitsmaschinenantriebe aus besonderen Betriebsbedingungen heraus Gleichstrom zu wählen und welche Umformergattung ist dann die zweckmäßigste? Andererseits wie wirken sich Laststöße der Industrierwerke auf die Eigenerzeugung oder die Anlagen der Fremdstromlieferung aus und welche Mittel gestatten dann Vermeidung von Betriebsbeeinflussungen?

Oder nach welchen Gesichtspunkten sind die Kraftwerks- und Transformatorenwerksanlagen für ein Industrierwerk bzw. ein Stromerzeugungswerk zur Fremdstromlieferung zu wählen, welche Sicherheitseinrichtungen gegen die Übertragung von Betriebsstörungen bzw. deren Begrenzung, Einschränkung oder Auswirkung auf die einzelnen Anlagenteile sind erforderlich, welche Sicherheitseinrichtungen für Überstrom, Überspannung und ähnliches sind zu treffen, wie sind die Leitungen zu berechnen und zu bauen?

Schließlich wie wird die Wirtschaftlichkeit zu beurteilen sein, welche Vergleichsmöglichkeiten sind heranzuziehen und welche Betriebsbedingungen hat der entwerfende Ingenieur besonders zu beachten?

Diese Beispiele kennzeichnen wohl genügend, daß der Betriebs- und Entwurfsingenieur, dem die Sonderingenieure der Lieferfirmen gegenüberstehen, tatsächlich zwar das interessanteste, wenn auch das schwierigste Arbeitsgebiet der Starkstromtechnik besitzt. Dazu kommt, daß ihm auch das Gebiet des „Schwachstromes“ z. B. in der Meßtechnik und der Fernmeldetechnik nicht unbekannt sein darf.

Nicht zu den Aufgaben z. B. des I. Abschnittes gehört die Behandlung der Aufstellung und der Zusammenfügung des Motors mit der Arbeitsmaschine. Fragen nach dieser Richtung zu beantworten muß den Fachingenieuren überlassen bleiben. Also werden nicht behandelt die Eigenarten der verschiedenen Aufstellungsräume (trocken, explosionsgefährlich, unter Tag usw.), auch nicht die Antriebsmöglichkeiten (wie Riemen, Kupplungen usw.), ferner nicht die Eigenarten der Arbeitsmaschinen selbst, sondern nur die elektrischen Verhältnisse und ihre gegenseitigen Beziehungen. Von der theoretischen Stoffbehandlung ist fast völlig abgesehen worden. Die wenigen Gleichungen sollen nur die Möglichkeit geben, die Betriebseigenschaften leicht zu erkennen.

Die Motoren.

A. Die Gleichstrommotoren.

1. Die Arbeitsweise der Gleichstrommotoren im allgemeinen.

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

Hauptschlußmotoren,
Nebenschlußmotoren,
Doppelschlußmotoren.

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

Der Behandlung der einzelnen Motorgattungen sollen die Grundgleichungen¹ und einige Bemerkungen hinsichtlich der Ausführung vorangestellt werden, die für Gleichstrommotoren allgemeine Gültigkeit haben, und aus denen dann das Hauptmerkmal für die einzelnen Motorschaltungen leicht abgeleitet werden kann. Es bezieht sich das auf das Verhalten von Drehzahl und Drehmoment bzw. Leistung beim Anlaufe, bei Belastungs- und Spannungsschwankungen, bei der Regelung u. dgl.

Bezeichnet:

U die Netzspannung (zugeführte Spannung) in Volt,
 E_a die im Anker induzierte elektromotorische Kraft (EMK) in Volt,
 $I = I_a + I_n$ den aufgenommenen Strom in Ampere,
 I_a Ankerstrom,
 I_n Strom in der Nebenschlußwicklung,
 $R = R_a + R_n + R_n$ den gesamten Motorwiderstand in Ohm,
 R_a Ankerwiderstand,
 R_n Widerstand der Hauptschlußwicklung,
 R_n Widerstand der Nebenschlußwicklung,
 $M_{a,t}$ das theoretische Drehmoment,

¹ Siehe Arnold, E.: Die Gleichstrommaschine. Bd. 1 und 2.

M_a das wirkliche oder Nutzdrehmoment (Nenn Drehmoment),
 Φ den wirksamen Kraftfluß (Kraftlinienmenge) eines Poles,
 n die Drehzahl in der Minute,
 A 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:

$$\left. \begin{aligned} E_a &= U - I_a \cdot R_a \\ &= \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot A \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt.} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Daraus folgt die Drehzahl:

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{A \cdot \Phi} \cdot E_a \\ &= \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{A \cdot \Phi} \cdot [U - I_a \cdot R_a], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

d. h. ganz allgemein: Die Drehzahl eines Gleichstrommotors steht in einem bestimmten Verhältnisse zu der im Anker induzierten EMK und ist abhängig von der Höhe der zugeführten Spannung bzw. dem Widerstande des Ankerstromkreises.

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

$$M_{a,t} = \frac{E_a \cdot I_a}{\omega} = \frac{p}{a} \cdot \frac{A}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I_a \cdot 10^{-8} \text{ Watt}, \quad (3a)$$

oder in mkg/sec ausgedrückt:

$$M_{a,t} = \frac{p}{a} \cdot \frac{A}{2\pi \cdot g} \cdot \Phi \cdot I_a \cdot 10^{-8}, \quad (3b)$$

worin $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$ die Winkelgeschwindigkeit und $g = 9,81$ m/sec die Beschleunigung durch die Erdschwere (Fallbeschleunigung) bedeutet (1 mkg/sec = g Watt).

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

$$n = \frac{60}{2\pi \cdot g} \cdot \frac{U - I_a \cdot R_a}{M_{a,t}} \cdot I_a = 0,9735 \cdot \frac{E_a \cdot I_a}{M_{a,t}} \quad (4)$$

und infolgedessen:

$$M_{a,t} = 0,9735 \frac{E_a \cdot I_a}{n} \text{ mkg.} \quad (5)$$

Das theoretische also größte Drehmoment kann der Motor praktisch nicht entwickeln. Eine Reihe von Verlusten mechanischer, elektrischer

und magnetischer Natur bedingen, daß das wirkliche oder Nutzdrehmoment M_d kleiner ist als das theoretische. Die mechanischen Verluste sind die Folge der Lager-, Luft- und Bürstenreibung, während die elektrischen Verluste durch Stromwärme, Hysterese und Stromwendung und die magnetischen durch Ankerrückwirkung und Wirbelströme hervorgerufen werden. Man bezeichnet das Verhältnis zwischen wirklichem und theoretischem Drehmomente als das Güteverhältnis des Motors, also:

$$g_m = \frac{M_d}{M_{d,t}} < 1,$$

und es ergibt sich mit Gl. (5) das Nutzdrehmoment:

$$M_d = g_m \cdot M_{d,t} = 0,9735 \cdot g_m \frac{E_a \cdot I_a}{n}. \quad (6)$$

Das Drehmoment ist also unabhängig von der zugeführten Spannung, wenn man von dem vernachlässigbaren Einflusse letzterer auf g_m absieht.

Die Nutzleistung (Nennleistung) schließlich, die vom Motor an der Welle abgegeben werden kann, ist:

$$\begin{aligned} N_n &= \frac{U \cdot I \cdot \eta_M}{1000} \text{ kW} \\ &= \frac{U \cdot I \cdot \eta_M}{736} \text{ PS}, \end{aligned} \quad (7)$$

η_M = Wirkungsgrad des Motors,

und die zuzuführende elektrische Leistung:

$$N = \frac{U \cdot I}{1000} \text{ kW}. \quad (8a)$$

Ist die Antriebsleistung für eine Arbeitsmaschine in PS ($N_{\text{PS},A}$) oder in kW ($N_{\text{kW},A}$) bekannt, so ist für die Berechnung des Querschnittes der Zuführungsleitung die zuzuführende elektrische Leistung:

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{N_{\text{PS},A} \cdot 0,736}{\eta_M} \text{ kW} \\ &= \frac{N_{\text{kW},A}}{\eta_M} \text{ kW} \end{aligned} \right\}, \quad (8b)$$

und daraus die Stromstärke:

$$I = \frac{N \cdot 1000}{U} = \frac{N_{\text{kW},A} \cdot 1000}{\eta_M \cdot U} = \frac{N_{\text{PS},A} \cdot 0,736 \cdot 1000}{\eta_M \cdot U}. \quad (8c)$$

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

b) Wendepole und Kompensationswicklung. Das von den stromdurchflossenen Ankerleitern erzeugte Feld bewirkt in der neutralen Zone eine Schwächung und Verzerrung des Magnetfeldes. Man nennt diese Erscheinung die Ankerrückwirkung. Dieselbe beeinträchtigt die funkenfreie Stromwendung unter den Bürsten und zwingt zur Ver-

schiebung der letzteren aus der neutralen Zone. Das auftretende sogenannte „Bürstenfeuer“ schädigt den Zustand der Bürsten und des Stromwenders (Kollektors), zwingt infolgedessen zu häufiger Besichtigung und Instandsetzung und ist für die Wirtschaftlichkeit des Motors von besonderer Bedeutung, begrenzt ferner die Überlastungsfähigkeit

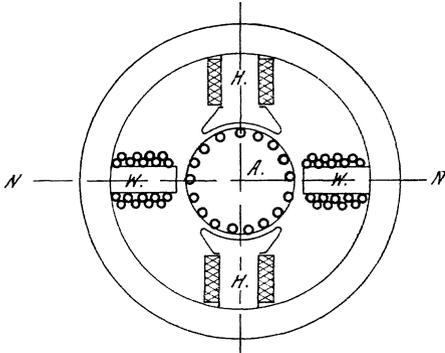


Abb. 1. Motorgehäuse mit Feldmagneten *H.* und Wendepolen *W.*

und wird besonders störend bei schnellaufenden sowie umsteuerbaren Motoren. Das funkenfreie Arbeiten der Stromwendung muß somit unbedingt gefordert werden. Nach den Vorschriften des VDE¹ soll dieses bei jeder Belastung von Leerlauf bis Nennleistung gewährleistet sein.

Zur Beseitigung der Ankerückwirkung werden Wendepole benutzt, das sind Hilfspole in der neutralen Zone (Abb. 1 und 2), die eine vom Ankerstrome durchflossene Wicklung tragen und ein von der

Stärke des Ankerstromes abhängiges Feld als Zusatzfeld zu dem Felde der Hauptpole dergestalt erzeugen, daß der Einfluß der Ankerückwirkung aufgehoben wird. Mit zunehmender Belastung nimmt auch

das Feld der Wendepole an Stärke zu. Neben dieser hat das „Wendefeld“ noch eine zweite Aufgabe. In der neutralen Zone werden die Ankerspulen durch die Bürsten kurzgeschlossen. Die Selbstinduktion in der kurzgeschlossenen Ankerspule hat Funkenbildung unter den Bürsten zur Folge. Also muß das Wendefeld auch eine der Selbstinduktionsspannung entsprechende Wendespannung erzeugen, um die Selbstinduktion in der kurzgeschlossenen Spule aufzuheben.

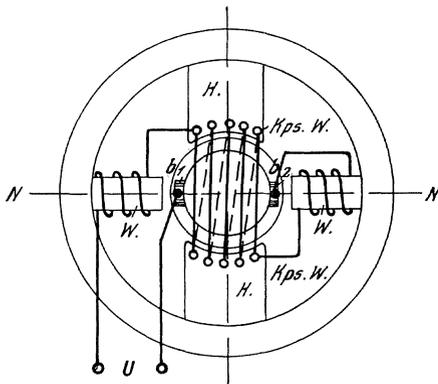


Abb. 2. Schaltung der Wendepol- (*W.*) und Kompensationswicklung (*Kps.W.*).

Die Wendepol-Amperewindungen müssen daher größer sein als die Anker-Amperewindungen. Bei Maschinen mit kleiner Polzahl bis zu etwa 100 kW Leistung genügt die Anwendung solcher Wendepole ohne weitere Hilfsmittel zumeist vollständig, um ein einwandfreies Arbeiten der Stromwendung zu erreichen.

¹ Regeln für die Bewertung und Prüfung elektrischer Maschinen R.E.M 1929.

Bei großen Maschinen wird gegebenenfalls ein Teil der Aufgaben der Wendepole einer zweiten Wicklung, der sogenannten Kompensationswicklung, übertragen. Diese wird entweder gleichmäßig über den ganzen Umfang des Magnetgehäuses verteilt oder nur in den Polschuhen der Magnete untergebracht. In Abb. 2 ist Anordnung und Schaltung beider Wicklungen gezeichnet. Das von der Kompensationswicklung erzeugte Feld wirkt auf das Querfeld der Ankerwicklung in demselben Sinne schwächend bzw. aufhebend wie die Wendepolwicklung auf die Ankerrückwirkung; es ergibt sich daraus, daß die

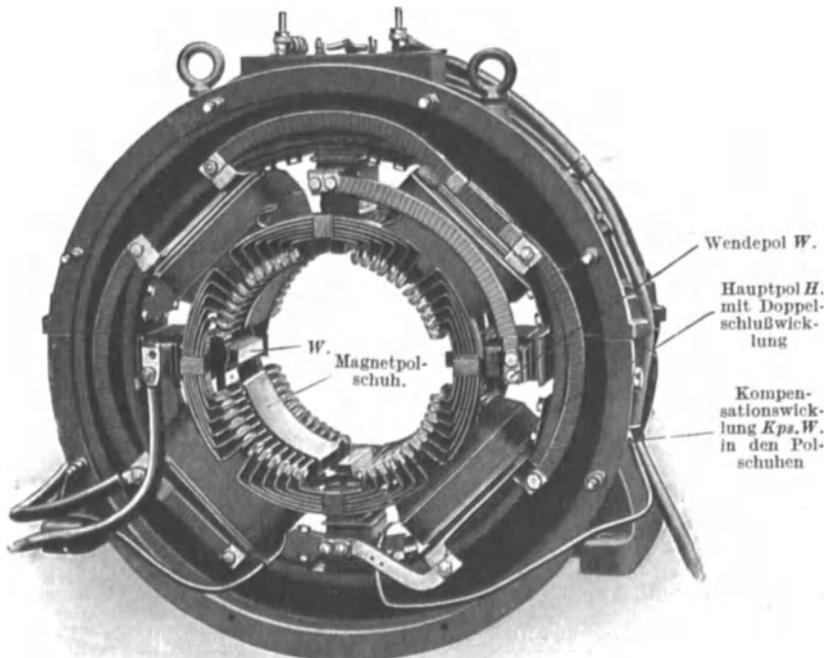


Abb. 3. Magnetgehäuse einer Gleichstrommaschine mit Haupt- und Wendepolen, Doppelschluß- und Kompensationswicklung.

Anker-Amperewindungen nunmehr in ihrer Wirkung aufgehoben werden. Die Wendepolwicklung kann daher kleiner gemacht und der Fehlbetrag als Kompensationswicklung auf die Polschuhe verteilt werden. Elektrisch wird dadurch vorteilhaft noch die Streuung der Wicklungen, die den Wirkungsgrad des Motors beeinträchtigt, verringert.

Abb. 3 zeigt die praktische Ausführung eines Motors. Es ist leicht zu erkennen, daß die Abkühlungsräume zwischen den Wicklungen reichlich ausfallen, die Abkühlungsflächen der Wicklungen und des Gehäuses größer werden und infolgedessen der Luftzutritt zur Abführung der im Betriebe auftretenden Wicklungswärme freier möglich ist.

Durch die Anwendung von Wendepolen und Kompensationswicklung kann die Leistungs- und Überlastungsfähigkeit einer Maschine einmal infolge der besseren Abkühlungsverhältnisse und ferner infolge der Gleichartigkeit des magnetischen Feldes ganz erheblich gesteigert werden. Diese Hilfsmittel werden überall dort erforderlich, wo schwere und unregelmäßige Betriebsverhältnisse mit starken Überlastungen vorliegen. Auch wenn Drehzahländerungen in weiten Grenzen und häufiges Wechseln der Drehrichtung gefordert werden, sind diese besonderen Wicklungen bei allen Gleichstrommotorgattungen anzuwenden also z. B. bei Hebezeugen, Verladeanlagen, Förder- und Bahnmotoren, Werkzeugmaschinen, Walzwerksantrieben u. dgl. Der Betriebsingenieur muß daher für die Auswahl eines Motors möglichst vollständige Angaben über die Arbeitsweise der anzutreibenden Maschine machen, damit der Motor mit allem seinem elektrischen Zubehör zweckentsprechend bestimmt werden kann.

2. Der Gleichstrom-Hauptschlußmotor.

Beim Hauptschlußmotor (Abb. 4) liegen Anker A . und Magnetwicklung $H.W.$ in Reihe miteinander. Daraus folgt, daß die Stärke des Kraftflusses Φ bzw. die Erregung vom Strome $I = I_a$ also von der Belastung des Motors abhängig ist. Die Gl. (1) geht über in die Form:

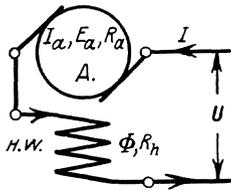


Abb. 4. Stromlauf beim Gleichstrom-Hauptschlußmotor.

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{p}{a} \cdot \frac{A \cdot 10^{-8}}{60}, \\ E_a &= U - I_a(R_a + R_h) = k_1 \cdot n \cdot \Phi, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

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

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

und es ist somit die Drehzahl:

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{A} \cdot \frac{U - I_a(R_a + R_h)}{\Phi} = k_2 \cdot \frac{E_a}{\Phi}, \\ k_2 &= \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{A}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

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

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

$$\left. \begin{aligned} M_a &= k_3 \cdot \Phi \cdot I_a = k_3 \cdot f(I) \cdot I_a, \\ k_3 &= g_m \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{A}{2 \pi \cdot g} \cdot 10^{-8}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

also wächst dasselbe anfangs mit dem Quadrate des Stromes, später allerdings, wenn das Eisen stärker gesättigt ist, etwas langsamer. Bringt

man nach Gl. (6) das Drehmoment in Abhängigkeit zur Drehzahl, so findet man:

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

d. h. das Drehmoment steigt mit der Belastung, jedoch nicht in gleichem, sondern infolge der zunehmenden Verluste in etwas geringerm Maße.

Zusammengefaßt liegt das Hauptmerkmal des Gleichstrom-Hauptschlußmotors darin, daß derselbe mit wachsender Belastung in der Drehzahl ab- und an Drehmoment selbsttätig zunimmt und umgekehrt. Drehzahl und Drehmoment stellen sich also ohne äußeres Zutun nach der jeweiligen Belastung ein, demnach auch im Augenblicke des Anlaufes, so daß das Anlaufmoment (Anfahr-, Anzugsmoment) $M_{a, A}$ groß ist oder, wie weiter unten gezeigt werden wird, auf jeden — selbstverständlich durch die Motorgröße begrenzten — Wert eingestellt werden kann.

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

$$Z = \frac{M_a}{r_a} \text{ kg}, \quad (14)$$

oder ist u das Übersetzungsverhältnis zwischen Motorwelle und Vorgelegewelle also:

$$\begin{aligned} u &= \frac{\text{Umdrehungszahl des Triebes}}{\text{Umdrehungszahl des Zahnrades}} \\ &= \frac{\text{Zähnezahl des Zahnrades}}{\text{Zähnezahl des Triebes}} \\ &= \frac{\text{Umdrehungszahl der Motorwelle}}{\text{Umdrehungszahl der Vorgelegewelle}}, \end{aligned}$$

so ist:

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

η_u = Wirkungsgrad der Übersetzung,

r_s = Halbmesser der Seiltrommel in m,

d_s = Durchmesser der Seiltrommel in m.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Seiltrommel ist dann:

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

Soll der Motor im Vollbetriebe an seiner Welle ein bestimmtes Drehmoment M_a entwickeln, so ist die erforderliche Nutzleistung:

$$N_n = \frac{M_a \cdot \omega}{75} = \frac{g_m}{9,81 \cdot 75 \cdot 60} \cdot \frac{p \cdot A \cdot n}{a} \frac{\Phi \cdot I_a \cdot 10^{-8}}{1000} \text{ kW.} \quad (17a)$$

Bei geradliniger Bewegung einer Last errechnet sich diese Leistung, wenn P in kg die Kraft und v in m/sec die Geschwindigkeit bezeichnet, zu:

$$N_n = \frac{P \cdot v}{102} \simeq \frac{P \cdot v}{100} \text{ kW}, \quad (17b)$$

bei Drehbewegung:

$$N_n = \frac{M_a \cdot n}{973} \simeq \frac{M_a \cdot n}{1000} \text{ kW} \quad (17c)$$

(M_a in mkg).

Die zuzuführende elektrische Leistung beträgt schließlich:

$$N = \frac{N_n}{\eta_M} \text{ kW}. \quad (18)$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen kann vollständig geprüft werden, ob für eine bestimmte elektrisch anzutreibende Maschine der Hauptschlußmotor den verlangten Arbeitsbedingungen genügt.

Alles bisher durch Gleichungen zur Darstellung Gebrachte läßt sich auch in Form von Schaulinien zeigen, die die Betriebskennlinien des Motors genannt werden sollen und aus denen die Abhängigkeiten zwischen n , M_a , E_a , η_M usw. noch einfacher und deutlicher hervorgehen.

Um die Änderung der Drehzahl und des Drehmomentes mit der Belastung bzw. dem Strome I zu zeigen, sind zunächst in Abb. 5 und 6 die diesen entsprechenden Kennlinien dargestellt, während in Abb. 7 alle einem bestimmten Motor zugehörenden Betriebskennlinien zusammengestellt sind. Nicht immer jedoch werden diese Schaulinien, die zur Beurteilung der Arbeitsweise eines Hauptschlußmotors von besonderer Bedeutung und notwendig sind, im ganzen vorhanden sein. Man muß dann die eine aus der anderen entwickeln, und hierzu bieten die elektrischen Verhältnisse ein sehr bequemes Mittel. Bekannt müssen nur sein: die Magnetisierungslinie¹, die Drehzahl bei der praktischen Aufnahme ersterer und der Motorwiderstand $R = R_a + R_h$, wobei jedoch in R_h auch der Übergangswiderstand unter den Bürsten berücksichtigt sein muß.

Die zeichnerische Ermittlung der Drehzahllinie (n Kennlinie in Abb. 5) geschieht auf folgende Weise: In rechtwinkligen Koordinaten, in welchen in Richtung der Ordinate die Spannung E bzw. U und der Kraftfluß Φ , in Richtung der Abszisse die Stromstärke I abgetragen sind, wird die als unveränderlich vorausgesetzte zugeführte Spannung U dargestellt durch eine Gerade, gegen die die im Anker induzierte EMK $E_a = U - I_a (R_a + R_h)$ um einen Winkel α geneigt ist, dessen:

$$\text{tg } \alpha = \frac{I_a (R_a + R_h)}{I_a} = R_a + R_h.$$

Die zwischen den Geraden für U und E_a liegenden Ordinatenabschnitte geben somit den Spannungsverlust im Motor bei bestimmtem Belastungsstrome I an. Die Magnetisierungslinie, die bei einer Dreh-

¹ Die Magnetisierungslinie oder auch Leerlaufkennlinie stellt bei der Bürstenstellung in der neutralen Zone, unveränderter Drehzahl und der Belastung Null die im Anker induzierte EMK in Abhängigkeit vom Erregerstrome dar.

zahl n_1 aufgenommen sei, werde dargestellt durch die Linie Oc . Aus Gl. (11) folgt:

$$n_1 = \frac{E_{a1}}{\Phi_1},$$

oder für jeden anderen Wert:

$$n_2 = \frac{E_{a2}}{\Phi_2},$$

d. h. die Drehzahlen verhalten sich bei einem bestimmten Werte für den Kraftfluß Φ oder den Strom I wie die im Anker induzierten EMKe E_a . Dieses Verhältnis läßt sich zeichnerisch verwerten. Wählt man auf der Abszissenachse einen Punkt O beliebig, verbindet diesen

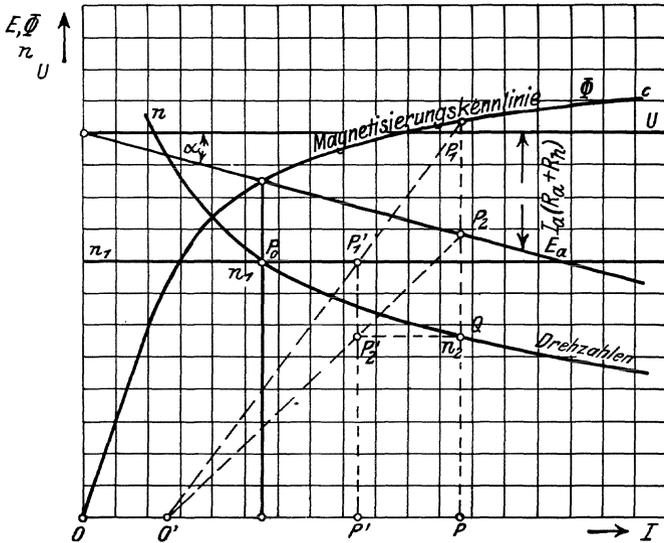


Abb. 5. Drehzahlkennlinie des Gleichstrom-Hauptschlußmotors.

mit den einer beliebigen Stromstärke I — Punkt P auf der Abszissenachse — entsprechenden Punkten P_1 und P_2 auf der Magnetisierungslinie 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, gleichlaufend zur Abszissenachse gelegten Geraden mit $O'P_1$ (Punkt P_1') eine Senkrechte bis zum Schnitt mit $O'P_2$ und überträgt diesen Punkt P_2' gleichlaufend zur Abszissenachse auf die Gerade PP_1 , so ist der gefundene Punkt Q ein Punkt der Drehzahlkennlinie nn . Durch Wiederholung dieses Verfahrens für eine Reihe anderer Punkte der Φ - und E_a -Linie also andere Ströme I kann die nn -Kennlinie vollständig ermittelt werden.

Aus Abb. 5 folgt zum Beweise:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{PP_2}{PP_1} = \frac{P'P_2'}{P'P_1'} = \frac{P'P_2'}{n_1},$$

also:

$$P'P_2' = PQ = n_2.$$

Der Verlauf der Drehzahlkennlinie läßt erkennen, daß n mit wachsender Belastung also zunehmender Stromstärke I abnimmt und bei Entlastung steigt, bis die Drehzahl bei Leerlauf theoretisch unendlich groß wird bzw. praktisch einen Wert erreicht, dem die Baustoffe des Ankers, die Befestigung der Wicklungen usw. nicht mehr gewachsen sind. Man sagt, der Motor „geht durch“. Elektrisch begründet ist diese Erscheinung darin, daß mit abnehmendem Strome die Sättigung der Magnete, wie das auch aus dem Verlaufe der Magnetisierungskennlinie hervorgeht, rasch abnimmt und dadurch dem Ankerfelde mit der Zeit kein genügend starkes Magnetfeld mehr gegenübersteht. Es darf daher ein Hauptschlußmotor niemals völlig ohne Last (entlastet) angelassen bzw. im Leerlauf betrieben oder plötzlich vollständig entlastet werden.

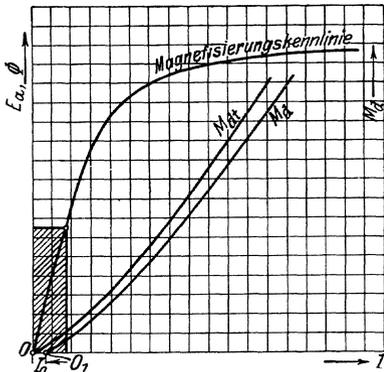


Abb. 6. Drehmomentkennlinie des Gleichstrom-Hauptschlußmotors.

Weiter von besonderer Bedeutung ist die Drehmomentkennlinie, 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:

$$M_a = k_3 \cdot \Phi \cdot I_a$$

also gleich dem Inhalte eines Rechteckes, dessen Seiten Φ und I_a bilden (Abb. 6). Ermittelt man aus dieser Gleichung für verschiedene Punkte der Φ -Kennlinie die Werte, so kann

die M_a -Kennlinie unter Berücksichtigung von k_3 in passendem Maßstabe gezeichnet werden. Die Kennlinie des Drehmomentes M_a beginnt aber nicht im Koordinatenursprunge, sondern in einem Punkte O_1 entsprechend dem im Leerlaufe auszuübenden Drehmomente bei einem Leerlaufstrom I_0 .

In Abb. 7 schließlich sind die Betriebskennlinien für U und E_a , n , M_{at} , M_a und η_M zusammengestellt, die somit eine vollständige Einsicht in die Arbeitsweise des Hauptschlußmotors gestatten.

Dienen die Motoren zum Antriebe von Maschinen, die nur kurzzeitig oder aussetzend arbeiten, d. h. die nicht dauernd mit Vollbelastung im Betriebe sind (Dauerbetrieb), sondern bei denen nach jeder Arbeitszeit eine Ruhepause eintritt (Hebezeuge, Drehscheiben, Spills, Verladebrücken, Koksandrückmaschinen), dann können derartige Motoren mit wesentlich höheren Leistungen beansprucht werden, als für den Dauerbetrieb, weil sie in den Ruhepausen Zeit haben, sich wieder abzukühlen. Jeder Motor erwärmt sich naturgemäß beim Stromdurchgange entsprechend der Belastung und der Betriebszeit und erreicht nach einer bestimmten Zeit eine Temperatur über derjenigen des Kühlmittels, also z. B. der umgebenden Luft, die nach den Regeln des VDE je nach den verwendeten Isolierstoffen eine vorgeschriebene

Höhe nicht überschreiten darf. Der Endzustand ist erreicht, wenn der Motor diese Temperatur im Dauerbetriebe angenommen hat. Ist der Betrieb aussetzend, so wird der Motor in einem nur nach Minuten zählenden Arbeitsabschnitte selbst bei Vollbelastung die höchste Über-temperatur¹ nicht erreichen können, weil inzwischen wieder eine Ruhe-pause eingetreten ist, in der er sich abkühlen kann. Es bauen aus diesem Grunde auch alle Firmen besondere Motoren für aussetzenden Betrieb, um dadurch kleinere, im Gewichte leichtere und damit billigere Ma-schinen für diese Betriebsverhältnisse zu erhalten.

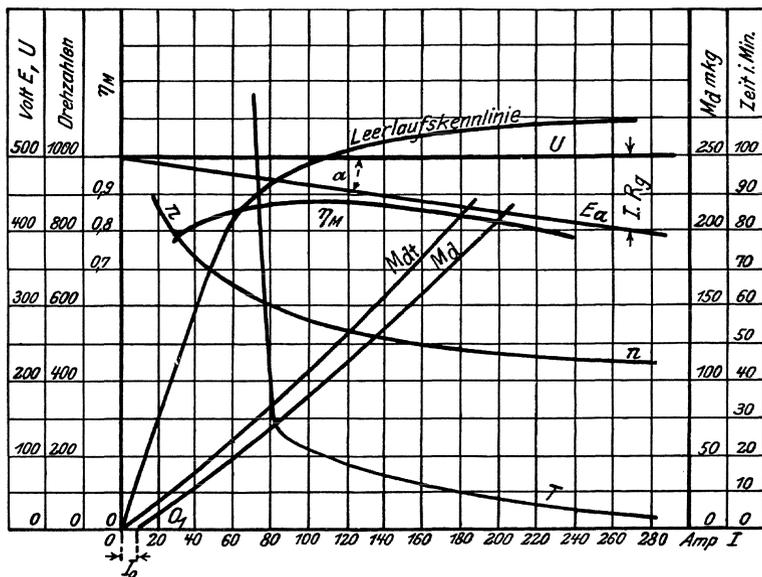


Abb. 7. Betriebskennlinien für den Gleichstrom-Hauptschlußmotor.

Die Belastung kann in solchen Fällen um so größer sein, je länger die Pausen im Vergleich zu den Arbeitszeiten sind, und zwar ist dieselbe dann begrenzt durch die Erwärmung der Wicklungen und des Eisens des Motors, abgesehen vom Feuern der Bürsten auf dem Stromwender, das durch entsprechende Mittel (Wendepole) beseitigt werden kann, und durch die Temperatur des Kühlmittels.

Die R.E.M. 1929 besagen hierzu (§§ 29 und 30):

Kurzzeitiger Betrieb (KB). Beim kurzzeitigen Betrieb (KB) ist die durch Vereinbarung bestimmte Betriebszeit kürzer als die zum Erreichen der Beharrungs-temperatur erforderliche Zeit. Die Betriebspause ist lang genug, um die Abkühlung auf die Temperatur des Kühlmittels zu ermöglichen.

Die Nennleistung (Zeitleistung) muß die vereinbarte Betriebszeit hindurch ab-gegeben werden können, ohne daß die Erwärmung die vorgeschriebenen Grenzen überschreitet. Dabei müssen alle anderen Bestimmungen erfüllt werden.

Bei Wahl der Motorgrößen muß außer der Erwärmung auch die Größe des Anzugsmomentes berücksichtigt werden.

¹ Mit „Über-temperatur“ bezeichnet man die Erhöhung der Temperatur des Motors über diejenige des benutzten Kühlmittels bzw. der umgebenden Luft.

Aussetzender Betrieb (AB). Einschaltzeiten und stromlose Pausen wechseln ab, und die gesamte Spieldauer, die sich aus Einschaltdauer und stromloser Pause zusammensetzt, beträgt höchstens 10 min. Der aussetzende Betrieb wird durch die relative Einschaltdauer gekennzeichnet.

Relative Einschaltdauer ist das Verhältnis von Einschaltdauer zu Spieldauer. Spieldauer ist die Summe von Einschaltdauer und Ausschaltpause.

Als normale Werte der relativen Einschaltdauer gelten 15, 25 und 40 vH.

Die Nennleistung (Aussetzleistung) muß bei regelmäßigem Spiel mit der angegebenen relativen Einschaltdauer beliebig lange abgegeben werden können, ohne daß die Erwärmung die vorgeschriebenen Grenzwerte überschreitet. Dabei müssen alle anderen Bestimmungen erfüllt werden.

Bei unregelmäßig verteilter Einschalt- und Spieldauer ist als relative Einschaltdauer das Verhältnis der Summe der Einschaltsdauer zur Summe der Spieldauern über eine Betriebsperiode (jedoch höchstens 8 h) zu betrachten. Wiederholen sich gleichartige Spiele nach einer bestimmten Zeit, so genügt die Summierung über diese Zeit.

Der aussetzende Betrieb ist meistens auch noch hinsichtlich der Belastung des Motors unregelmäßig. Bei Wahl der Motorgrößen müssen die Einflüsse der wechselnden Drehmomente, der Massenbeschleunigung, der Steuerung und etwa vorhandener Wärmebestrahlung berücksichtigt werden.

Bei vollständig gekapselten, sog. „geschlossenen“ Motoren, bei denen das Motorinnere gegen das Eindringen von Staub, Feuchtigkeit, unreiner Luft usw. durch eine entsprechende Ausbildung der Lagerschilder oder Gehäuse-Seitenverkleidungen geschützt ist, zeigt die Erwärmung naturgemäß einen anderen Verlauf als bei einem offenen oder geschützten Motor, weil die Abführung der im Innern des Motors erzeugten Wärme nicht durch die natürliche Luftbewegung erfolgt, sondern lediglich durch die äußere Abkühlung des Gehäuses vor sich geht, also beschränkt ist.

Um die Erwärmungsverhältnisse eines Motors deutlicher zur Anschauung zu bringen, ist in Abb. 7 auch eine Zeitkennlinie T^1 eingetragen, aus deren Verlauf man sofort erkennen kann, wieviel Minuten ein Motor mit einer bestimmten Stromstärke laufen darf, ohne eine gewisse Erwärmung zu überschreiten.

3. Die Regelung des Gleichstrom-Hauptschlußmotors.

Das hinsichtlich der Regelung des Hauptschlußmotors zu Besprechende erstreckt sich auf die Umkehrung der Drehrichtung, das Anlassen und eine gewollte, besondere Änderung der Drehzahl, sowie

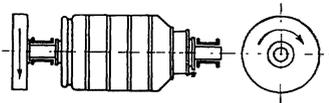


Abb. 8. Rechtslauf eines Motors.

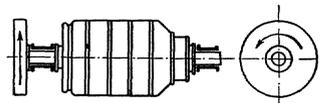


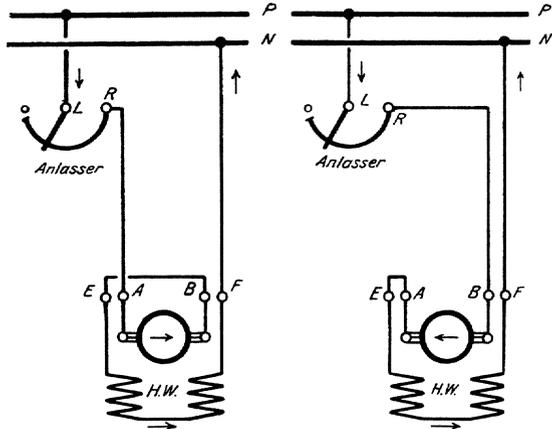
Abb. 9. Linkslauf eines Motors.

das Bremsen. Von den zahlreichen Regelungsarten sollen jedoch nur die in der Praxis häufiger zur Anwendung kommenden behandelt werden.

¹ Näheres über die Berechnung derselben siehe Arnold, E.: Die Gleichstrommaschine und Müller-Mattersdorf: Die Bahnmotoren. — Dr. Kade: Die Vorausberechnung von Erwärmungs-Zeitkurven. Bergmann-Mitt. 1929, H. 4, S. 105.

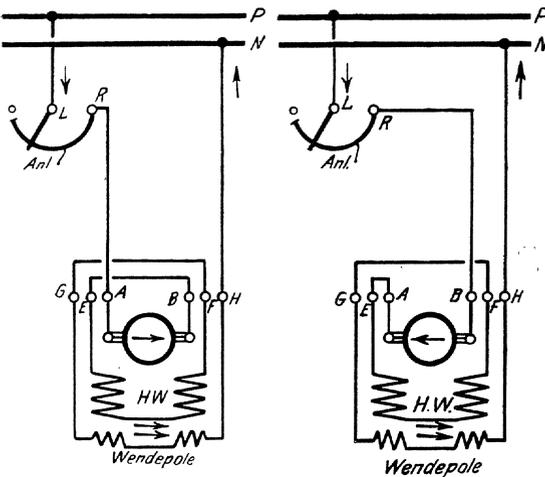
a) **Der Drehrichtungswechsel.** Die Richtung des Ankerumlaufes ist abhängig von der Richtung des Stromes in der Feldwicklung und im Anker. Wird eine dieser geändert, also entweder diejenige in der Magnetwicklung oder diejenige im Anker, dann läuft der Motor in einem dem ursprünglichen entgegengesetzten Drehsinne. Es ist üblich, letzteren auf die Riemenscheibe des Motors gesehen mit „Rechtslauf“ zu bezeichnen, wenn er im Sinne des Uhrzeigers verläuft (Abbild. 8) und mit „Linkslauf“, wenn er entgegengerichtet ist (Abb. 9).

Die Änderung der Stromrichtung in der Magnetwicklung wird für gewöhnlich nicht angewendet; sie ist bei solchen Motoren, die oft und schnell umgesteuert werden müssen, grundsätzlich zu verwerfen, weil die Umkehrung



Rechtslauf eines Gleichstrom-Hauptschlußmotors. Abb. 10.
Linkslauf eines Gleichstrom-Hauptschlußmotors. Abb. 11.

des Magnetfeldes infolge der Selbstinduktion, die beim Schaltvorgang auftritt und vernichtet werden muß, Zeit und elektrische Leistung kostet. Wird der Motor beim Umschalten als Bremse benutzt, worauf weiter unten noch besonders eingegangen wird, dann ist die Umkehrung des Magnetfeldes ebenfalls 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 Abb. 10 bis 13 sind die allgemeinen Schaltungen und in Abb. 14 das vollständige Schaltbild einer Gleichstrom-Hauptschlußmotoranlage mit allen zugehörigen Schalt- und Meßgeräten und einem besonderen Um-



Rechtslauf eines Gleichstrom-Hauptschlußmotors mit Wendepolen. Abb. 12.
Linkslauf eines Gleichstrom-Hauptschlußmotors mit Wendepolen. Abb. 13.

schaltung. In Abb. 10 bis 13 sind die allgemeinen Schaltungen und in Abb. 14 das vollständige Schaltbild einer Gleichstrom-Hauptschlußmotoranlage mit allen zugehörigen Schalt- und Meßgeräten und einem besonderen Um-

schalter für Drehrichtungswechsel gezeichnet. Näheres über die Schaltgeräte ist auf S. 44 u. f. zu finden.

Bei schweren und unregelmäßigen Betriebsverhältnissen mit starken Überlastungen also z. B. bei Hebezeugen, Bahnmotoren usw. sind die Motoren mit Wendepolen auszurüsten, über die auf S. 5 bereits

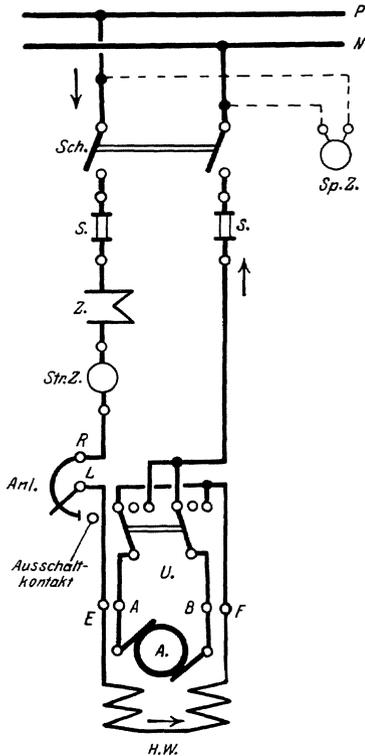


Abb. 14. Vollständiges Schaltbild einer Gleichstrom-Hauptschlußmotoranlage mit Drehrichtungswechsel.

Näheres gesagt worden ist. Dabei ist dann der Wechsel der Drehrichtung nur durch Änderung der Richtung des Stromes im Anker nach Abb. 12 und 13 vorzunehmen, die Stromrichtung in den Wendepolwicklungen darf dabei nicht geändert werden. 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)]:

$$n = \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{A} \cdot \frac{U - I_a(R_a + R_h)}{\Phi},$$

$$M_a = g_m \frac{p}{a} \cdot \frac{A}{2\pi \cdot g} \cdot \Phi \cdot I_a \cdot 10^{-8}.$$

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

1. der Polzahl p ,
2. der Anzahl der Ankerleiter A ,
3. des Gesamtwiderstandes

$$R = R_a + R_h,$$

4. des wirksamen Kraftflusses Φ .

Die unter 1. und 2. genannten Möglichkeiten haben in der Praxis keinen Eingang gefunden. Es sollen infolgedessen nur die nach 3. und 4. eingehender behandelt werden.

Für die Zwecke des Arbeitsmaschinenantriebes kommt in der Mehrzahl der Fälle nur ein Motor für je eine Arbeitsverrichtung zur Anwendung, und es ist dabei eine Änderung der Drehzahl durch besondere Mittel für den Hauptschlußmotor zumeist nicht notwendig. Besondere Arbeitsbedingungen z. B. bei Verschiebe- und Hebevorrichtungen, Verladebrücken, Rollgängen u. dgl. lassen es jedoch unter Umständen wünschenswert erscheinen, zwei Motoren für einen Bewegungsvorgang zu benutzen; es wird daher die Regelung auch für diesen zweiten Fall mit in die Betrachtung gezogen werden.

c) **Das Anlassen.** Das Anlassen erfolgt bei Motorleistungen bis etwa $\frac{1}{6}$ kW durch einfaches Schließen des Hauptschalters. Bei größerer Leistung wählt man fast ausschließlich die Form durch Änderung des Gesamtwiderstandes R . Schaltet man dem Motor einen Widerstand R_v vor, so wird die Drehzahl:

$$n = k_2 \frac{U - I(R_a + R_h + R_v)}{\Phi} \simeq k_2 \cdot \frac{U - I(R_a + R_h)}{I} - k_2 \cdot R_v, \quad (19)$$

$$[I_a = I; \quad \Phi = f(I)],$$

und es gibt $k_2 \cdot R_v$ die Verminderung der Drehzahl an, die durch den Vorschaltwiderstand hervorgerufen wird. Hieraus folgt eine für den Betrieb außerordentlich wichtige Erscheinung, daß ein Hauptschlußmotor bei vollständiger Entlastung auch dann durchgeht, wenn der Anlasser vorgeschaltet ist, denn $k_2 \cdot R_v$ ist unabhängig von der Stromstärke. Man darf daher einen Hauptschlußmotor nicht nur nicht leerlaufen lassen, sondern ihn auch niemals ohne Belastung anlassen. Wählt man R_v so groß, daß:

$$I(R_a + R_h + R_v) = U,$$

dann wird $n = 0$.

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

$$M_{d,A} = \left[\frac{p}{a} \cdot \frac{A}{2\pi \cdot g} \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \right] I_A > M_{d,R} + M_d, \quad (20)$$

g_m wird hier = 1, so daß die Anlaufstromstärke:

$$I_A > \frac{2\pi \cdot g \cdot 10^8}{A \cdot \Phi} \cdot \frac{a}{p} (M_{d,R} + M_d), \quad (21)$$

worin $M_{d,R}$ das Drehmoment zur Überwindung der Reibung der Welle in den Lagern (Reibung der Ruhe) bezeichnet. Es wird demnach beim Anlaufe 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 Reibungsmoment. Das Anlaufmoment ist stets größer als das Betriebsdrehmoment, wenn der Motor unter voller Belastung anlaufen soll, weil noch die Beschleunigung der Massen der anzutreibenden Maschine hinzukommt. Diese Beschleunigung geht allmählich in die lebendige Kraft der Massen über. Auf die Stromstöße ist bei der Wahl und Größenbestimmung der Stromerzeugungsmaschinen des Kraftwerkes, besonders wenn es sich um kleinere Anlagen mit Gas- oder Rohölmotorenantrieb (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. Besonders in diesem Umstande, mit hohem Drehmomente auch anlaufen zu können, liegt einer der bedeutendsten Vorzüge des Hauptschlußmotors.

Um den Motor vom Stillstande allmählich auf seine Nenndrehzahl zu bringen und die Stromstärke dabei auf ein bestimmtes Maß zu be-

grenzen, schaltet man den Widerstand R_v vor. Mit Rücksicht auf die einfachste bauliche Durchbildung der Vorrichtung für die Veränderung von R_v wird der Vorschaltwiderstand in einzelnen Stufen abgeschaltet (Metallanlasser)¹. Die Stromstärke schwankt dabei zwischen zwei Grenzen, von denen die eine — I_{max} — gleich ist der Anlaufstromstärke, und die zweite — I_{min} — so bestimmt sein muß, daß einmal die Stromschwankung I_{max} bis I_{min} und der damit verbundene

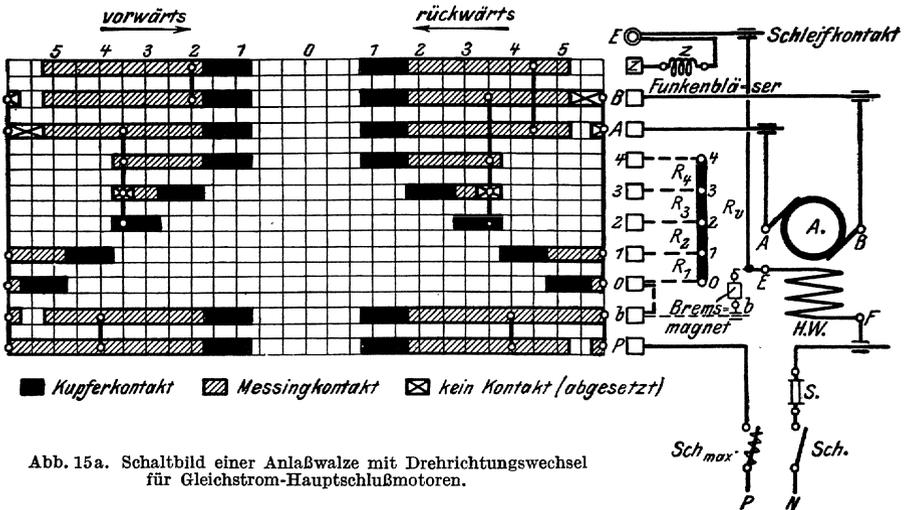


Abb. 15a. Schaltbild einer Anlaßwalze mit Drehrichtungswechsel für Gleichstrom-Hauptschlußmotoren.

Spannungsverlust 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 angetriebene Maschine schädlich oder gar gefährlich sein. Andererseits soll aber der Anlasser nur möglichst wenig Stufen besitzen, damit man tunlichst rasch auf die Nenn-drehzahl kommt und dadurch nicht nur an Stromverbrauch, 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 Leistung in Wärme umgewandelt also nutzlos verbraucht, und diese Leistung ist vom Kraftwerke über die tatsächlich in mechanische Arbeit umgewandelte zu liefern, infolgedessen zu bezahlen. Wenn dieses in solchen Betrieben, in denen die Motoren nur selten innerhalb eines Betriebstages angelassen werden, auch keine besondere Rolle spielt, so kann es bei häufiger Benutzung des Anlassers unter Umständen doch merklich ins Gewicht fallen. Das gilt namentlich dann,

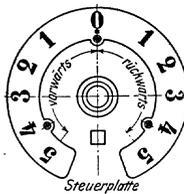


Abb. 15b. Schaltplatte zur Anlaßwalze Abb. 15a.

¹ Die Anlasser, deren Widerstand aus Wasser oder Sand gebildet wird, gestatten eine vollständig gleichmäßige Abschaltung von R_v .

wenn der Strom z. B. von einem fremden Elektrizitätswerke (Überlandwerke) bezogen wird.

In Abb. 16 ist der Vorgang beim Anlassen eines Hauptschlußmotors in einem Schaubilde zur Darstellung gebracht unter Zugrundelegung der Schaltung nach Abb. 15 für einen Hebezeugmotor mit Drehrichtungswechsel. Das Anlassen, Umsteuern und ferner auch das Bremsen bei der Schaltung nach Abb. 15 und 17 wird mit nur einer Anlaßwalze (Steuerwalze, Anlasser) vorgenommen. Wird die Steuerwalze nach Schließen des Schalters *Sch.* und des Überstromschalters *Sch_{max.}* in die Stellung „vorwärts I“ gebracht, so fließt der Strom von *P* über *b* nach *0*, durch den ganzen Widerstand (*R₁* bis *R₄*) über *A* nach dem Anker *A*. von *B* über *z* zur Magnetwicklung und von dieser zur negativen

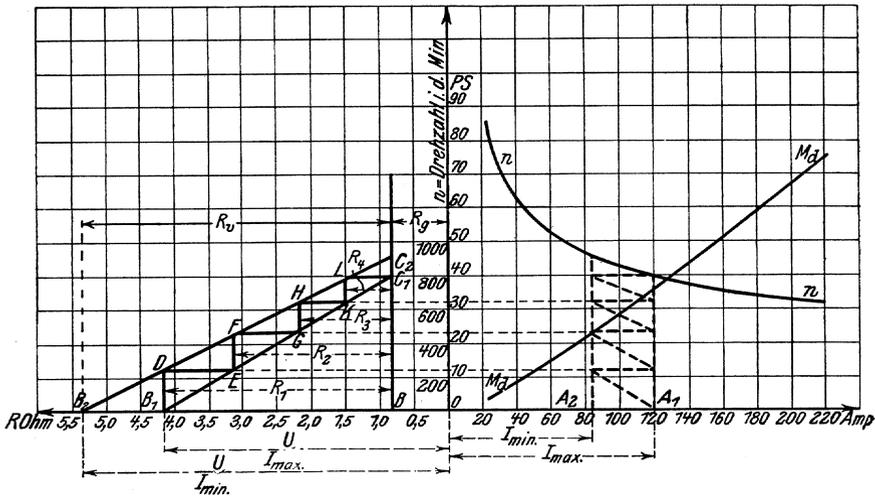


Abb. 16. Anlaßkennlinie für einen Gleichstrom-Hauptschlußmotor.

Sammelschiene *N*. Dadurch, daß nun die Walze nacheinander auf die Kontakte 2 bis 5 gestellt wird, wird der Widerstand stufenweise abgeschaltet, bis schließlich in der Stellung 5 der Anker unmittelbar am Netze liegt.

Abb. 16 zeigt den Verlauf des Anlassens in folgender bildlichen Form: Sind die Stromstärken $I_{max} = OA_1$ und $I_{min} = OA_2$ festgesetzt, und infolgedessen die Größe des Gesamtwiderstandes $R = R_a + R_n + R_v$ bekannt, dann tritt auf Stellung 1 der Steuerwalze (Abb. 15 bzw. 17) die Stromstärke I_{max} auf. Der Motor beginnt, sich zu drehen, die Gegen-EMK steigt und die Stromstärke sinkt auf I_{min} . Wird auf Kontakt 2, 3 ... übergegangen, also R_v nacheinander verringert, was in der linken Seite von Abb. 16 zum Ausdruck kommt, so wiederholt sich das Spiel des Anwachsens und Abnehmens von I und des Steigens der Drehzahl, bis schließlich auf Punkt 5 der Motor auf der Drehzahlkennlinie *nn* arbeitet. Das Drehmoment sinkt dabei von seinem höch-

sten Werte und steigt wieder, jedoch nur in dem Maße, wie sich die Stromstärke zwischen den Punkten A_1 und A_2 ändert.

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

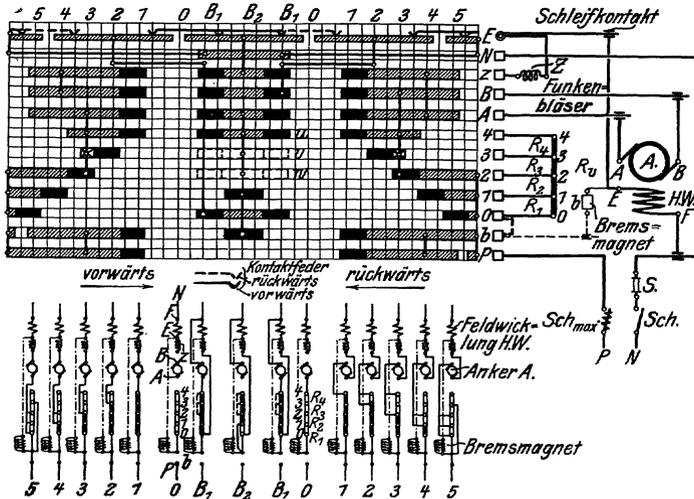


Abb. 17a. Schaltbild einer Anlaßwalze mit Drehrichtungswechsel und Bremsung für Gleichstrom-Hauptschlußmotoren.

Höhenlagen des Kranhakens zu erreichen, so 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 Abb. 17 ist die Schaltung einer solchen Steuerwalze gezeichnet. Über die Bremsstellungen B_1 , B_2 , B_1 wird noch gesprochen werden.

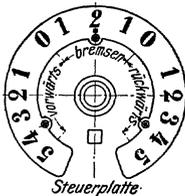


Abb. 17b. Schaltplatte zur Anlaßwalze Abb. 17a.

Sowohl in Abb. 15 wie auch in Abb. 17 erfolgt der Wechsel der Drehrichtung durch Umschalten der Stromrichtung im Anker. Die besonderen Bremsmagnete dienen zur Betätigung mechanischer Bremsen; sie sind, worauf besonders zu achten ist, so zu schalten, daß sie beim Umsteuern nicht ummagnetisiert werden; sie müssen also im Stromkreise der Magnetwicklung oder parallel zu dieser liegen.

d) Die Reihen-Parallelschaltung. Eine andere Art der Drehzahlregelung durch Widerstände, die dann zur Anwendung kommt, wenn

zwei Motoren zum Antriebe einer Maschine benutzt werden, ist die Reihen-Parallelschaltung (Abb. 18). Das Anlassen erfolgt hierbei gleichfalls mittels Vorschaltwiderständen.

Für den Anlauf werden beide Motoren in Reihe geschaltet. Die Stromstärke ist dabei am größten, also das Anlaufmoment das größt erreichbare. Der Anlaßwiderstand R_v kann hier aber wesentlich kleiner bemessen werden als bei nur einem Motor, weil die Eigenwiderstände der Motorwicklungen hintereinander geschaltet sind. Die Motoren selbst erhalten nur die halbe Spannung, und die Drehzahl ist dabei gleich der Hälfte der Nennzahl. Um die volle Drehzahl zu erreichen, werden beide Motoren parallel geschaltet. Beim Übergange zu dieser zweiten Schaltung sind ebenfalls Vorschaltwiderstände zu verwenden, deren Größe in der Regel so bestimmt ist, daß die zum Anlassen verwendeten teilweise wieder benutzt werden.

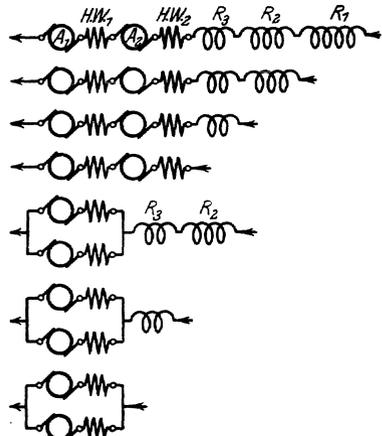


Abb. 18. Reihen-Parallelschaltung zweier Gleichstrom-Hauptschlußmotoren.

Die induzierte EMK jedes Motors ist:
bei Reihenschaltung:

$$E_{ar} = \frac{U - 2I(R_a + R_h)}{2}, \quad (22)$$

bei Parallelschaltung:

$$E_{ap} = U - I(R_a + R_h), \quad (23)$$

und da nach Gl. (11) die Drehzahl abhängig ist von der im Anker induzierten EMK, so verhält sich:

$$\frac{n_r}{n_p} = \frac{E_{ar}}{E_{ap}} = \frac{U - 2I(R_a + R_h)}{2[U - I(R_a + R_h)]}.$$

Daraus folgt, wenn mit hinreichender Genauigkeit:

$$\frac{U - 2I(R_a + R_h)}{U - I(R_a + R_h)} \cong 1$$

gesetzt wird, daß bei Reihenschaltung jeder Motor mit der Hälfte seiner Nennzahl läuft.

Die Gesamtleistung der beiden Motoren ist:

bei Reihenschaltung:

$$N_{n,r} = \frac{U \cdot I_1 \cdot \eta_{M1} + U \cdot I_2 \cdot \eta_{M2}}{2 \cdot 1000} \text{ kW}, \quad (24)$$

bei Parallelschaltung:

$$N_{n,p} = \frac{U \cdot I_1 \cdot \eta_{M1} + U \cdot I_2 \cdot \eta_{M2}}{1000} \text{ kW}. \quad (25)$$

Um die Drehzahlkennlinie bei Hintereinanderschaltung der Motoren zu finden, kann in Anlehnung an das auf S. 11 Gesagte folgendermaßen verfahren werden. Bekannt müssen sein: die Drehzahlkennlinie bei voller Spannung ($n_p n_p$, Abb. 19) und die Eigenwiderstände $R_a + R_n$. Die E_a -Kennlinie bei Reihenschaltung ist eine Parallele (E_{ar}) zur E_{ap} -Kennlinie und ergibt sich aus der Gleichung:

$$E_{ar} = \frac{U}{2} - 2 I \cdot R, \quad (26)$$

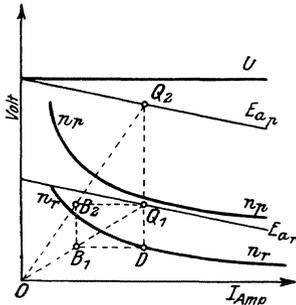


Abb. 19. Drehzahlkennlinien bei Reihen-Parallelschaltung zweier Gleichstrom-Hauptschlusssmotoren.

so daß mit Hilfe des gleichen zeichnerischen Verfahrens wie in Abb. 5 die n_r -Kennlinie gefunden werden kann. In Abb. 19 sind die Hilfslinien der Einfachheit 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 arbeiten zu können, ein Vorteil, der insbesondere bei Gleichstrombahnmotoren benutzt wird.

Den Vorgang des Anlassens durch Schaulinien dargestellt zeigt Abb. 20. Auch hier wird der Vorschaltwiderstand mittels des Anlassers

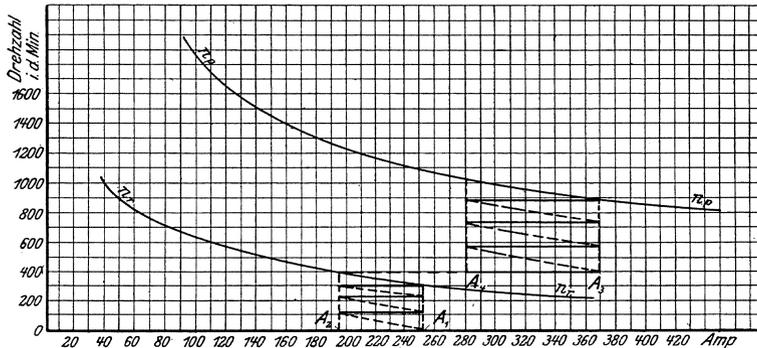


Abb. 20. Anlaßkennlinien bei Reihen-Parallelschaltung zweier Gleichstrom-Hauptschlusssmotoren.

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

e) Für das Zusammenarbeiten von zwei Motoren ist jedoch noch auf den Umstand aufmerksam zu machen, 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 praktisch 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 gibt der Motor mit stärkerem Felde mehr Leistung ab, wird also unter Umständen überlastet und dadurch gefährdet. Um das zu vermeiden, d. h. um die Feldstärke bzw. die Leistung jedes Motors genau abzugleichen, sind Parallelwiderstände zu den Magnetwicklungen und gegebenenfalls Beruhigungswiderstände vor die Anker zu schalten.

Die gebräuchlichsten Schaltungen sind in Abb. 21a bis e zusammengestellt. Unter der Voraussetzung, daß in Abb. 21a, b und c die Motoren mechanisch starr und in d und e nur elektrisch miteinander gekoppelt sind¹, ist zu den einzelnen Schaltungen folgendes zu bemerken: In Abb. 21a sind die Drehmomente und die Drehzahlen gleich, weil die 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 (Abb. 21b). Die Drehmomente können aber aus dem obengenannten Grunde voneinander abweichen, und man muß dann wie gesagt einen Parallelwiderstand zum Felde des weniger leistenden Motors anordnen. Gegen die Schaltung nach a und b bestehen keine betriebstechnischen Bedenken.

Sind die Anker (A_1 und A_2) parallel, die Feldwicklungen ($H.W_1$) und ($H.W_2$) aber in Reihe geschaltet (Abb. 21c), so ist gleiches Drehmoment für beide Motoren nur schwer zu erzielen. Man muß dann die bereits genannten 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 gekoppelt, dann richtet sich für Abb. 21d das Drehmoment jedes derselben nach der Belastung, und die Drehzahlen sind ungleich. Dasselbe gilt für die Schaltung Abb. 21e mit dem Unterschiede, daß

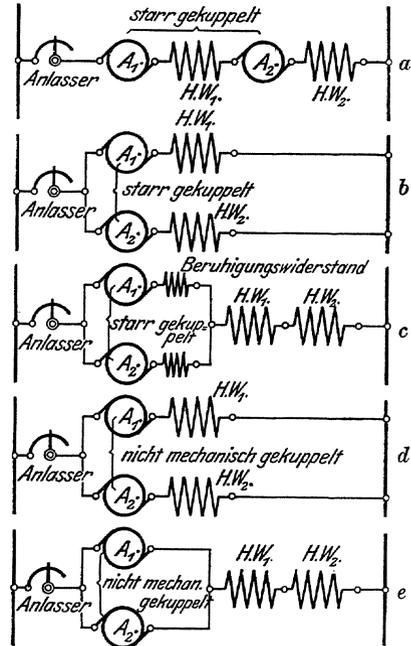


Abb. 21a bis e. Schaltungen für zwei gemeinsam arbeitende Hauptschlußmotoren.

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

die Drehzahlen annähernd gleich sind oder durch Parallelwiderstände auf die gleiche Höhe eingestellt werden können. Die Schaltung nach Abb. 21e 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 durch einen Widerstand parallel zur Magnetwicklung, oder durch Abschalten einiger Windungen der Hauptschlußwicklung.

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

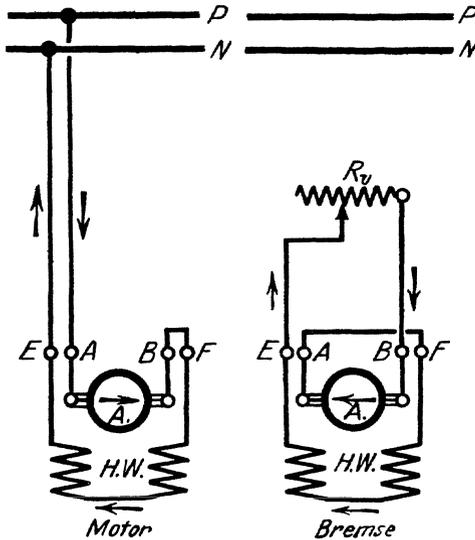


Abb. 22. Gleichstrom-Hauptschlußmotor als Motor und Generator (Bremswirkung).

g) Die elektrische Bremsung. Wie bereits erwähnt, ist in Abb. 17 eine Schaltung eingetragen, nach der eine elektrische Bremsung des Motors möglich ist. Diese Bremswirkung wird nicht durch Änderung des Dreh-sinnes erreicht, wodurch naturgemäß auch eine Bremswirkung eintritt, sondern dadurch, daß der Motor nach Abschalten desselben vom Netze durch die den in Bewegung befindlichen Massen der angetriebenen Maschine innewohnende lebendige Kraft angetrieben wird, z. B. durch den Nachlauf einer Seiltrommel, oder 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, der sinkenden Last bei Kranen u. dgl. Die Drehzahl nimmt allmählich ab und wird schließlich Null, wenn der Generator elektrisch belastet wird. Diese elektrische Belastung erfolgt durch Widerstände, die mit regelbarer Größe in den Generatorstromkreis eingeschaltet werden (Abb. 17). Auf der ersten Bremsstufe ist der Widerstand am größten; er nimmt mit jeder Stufe so ab, daß die vom Generator der jeweiligen Antriebskraft entsprechend erzeugte elektrische Leistung in Wärme umgesetzt, also vernichtet 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 Leistung durch einen entsprechend geringer bemessenen Wider-

stand 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 verbleibt. Die Arbeitsmaschine könnte demnach theoretisch durch diese Art der Bremsung nicht vollständig zum Stillstande gebracht werden, indessen wird die noch zu vernichtende geringe Antriebskraft durch die Reibung der zumeist vorhandenen Getriebe usw. aufgezehrt, so daß praktisch der Stillstand erreichbar ist.

Da nun ein Hauptschlußmotor bei unverändertem Drehsinne und unveränderter Schaltung zwischen Magnet- und Ankerwicklung nicht als Generator arbeiten kann, weil die veränderte Stromrichtung in der Magnetwicklung das Magnetfeld vernichtet, muß die Stromrichtungsänderung dadurch herbeigeführt werden, daß die Verbindung zwischen Magnet- und Ankerwicklung geändert wird. Nach der bereits gegebenen Erklärung ist es vorteilhafter, die Stromrichtungsänderung nur im Ankerstromkreise vorzunehmen; Abb. 22 und 23 zeigen die entsprechenden Schaltungen.

Bezeichnet:

U_G die erzeugte Spannung des Generators,

$E_{a,G}$ die im Anker induzierte EMK,

so ist:

$$\text{oder: } \left. \begin{aligned} U_G &= E_{a,G} - I(R_a + R_h), \\ E_{a,G} &= U_G + I(R_a + R_h), \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

und wenn $R = R_a + R_h$ der Gesamtwiderstand des Motors, R_B der eingeschaltete Bremswiderstand, dann ist:

$$U_G = I(R + R_B). \quad (28)$$

Sind I und $R + R_B$ bekannt, so kann U_G sofort berechnet werden.

Die z. B. den Schwungmassen 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:

$$M_{a,G} = M_{a,t} \cdot \eta', \quad (29)$$

oder da die Verluste gleich sind $M_{a,t} - M_a$, so ist das Bremsdrehmoment:

$$M_{a,B} = M_{a,t} + (M_{a,t} - M_a) = 2M_{a,t} - M_a. \quad (30a)$$

Durch Umrechnung erhält man:

$$M_{a,B} = M_a \left(\frac{2 - \eta'}{\eta'} \right). \quad (30b)$$

Die Kennlinie für das Bremsmoment weicht somit von der Drehmomentkennlinie des Motors ab. Sie kann nach Abb. 6 leicht gezeichnet werden.

Wie bereits gesagt wird die durch die generatorische Wirkung des Motors erzeugte elektrische Leistung in Widerständen durch Umsetzung in Wärme vernichtet. Für diese Widerstände werden stets die bereits vorhandenen Anlaßwiderstände benutzt, um an Baustoff, Raum und Kosten zu sparen. Die Steuerwalzen sind dabei so ausgebildet, daß die Bremsstellungen in der Mitte zwischen den Stellungen für die beiden Fahrrichtungen liegen (Abb. 17), wodurch neben der besseren baulichen Durchbildung erreicht wird, daß beim Wechsel der Drehrichtung stets erst der Motor bis nahezu auf Null in der vorher innegehabten Drehrichtung abgebremst wird. Starke Stöße und die mit ihnen verbundenen Nachteile werden demnach durch eine derartige Bremsung, wenn auf die einzelnen Stufen nacheinander übergegangen wird, vermieden, die beim einfachen Umschalten des Drehsinnes des Motors unter Umständen recht bedeutend und für viele Verhältnisse nicht nur für das Kraftwerk (Spannungsschwankungen), sondern auch für die angetriebenen Maschinen unzulässig sind. Durch Versetzen des Kontaktes u nach v oder w in Abb. 17 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 Gegensatz 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.

4. Der Gleichstrom-Nebenschlußmotor.

Der Nebenschlußmotor unterscheidet sich vom Hauptschlußmotor darin, daß die Erregung im Nebenschlusse zum Anker liegt, also unabhängig ist vom Ankerstrome demnach von der Belastung, dagegen abhängig von der Spannung an den Klemmen, also der Netzspannung U (Abb. 24). Unter der Voraussetzung gleichbleibender Netzspannung U ist somit die im Anker induzierte EMK:

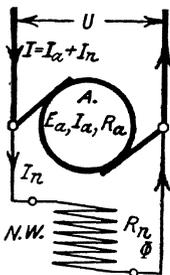


Abb. 24. Stromlauf des Gleichstrom-Nebenschlußmotors.

$$\left. \begin{aligned} E_a &= U - I_a \cdot R_a \\ &= \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} A \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \\ &= k_1 \cdot n \cdot \Phi \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

bzw. die Drehzahl:

$$n = \frac{E_a}{k_1 \cdot \Phi} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi} \quad (32)$$

Der Kraftfluß Φ ist nicht dauernd gleichbleibend, sondern nimmt mit steigender Belastung infolge der Ankerrückwirkung ab; die Drehzahl steigt infolgedessen, weil das Feld geschwächt wird. Andererseits

steigt mit wachsendem I_a der Ohmsche Spannungsverlust $I_a R_a$ im Anker, und E_a nimmt ab. In der Praxis wählt man nun bei gewöhnlichen Motoren den Ohmschen Spannungsverlust und die Ankerrückwirkung so groß, daß sie sich, weil sie entgegengesetzt wirken, fast vollständig aufheben. 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 Drehmoment ergibt sich unter Benutzung der Gl. (3b) und (6) zu:

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

oder wenn die Netzspannung, also die Erregung (Φ), unverändert bleibt:

$$M_a = \text{const } I_a, \quad (35)$$

d. h. das Drehmoment eines Nebenschlußmotors ist unabhängig von der Drehzahl und bei gleichbleibender Netzspannung unmittelbar abhängig vom Ankerstrom, also von der Belastung. Spannungsschwankungen haben dagegen einen wesentlichen Einfluß sowohl auf die Drehzahl als auch auf das Drehmoment bzw. die Zugkraft, und es ist sowohl bei der Berechnung der Zuleitungen insbesondere bei großen Motoren als auch für die Stromlieferung z. B. für die Antriebsmaschinen mit ihrer Regelung, für die Generatoren in bezug auf Stromstöße, für Umformer aus gleichen Gründen auf diesen Umstand Rücksicht zu nehmen. Man kann mit hinreichender Genauigkeit $\Phi = \text{const } U$ setzen; es verhalten sich dann die Drehmomente bei verschiedenen Spannungen zueinander wie die Spannungen selbst, also:

$$\frac{M_a}{M_{a_1}} = \frac{U}{U_1}, \quad M_{a_1} = \frac{U_1}{U} \cdot M_a. \quad (36)$$

Die besondere Eigenart des Nebenschlußmotors liegt somit darin, daß derselbe bei unveränderter Netzspannung mit annähernd gleicher Drehzahl bei allen Belastungen läuft, während sich das Drehmoment mit der Belastung ändert. Der Einfluß von U auf das Güteverhältnis g_m kann auch hier vernachlässigt werden.

Die vom Motor abgegebene Leistung ist:

$$N_n = \frac{M_a \cdot \omega}{75 \cdot 1000} = \text{const } I_a \cdot n, \quad (37)$$

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

Es ist ferner die zuzuführende elektrische Leistung:

$$N = \frac{N_n}{\eta_M} = \frac{U \cdot I}{1000} \text{ kW}, \quad (38)$$

und der aufgenommene Strom bei Vollbelastung:

$$I = \frac{N_n \cdot 1000}{U \cdot \eta_M} \tag{39}$$

Die Betriebskennlinien eines Nebenschlußmotors sind in Abb. 25 zusammengestellt, und zwar zum besseren Vergleiche mit denjenigen des Hauptschlußmotors wiederum in Abhängigkeit von der Stromstärke. Sie sind für die Drehzahl n und das Drehmoment M_d nach Gl. (33) und (35) mit hinreichender Genauigkeit Gerade, die um bestimmte Winkel gegen die Abszissenachse geneigt sind, die sich für $U = \text{const}$ ergeben für die n -Kennlinie aus dem Spannungsverlust im Anker $I_a \cdot R_a$ und für das Drehmoment aus der Beziehung:

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

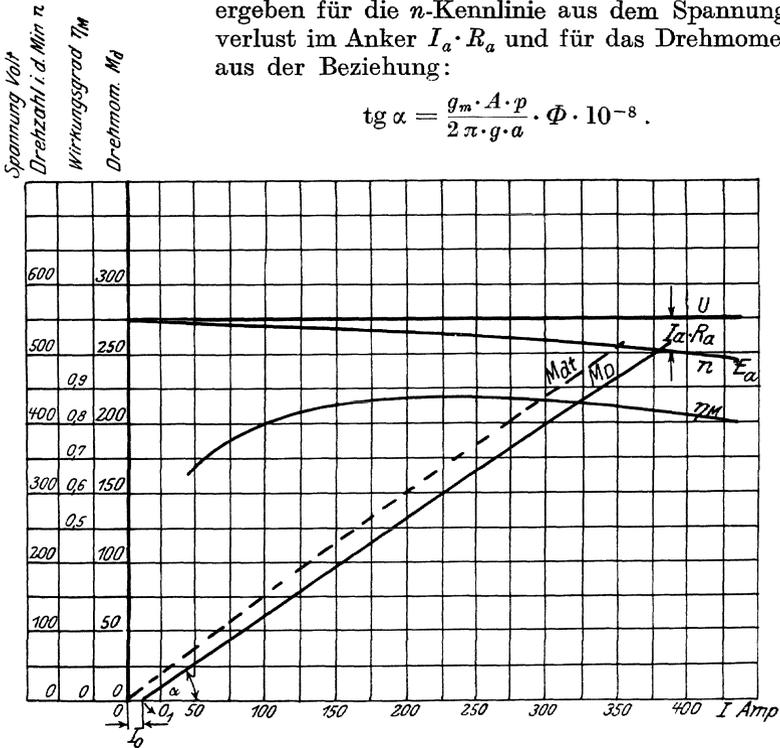


Abb. 25. Betriebskennlinien für den Gleichstrom-Nebenschlußmotor.

Auch hier beginnt naturgemäß die Drehmomentkennlinie nicht im Koordinatenursprunge, sondern in einem Punkte O_1 , wobei OO_1 gleich ist dem Leerlaufstrom I_0 . In Abb. 25 ist noch die Kennlinie für das theoretische Drehmoment $M_{d,t}$ eingetragen.

In welcher Weise sich die Drehzahl ändert, wenn der Motor mit verschiedener Netzspannung betrieben wird, geht aus den Schaulinien Abb. 26 hervor.

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

Der Gleichstrom-Nebenschlußmotor wird von den Gleichstrommotoren für Arbeitsmaschinenantriebe bei weitem am häufigsten verwendet, weil seine Drehzahl bei verschiedenen Belastungen unverändert bleibt. Einen Nachteil besitzt er allerdings darin, daß sein Anlaufmoment sehr gering ist, weil bei einer hohen Ankerstromstärke im Augenblicke des Anlassens ein bedeutender Spannungsverlust in der Zuleitung eintritt, der eine Abnahme des wirksamen Kraftflusses zur Folge hat. Ein Vorzug des Motors liegt schließlich noch in der Rückgewinnung elektrischer Leistung, wenn er von einer äußeren Kraft in unverändertem Drehsinne angetrieben wird. Hierauf wird weiter unten besonders eingegangen werden.

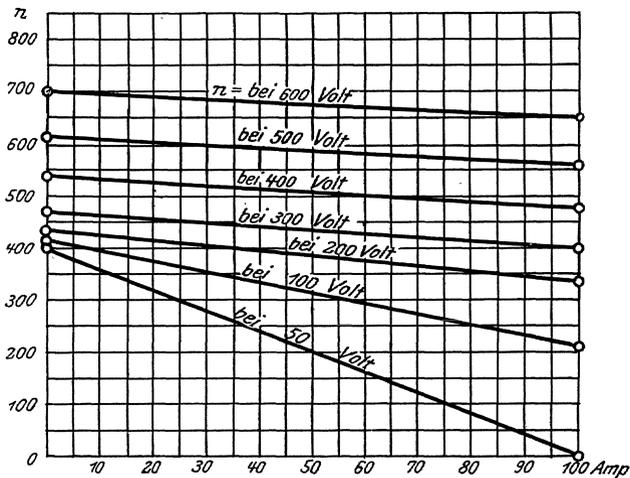


Abb. 26. Drehzahlkennlinien eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors bei verschiedenen Netzspannungen.

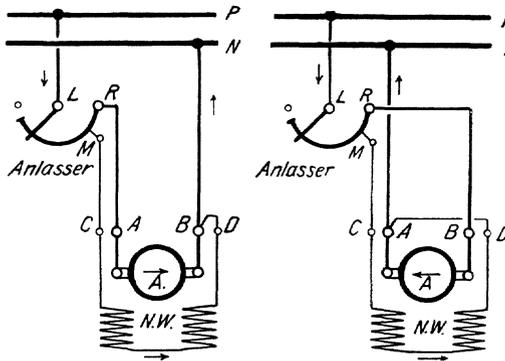
Das über den aussetzenden Betrieb beim Hauptschlußmotor Gesagte gilt auch für den Nebenschlußmotor. Allerdings findet man bei letzterem diese Arbeitsweise verhältnismäßig selten, weil z. B. für Hebezeuge und Maschinen ähnlicher Arbeitsweise der Nebenschlußmotor nur vereinzelt zur Verwendung kommt.

5. Die Regelung des Gleichstrom-Nebenschlußmotors.

a) **Der Drehrichtungswechsel.** Soll der Drehsinn des Nebenschlußmotors geändert werden, so erfolgt das ebenfalls durch den Wechsel der Stromrichtung nur entweder im Anker oder in der Magnetwicklung. Man darf aus den bereits genannten Gründen wiederum die Stromrichtung nur im Anker umschalten, wie in Abb. 27 und 28 gezeichnet, weil das Magnetfeld ausgebildet, also vorhanden sein muß, bevor der Anker Strom erhält. Anderenfalls findet das Ankerfeld kein entsprechendes Gegenfeld der Magnete, und der Motor würde dann eine Drehzahl annehmen, die weit über dem zulässigen Höchstwerte

liegt. Man sagt auch hier, der Motor „geht durch“. In Abb. 29 erfolgt die Umschaltung mit Hilfe eines einfachen Umschalters *U*.

Noch in stärkerem Maße wie der Hauptschlußmotor neigt der Nebenschlußmotor bei höherer als der Vollbelastung zum Feuern der Bürsten, denn während beim ersteren die Stärke des Magnetfeldes mit zunehmender Belastung gleichfalls steigt, also die sich entgegenarbeitenden Amperewindungen von Anker und Magnetwicklung stets in einem bestimmten, nahezu unveränderten Verhältnisse bleiben, ist das beim Nebenschlußmotor nicht der Fall. Hier bleibt die Stärke des Feldes unverändert, während die Amperewindungen 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 vor-



Rechtslauf eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors.

Abb. 27.

Linkslauf

Abb. 28.

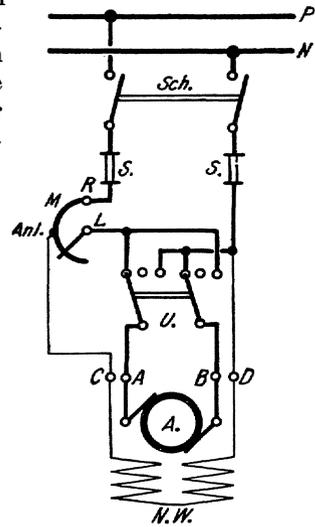


Abb. 29. Drehrichtungswechsel beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor.

kommen 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 Hauptschluß liegenden Wendepole den Motor gewissermaßen zu einem Hauptschlußmotor machen würden, zu verhüten.

Da die Wendepole im Ankerstromkreise liegen, muß bei diesen die Stromrichtung bei Umkehr des Drehsinnes des Motors geändert werden (Abb. 30 und 31).

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

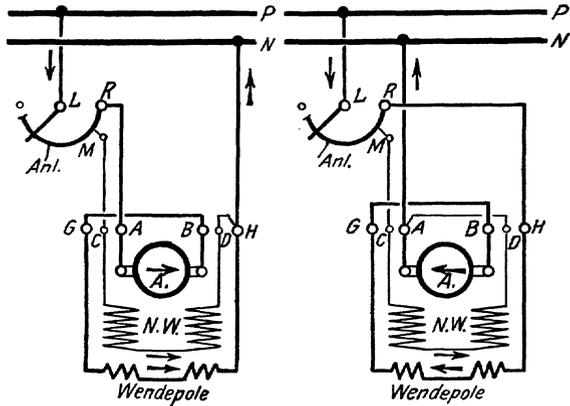
$$\begin{aligned} n &= \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{\Phi \cdot A} E_a \\ &= \frac{a}{p} \cdot \frac{60 \cdot 10^8}{\Phi \cdot A} (U - I_a \cdot R_a). \end{aligned}$$

Es ist also eine Änderung von n zu erreichen durch Änderung:

1. der Polzahl p ,
2. der Anzahl der Ankerleiter A ,
3. der induzierten EMK E_a bzw. der Netzspannung U ,
4. des wirksamen Kraftflusses Φ (der Erregung).

Die unter 1. und 2. genannten Möglichkeiten sollen, da sie in der Praxis nicht gebräuchlich sind, nicht näher besprochen werden.

c) Das Anlassen. Motoren für Leistungen bis etwa 1 kW und Leeranlauf können unmittelbar durch das Schließen des Hauptschalters in Betrieb gesetzt werden. Um einen Motor größerer Leistung in Gang zu bringen, bedient man sich auch beim Nebenschlußmotor wiederum eines veränderlichen Widerstandes, der in den Ankerstromkreis geschaltet wird (Abb. 32). Die Änderung der Drehzahl von Null bis zum vollen



Rechtslauf eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors mit Wendepolen. Abb. 30.
Linkslauf Abb. 31.

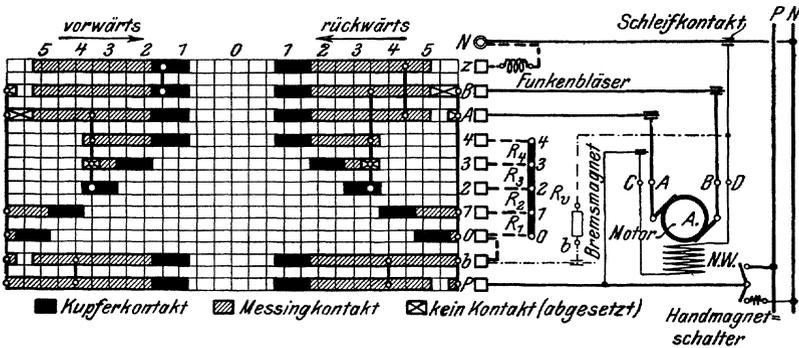


Abb. 32. Schaltbild einer Anlaufwalze mit Drehrichtungswechsel für Gleichstrom-Nebenschlußmotoren.

Nennwerte erfolgt hier demnach ebenfalls durch Änderung der induzierten EMK.

Es ist:

$$E_a = U - I_a \cdot R_a ;$$

vergrößert man R_a durch einen vorgeschalteten veränderlichen Widerstand R_v , so kann E_a verringert und n infolgedessen auf Null gebracht werden, Gl. (32). Das hat aber zur Voraussetzung, daß die Netzspannung

sich nicht ändert. Die vorgenannte Gleichung geht unter Berücksichtigung von R_v über in:

$$E_a = U - I_a (R_a + R_v). \tag{40}$$

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

$$E_a = U - \text{const } M_a (R_a + R_v), \tag{41}$$

und man ersieht, daß der Einfluß eines bestimmten Vorschaltwiderstandes auf E_a bzw. n abhängig ist von dem Drehmomente, das der Motor zu entwickeln hat. Da M_a während der Anlaufzeit wie bereits gesagt sehr klein ist, muß R_v sehr groß gemacht werden.

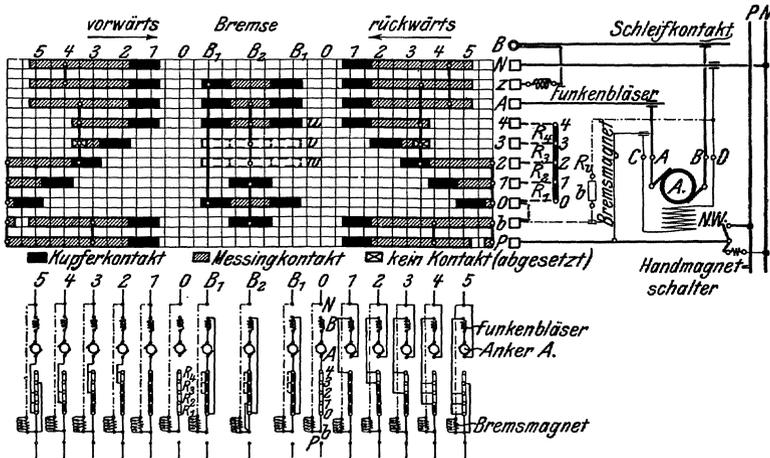


Abb. 33. Schaltbild einer Anlaufwalze mit Drehrichtungswechsel und Bremsung für Gleichstrom-Nebenschlußmotoren.

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

In Abb. 32 ist für das bessere Verständnis des Verfahrens zum Anlassen eines Nebenschlußmotors und zum Vergleiche mit dem Hauptschlußmotor das Schaltbild wiederum für eine Steuerwalze gegeben. Auch hier werden die einzelnen Widerstandsstufen $R_1, R_2, R_3 \dots$ nacheinander durch die Schaltwalze abgeschaltet, bis auf Stellung 5 der Motor seine volle Drehzahl erreicht hat. Die Vorschaltwiderstände liegen nur im Ankerstromkreise, der Magnetstromkreis bleibt also stets unverändert. Abb. 33 zeigt die Schaltung für eine solche Steuerwalze mit Bremsstellungen B_1, B_2, B_3 .

Auf die Ausführung des Anlassers, die für den Nebenschlußmotor von derjenigen für den Hauptschlußmotor abweicht, wird bei der Besprechung der „Schalt- und Meßgeräte im äußeren Stromkreise“ näher eingegangen werden.

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 dauernd zu ändern, und zwar ist nach Gl. (32) dadurch nur eine Drehzahlverminderung möglich. Die Leistung sinkt dann ungefähr im gleichen Maße, wie die Drehzahl abnimmt [Gl. (37)]. Nach Obigem bestimmt ferner das vom Motor zu entwickelnde Drehmoment den Einfluß eines Vorschaltwiderstandes auf E_a bzw. n . Im Leerlaufe beeinflußt der vorgeschaltete Widerstand die Drehzahl nur wenig, während n andererseits bei großem Drehmoment durch den gleichen Vorschaltwiderstand stärker herabgesetzt wird als bei kleinerem M_a . Einen bestimmten Wert von n durch diese Regelungsart einzustellen, ist also nur dann möglich, wenn M_a bekannt und der Vorschaltwiderstand entsprechend bemessen ist.

Zu diesem kommt der weitere Nachteil der Benutzung von Vorschaltwiderständen zur dauernden Regelung der Umdrehungszahl in der Unwirtschaftlichkeit, weil dem Motor die volle elektrische Leistung zugeführt werden muß, von der nur ein Teil nutzbar abgegeben, während soviel im Vorschaltwiderstande in Wärme umgesetzt, also nutzlos verloren wird, als die Drehzahl herabgesetzt wird. Der Wirkungsgrad dieser Regelungsart ist somit außerordentlich schlecht, und zwar sinkt η_M im Verhältnisse der Umdrehungszahlen $\frac{n_1}{n}$. Man benutzt dieselbe deshalb nur zum Anlassen und für Motoren kleinerer Leistungen.

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 Herabsetzung der Drehzahl wirtschaftlicher vorzunehmen, weil gerade dieser Gleichstrommotor besonders für den Arbeitsmaschinenantrieb in seiner gleichbleibenden Drehzahl bei Belastungsänderungen ein so außerordentlich schätzenswertes Verhalten hat. Nach Gl. (32) ist eine fast verlustlose Änderung von n nur durch Änderung der Netzspannung U 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 naturgemäß von einem solchen Generator nicht mehr mit Strom versorgt werden.

Eine häufig zur Verwendung kommende Schaltform, die von H. Ward-Leonard angegeben worden ist, ist in Abb. 34 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 zugeführten Spannung, und zwar wird dieses erreicht durch Verstellen des Nebenschlußreglers $N.R_g$ des Generators. Jedem Werte der Generatorspannung entspricht eine bestimmte Drehzahl des Motors, die derselbe hier bei allen Leistungen bzw. bei jedem beliebigen Drehmomente stets annähernd beibehält. Der Antrieb des Generators erfolgt in Abb. 34 durch einen Drehstrommotor $D_A.M.$ Sofern ein besonderes Gleichstrom-

netz vorhanden ist, wird natürlich der Generator von einem Gleichstrom-Nebenschlußmotor angetrieben. Es empfiehlt sich in diesem Falle, den Generator fremd zu erregen, d. h. seine Magnetwicklung an die vorhandene Stromquelle anzuschließen. Die Erregerwicklung $N.W.$ des Motors liegt dann gleichfalls an den besonderen Gleichstromsammelschienen und erhält einen Regler $N.R.M.$, um die Drehzahl des Motors noch weiter erhöhen zu können, wenn die Generatorspannung eine Zunahme nicht mehr zuläßt. Warum durch Änderung der Erregung des Motors eine Drehzahlzunahme eintritt, wird auf S. 37 behandelt werden. Der Schaltung nach Abb. 34 ist ferner noch zugrunde gelegt worden,

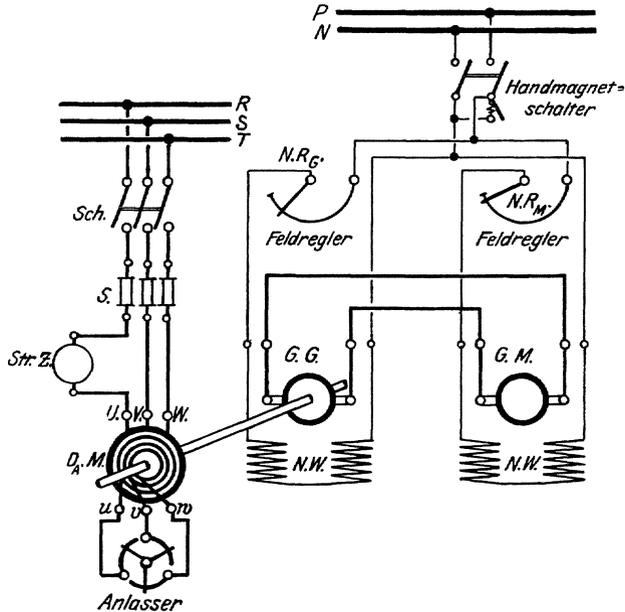


Abb. 34. Drehzahlregelung beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor nach Ward-Leonard.

daß für die Erregung eben die vorerwähnte Gleichstromquelle mit fester 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 Schaltgeräte bei der Leonardschaltung in den Nebenschlußstromkreisen liegen, sind dieselben nur für kleine Ströme zu bemessen. Sie sind demnach einfach und sicher, was mit dem Vorteile der wirtschaftlichen Regelung diese Anordnung insbesondere für große Motoren, die häufig angelassen und abgestellt werden, oder noch mit umkehrbarer Drehrichtung arbeiten müssen (Walzenzugmotoren, Werkzeugmaschinenantriebe, Förderanlagen usw.), sehr geeignet macht. Das Drehmoment des Motors bei der Leonard-Schaltung bleibt bei allen Drehzahlen unverändert.

Die Regelung der Drehzahl bei Papiermaschinen soll schließlich erwähnt werden, weil dieselbe wohl die weitgehendsten Anforderungen bezüglich der Änderung von n stellt mit 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 in Abhängigkeit von der Papiergeschwindigkeit; die geringen Geschwindigkeiten erfordern jedoch eine Leistungsabgabe, die ein wenig größer ist, als ihnen im Verhältnis der verminderten Drehzahl 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 Leonard-Schaltung kommt für solche Betriebe vielfach die **Zu- und Gegenschaltung** zur Verwendung. Die Drehzahlregelung erfolgt hierbei wiederum dadurch, daß dem Arbeitsmotor der Papiermaschine unter Benutzung eines besonderen Zusatz-Maschinensatzes Strom von veränderlicher Spannung zugeführt wird. Der Maschinensatz besteht aus zwei Gleichstrommaschinen, deren jede annähernd eine Leistung gleich der Hälfte der 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 (Abb. 35). Die Felder aller drei Maschinen liegen am vorhandenen Gleichstromnetze, werden also fremderregt.

Bei einer Netzspannung von z. B. 220 V werden Zusatzmotor und Zusatzgenerator ebenfalls je für 220 V gewickelt, während der Anker des Arbeitsmotors für 440 V zu wickeln ist.

Die Spannung des Zusatzgenerators, die durch einen Umschaltregler für sehr 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. Treten Belastungsänderungen innerhalb der Papiermaschine auf, so ist, um möglichst weitgehende Drehzahlgleichheit zu erreichen, der Zusatzgenerator mit einer einstellbaren Doppelschlußwicklung zu versehen. Der Regelbereich kann bis zu 1 : 15 erzielt werden. Die Spannung des Papiermaschinenmotors ist dann tunlichst hoch (440 V) zu wählen, da andernfalls der Spannungswert bei den kleinsten Drehzahlen zu niedrig wird.

Der Vorgang bei der Regelung ist folgender (Abb. 35): Soll der Arbeitsmotor sehr langsam laufen, so wird seinem Anker eine dieser geringen Drehzahl entsprechende niedrige Spannung zugeführt. Soll diese Spannung z. B. 20 V betragen, so wird der Regler so eingestellt, daß der gegen die Netzspannung geschaltete Zusatzgenerator 200 V an seinen Klemmen aufweist. Von den 220 V Netzspannung erhält dann der Arbeitsmotor nur 20 V; mit den übrigbleibenden 200 V läuft der Zusatzgenerator als Motor und treibt seinen bisherigen Antriebsmotor als Generator an. Zur weiteren Erhöhung der Drehzahl des Arbeits-

motors wird die Gegenspannung des Zusatzgenerators immer weiter verringert, bis sie schließlich auf Null gebracht ist. Hier steht dem Motor die volle Netzspannung von 220 V zur Verfügung, und er läuft, da er für 440 V gewickelt ist, mit halber Drehzahl.

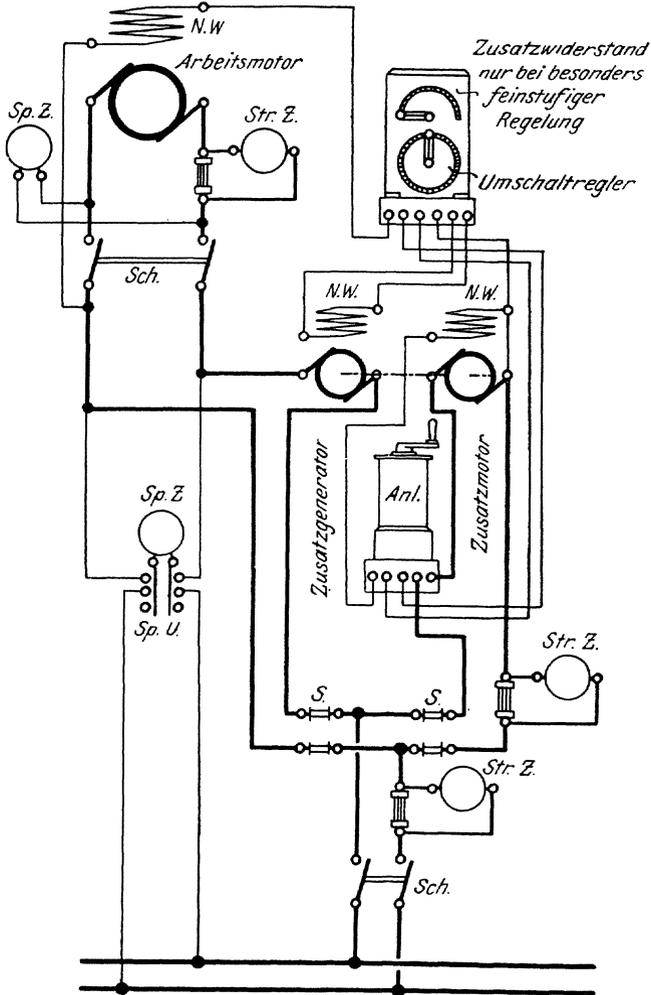


Abb. 35. Drehzahlregelung beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor durch Zu- und Gegenschaltung.

Beim Weiterschalten 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 V gesteigert, so läuft der Antriebsmotor schneller, bis er bei 440 V insgesamt seine volle Drehzahl hat. In Abb. 35 sind auch die für die Betriebsführung erforderlichen Schalt- und Meßgeräte eingetragen.

Diese Art der Regelung in sehr weiten Grenzen, die sowohl mit der Leonard-Schaltung als auch mit der weiter unten besprochenen Regelung im Magnetstromkreise des Motors nicht erreicht werden kann, ist ebenfalls betriebssicher und wirtschaftlich. Es ist außerdem möglich, für alle drei Maschinen solche mit hoher Drehzahl zu verwenden, die mit besserem Wirkungsgrade arbeiten als ein bei Verwendung reiner Nebenschlußregelung (s. weiter unten) erforderlicher langsamlaufender Motor.

Das Drehmoment ist bei der Zu- und Gegenschaltung bei allen Drehzahlen gleichbleibend. Wird bei derartigen Regelvorschriften weiter gefordert, daß das Drehmoment bei den niedrigeren Geschwindigkeiten größer sein soll als bei den hohen, so versieht die AEG die Zu- und Gegenschaltung bzw. die Leonard-Schaltung noch mit einer Nebenschlußregelung, bei der das Drehmoment entsprechend der Drehzahlverminderung ansteigt, worauf besonders hingewiesen sein soll.

Ist die Spannung des Gleichstromnetzes veränderlich, oder ist Gleichstrom erst durch Umformung (Motorgenerator, Umformer, Gleichrichter) zu gewinnen und sind dabei Frequenzschwankungen im Drehstromnetze zu befürchten, so müssen, da die Schwankungen sich auf die Gleichstrommotoren übertragen und demnach die Drehzahl des Papiermaschinenmotors beeinflussen, Schnell- oder Eilregler für die stromliefernden Maschinen des Kraftwerkes eingebaut werden (siehe IV. Band).

Eine andere Regelung des Nebenschlußmotors durch Änderung der Netzspannung, die hier der Vollständigkeit wegen kurz erwähnt sei, besteht schließlich 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 Schaltgeräte, sowie die der Unterhaltung recht beträchtlich sind und für das Aufladen viel Zeit verlorenght, ist diese Anordnung, soweit bekannt, bisher nicht zur praktischen Verwendung gekommen. Außerdem ist der Gesamtwirkungsgrad einer solchen Batterieregelung wesentlich schlechter als bei der Maschinenregelung.

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 Drehzahl erreicht werden. Die Beeinflussung von Φ , also der Erregung, erfolgt dadurch, daß man der Magnetwicklung einen Widerstand vorschaltet (Abb. 36). Dieses ist die einfachste und in der Praxis sehr oft angewendete Form für die Steigerung der Drehzahl durch Schwächung des Feldes.

Die Drehzahlsteigerung ist indessen begrenzt und zwar durch die Stromwendung, die beim Überschreiten eines bestimmten Wertes für Φ nicht mehr funkenfrei vor sich geht. Das ist nach S. 6 für die Haltbarkeit des Kollektors, dieses wichtigsten und besondere Aufmerksam-

keit erfordernden Teiles einer Gleichstrommaschine, unbedingt notwendig. Derart regelbare Motoren werden daher stets mit Wendepolen ausgerüstet. Dann können Steigerungen von n im Verhältnis von etwa 1 : 4 noch betriebssicher erfolgen, sofern natürlich der Motor hierfür besonders gebaut ist.

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

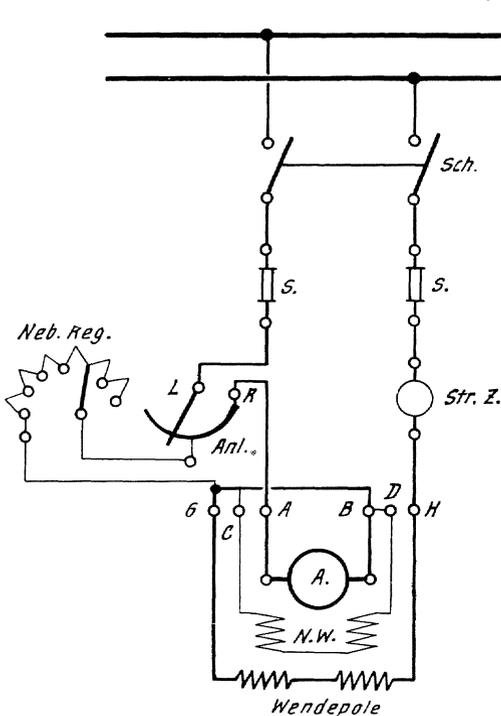


Abb. 36. Drehzahlregelung beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor durch Änderung der Erregung.

sollen. Da der Nebenschlußmotor die Eigenschaft hat, die Leistung bei der höchsten durch die Nebenschlußregelung erreichten Drehzahl auch bei allen innerhalb der Nebenschlußregelung liegenden tieferen Drehzahlen abgeben zu können, ist es erforderlich, die Arbeitsweise der anzutreibenden Maschine genau zu kennen. So ist z. B. bei Kolbenpumpen, Schleuderlüftern u. dgl. notwendig, daß im Regelbereiche das Drehmoment unverändert entwickelt wird, d. h. also, daß:

$$M_a = \frac{N}{n} = \text{const.}$$

Für diesen Fall würde z. B. bei einem Motor von 20 kW, dessen Drehzahl im Nebenschlusse im Verhältnisse 1 : 2 geändert werden soll,

Motors hierbei nur unwesentlich beeinflusst wird.

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

Bei der Wahl des Anlassers ist mit besonderer Überlegung zu verfahren. Man hat zu unterscheiden, ob bei einem regelbaren Nebenschlußmotor innerhalb des Regelbereiches das Drehmoment oder die Leistung gleichbleiben

der Anlasser nur für $\frac{20}{2} = 10 \text{ kW}$ zu wählen sein, denn nur diese Leistung bzw. die dieser entsprechende Stromstärke tritt tatsächlich beim Anlassen auf. Der Endkontakt des Anlassers muß aber selbstverständlich für die volle der Leistung von 20 kW entsprechende Stromstärke bemessen werden. Die Anlasser werden dann, wie das Beispiel zeigt, wesentlich kleiner und im Preise billiger.

Wird im Regelungs-bereiche gleichbleibende Leistung verlangt, ändert sich also das Drehmoment mit der Drehzahl, wie das beim Antriebe von Werkzeugmaschinen der Fall ist, dann ist der Anlasser für die volle Leistung zu bemessen. Es muß daher für jeden Fall angegeben werden, ob das Drehmoment oder die Leistung gleichbleiben soll.

f) **Das Zusammenarbeiten mehrerer Motoren.** Für gewöhnlich wird der Nebenschlußmotor ebenfalls nur einzeln verwendet. Es finden sich aber auch hier Fälle, in denen eine Arbeitsmaschine durch zwei Motoren entweder starr gekuppelt oder an ein Netz im Parallelbetriebe angeschlossen anzutreiben ist.

Sind die Motoren miteinander mechanisch starr gekuppelt, so kann die Schaltung von Anker und Feldwicklungen nach Abb. 37a oder b vorgenommen werden. In Abb. 37a 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. Diese Schaltung muß mit Vorsicht angewendet werden, da Schwierigkeiten hinsichtlich der Belastungsverteilung auf jeden der beiden Motoren bestehen, sofern die Drehzahlkennlinien beider Motoren nicht genau übereinstimmen. Die Motorspannung ist gleich der halben Netzspannung. Das Anlassen erfolgt durch nur einen Anlasser im Ankerstromkreise, der für die Gesamtleistung der beiden Motoren zu bemessen ist.

Schaltet man dagegen die Motoren parallel nach Abb. 37b, so ist gleiches Drehmoment trotz der starren Kupplung der Motorwellen nur

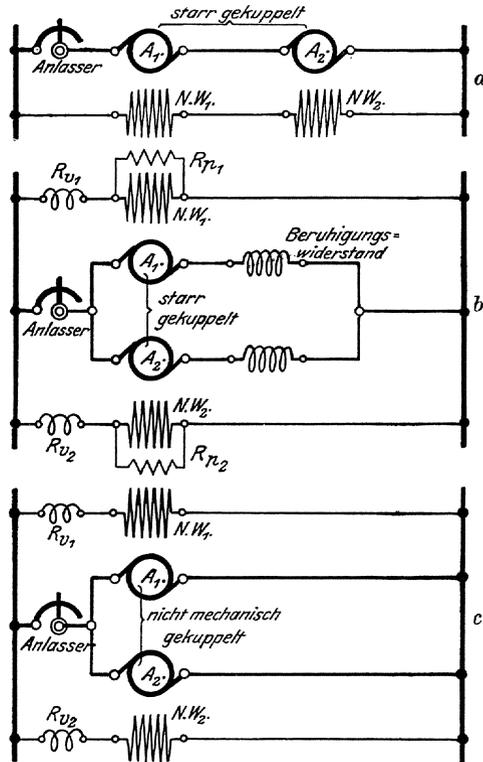


Abb. 37. Schaltungen für zwei gemeinsam arbeitende Nebenschlußmotoren.

schwer zu erreichen. Man muß wiederum „Beruhigungswiderstände“ vor beiden Ankern und unter Umständen noch Parallelwiderstände R_p zu den Magnetwicklungen einbauen. Obgleich ferner die Drehzahlen beider Motoren für Abb. 37b infolge der Kupplung gleich sind, kann es dennoch vorkommen, daß schon bei einer geringen Verschiedenheit in der Stärke der Felder eine ungleiche Verteilung der Stromaufnahme und damit eine Überlastung des einen und eine Entlastung des zweiten Motors eintritt, was möglicherweise zu Betriebsstörungen bei dem ersten Motor führt. Um dem vorzubeugen, sind besondere Vorschaltwiderstände R_v vor die Feldwicklungen zu schalten. Die Motoren sind für die Netzspannung zu bemessen. Das Anlassen kann mit nur einem oder auch mit zwei Anlassern erfolgen, die dann aber starr zu kuppeln sind. Letzteres ist weniger zu empfehlen, wie überhaupt die Verbindung nach Abb. 37b betrieblich weniger gut ist.

Sind die beiden Motoren nicht mechanisch miteinander gekuppelt, sondern in der allgemeinen Form in Parallelschaltung an das Netz angeschlossen (Abb. 37c), so bestehen Gefahren für die einzelnen Motoren nicht. Die Drehmomente richten sich nach der Belastung. Die Drehzahlen sind natürlich ungleich, können aber durch kleine Vorschaltwiderstände R_v vor die Magnetwicklungen leicht auf gleiche Höhe eingestellt werden. Als Spannung für die Motoren gilt die volle Netzspannung. Das Anlassen ist ebenfalls mit nur einem Anlasser möglich, der dann für die Gesamtleistung bemessen werden muß.

g) Die elektrische Bremsung. Beim Nebenschlußmotor liegen, wenn derselbe als Generator arbeiten und damit zur Bremsung der angetriebenen Maschine benutzt werden soll, im Gegensatze zum Haupt-schlußmotor die Verhältnisse zunächst insofern günstiger, als derselbe sowohl als Motor wie auch als Generator ohne Änderung der Schaltung zwischen Magnet- und Ankerwicklung im gleichen Drehsinne arbeitet. Von der Behandlung der Bremsung durch Umkehr der Drehrichtung soll abgesehen werden, da sie nichts besonders Bemerkenswertes bietet. Als Antriebskraft zur Erzeugung der generatorischen Wirkung dient 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 Hauptschlußmotor wenn möglich nicht mit Selbsterregung, sondern mit Fremderregung zu betreiben. Die Magnetwicklung bleibt dann auch während der Bremsung dauernd am äußeren Netze (Abb. 33).

Wird die Erregung nicht geändert, ist die induzierte EMK:

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

und die erzeugte Stromstärke I_G nur abhängig von der Größe des in den Generatorstromkreis eingeschalteten Widerstandes R_B , also:

$$I_G = \frac{E_{a, G}}{R_B}.$$

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

Auch hier werden der Einfachheit wegen bei einer Steuerwalze die gleichen Widerstände, die für das Anlassen dienen, für die Bremsung benutzt.

Erwähnt sei schließlich, daß der Nebenschlußmotor in seiner Arbeitsweise als Generator auch dazu verwendet werden kann, den erzeugten Strom ins Netz zurückzuliefern; man spricht dann von der sog. Nutzbremung. Sie wird vereinzelt bei elektrischen Bahnen, sowie bei Kranen (bei sinkender Last) und Arbeitsmaschinen, z. B. Hobelmaschinen, die beim Rückhube mit erhöhter Geschwindigkeit laufen, angewendet.

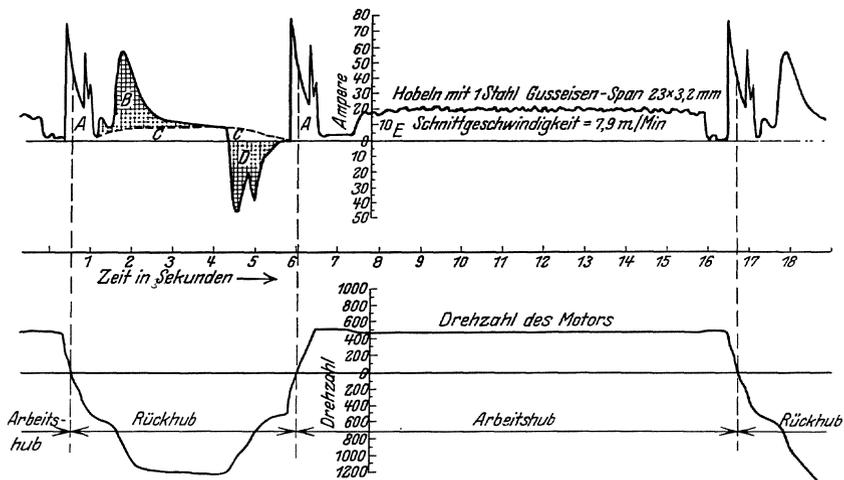


Abb. 38. Kennlinien für die Nutzbremung beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor.

Soll der Nebenschlußmotor Strom ins Netz geben, 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 übersteigt, denn es ist:

$$\left. \begin{array}{l} \text{für den Motor} \quad E_a = U - I_a \cdot R_a, \\ \text{für den Generator} \quad E_{a,G} = U + I_a \cdot R_a. \end{array} \right\} \quad (43)$$

Daß eine solche Arbeitsweise nicht nur möglich ist, sondern im praktischen Betriebe öfters zur Anwendung kommt, zeigt Abb. 38. Das Arbeitsbild ist dem elektrischen Antriebe einer Hobelmaschine entnommen; es läßt deutlich den Verlauf der Leistungsaufnahme und -rückgabe erkennen. Der Motor hat eine Leistung von 20 kW bei 440 V 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 den Grenzen zwischen 1 und 2,5. Die Kennlinien in Abb. 38 sind mit einem Oszillo-

graphen aufgenommen worden, entsprechen also den tatsächlich aufgetretenen Augenblickswerten.

Die durch die Kennlinie eingeschlossene Fläche A zeigt die dem Netze entnommene Leistung, um den Hobeltisch mit Antriebsvorrichtung und den Motor von der niedrigsten Tischgeschwindigkeit aus stillzusetzen und auf die gleich große Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung zu beschleunigen. Die Fläche C zeigt die Reibungsarbeit, während die Fläche B die für die Beschleunigung der Massen von der Geschwindigkeit 1 auf 2,5 notwendige Leistung andeutet. Vor dem Umsteuern wird das Feld verstärkt, und der Teil D der Arbeit (abzüglich C) wieder für das Netz vom Motor in seiner Wirkung als Generator gewonnen. Abb. 38 läßt leicht erkennen, daß die wiedergewonnene elektrische Leistung nur wenig geringer als die vorher aufgewendete Beschleunigungsleistung B ist. Die untere Kennlinie zeigt in jedem Augenblicke die entsprechende Drehzahl des Motors.

Unter Umständen kann durch die Nutzbremmung eine recht beträchtliche Stromersparnis innerhalb einer bestimmten Arbeitszeit 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.

6. Der Gleichstrom-Doppelschlußmotor.

Unter Doppelschlußmotor versteht man ganz allgemein einen Motor mit zwei Wicklungen, von denen die eine im Hauptschluß und die zweite im Nebenschlusse zum Anker liegt. Ein besonderer Unterschied besteht darin, ob ein Hauptschlußmotor noch mit einer Nebenschlußwicklung oder ein Nebenschlußmotor noch mit einer Hauptschlußwicklung versehen wird. Beide Arten kommen zur Ausführung, und sie haben dann ihre bestimmte Arbeitsweise.

Wie bereits angegeben, hat der Hauptschlußmotor 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 versehen. Da jetzt eine Nebenschlußerregung vorhanden ist, wird sich der Verlauf der Magnetisierungs- und der Drehzahlkennlinie in Abb. 5 und 7 ändern. In Abb. 39 ist diese Verschiedenheit vergleichsweise zur Darstellung gebracht. Die Leerlaufkennlinie verschiebt sich von I nach II , und unter Benutzung dieser Kennlinie II findet man die neue Drehzahlkennlinie $n'n'$ nach dem gleichen zeichnerischen Verfahren wie für die Ermittlung der ursprünglichen n -Linie. Aus Abb. 39 ist zu ersehen, daß die $n'n'$ -Linie einen flacheren Verlauf hat, als die ursprüngliche Drehzahlkennlinie und die Ordinatenachse in einem Punkte p schneidet, weil die Nebenschlußwicklung auch bei der Belastung ($I=0$) ein Feld erzeugt, das das Durchgehen des Motors verhindert.

Dem Nebenschlußmotor eine Hauptschlußwicklung zu geben, kann aus zweierlei Gründen erwünscht sein. Einmal kann die Drehzahl dieses Motors, wenn man sich des auf S. 27 Gesagten er-

innert, durch die zusätzliche Wicklung bei allen Belasteten praktisch unverändert gehalten werden. Dann also hat die Hauptschlußwicklung den Zweck, die Verschiedenheiten der Einflüsse von Ohmschem Spannungsverlust und Ankerrückwirkung auf die Drehzahl auszugleichen. Eine vollkommen gleichbleibende Drehzahl kann aber auch hierdurch nicht erzielt werden, weil die Ankerrückwirkung nicht unmittelbar abhängig vom Strome ist. Aus diesem Grunde wird diese Schaltung für solche Zwecke nicht angewendet.

Wird jedoch vom Nebenschlußmotor ein größeres Anlaufmoment verlangt, als dieser Motor mit reiner Nebenschlußerregung zu entwickeln imstande

ist, so kann dies mit Hilfe einer zusätzlichen Hauptschlußwicklung erreicht werden. Dabei empfiehlt es sich aber, nach Beendigung des Anlaufes die Hauptschlußwicklung abzuschalten, um einmal den Wirkungsgrad, wenn auch nur um ein wenig, zu erhöhen, und ferner bei starker Hauptschlußwicklung dem Motor für den Leerlauf nicht Hauptschlußmotor-Eigenschaft zu geben. Läßt

sich das Abschalten der Zusatzwicklung im Betriebe nicht durchführen, dann muß mit Rücksicht auf das zuletzt Gesagte der Motor noch mit einer Hilfswicklung versehen werden.

Drehzahl und Drehmoment lassen sich für den Doppelschlußmotor nicht in gleicher Weise durch einfache Gleichungen zur Darstellung bringen wie für die Motoren mit reiner Schaltung, denn es werden M_d und n naturgemäß in erster Linie davon abhängen, welche Betriebs-eigenschaft überwiegen soll.

7. Die Regelung des Gleichstrom-Doppelschlußmotors.

Das Anlassen und die Regelung erfolgen nach der Grundschatung des Motors, also ohne Berücksichtigung der zweiten Wicklung. In Abb. 40 bis 43 sind die Schaltungen für Rechts- und Linkslauf solcher Motoren ohne und mit Wendepolen dargestellt. Von einer besonderen Erklärung kann abgesehen werden, nur ist darauf aufmerksam zu machen, daß bei der Umkehr der Drehrichtung die Hauptschluß-

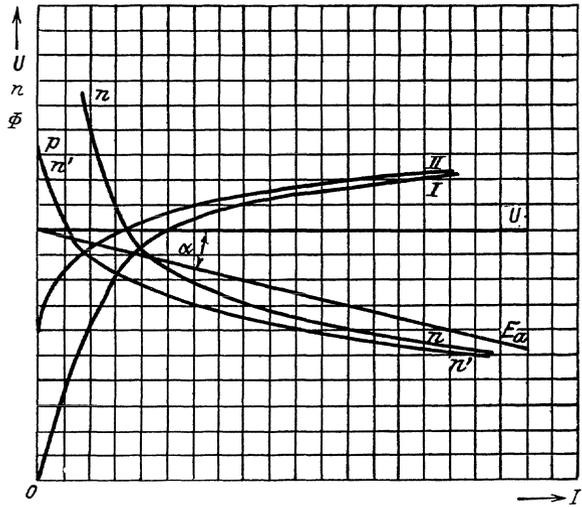
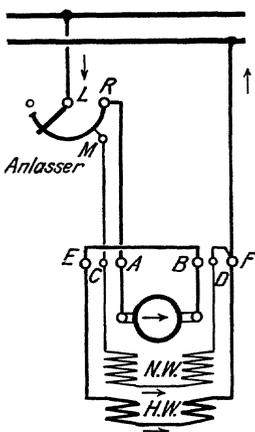
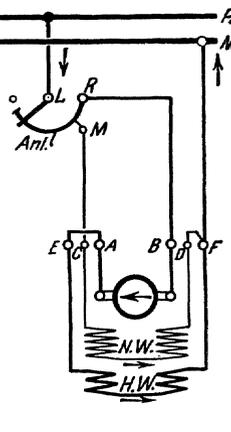


Abb. 39. Betriebskennlinien für den Gleichstrom-Doppelschlußmotor.

wicklung nicht mit umgeschaltet werden darf, wenn die Ankerklemmen vertauscht werden (Abb. 41 und 43). — Bei Walzenzug-



Rechtslauf eines Gleichstrom-Doppelschlußmotors. Abb. 40.

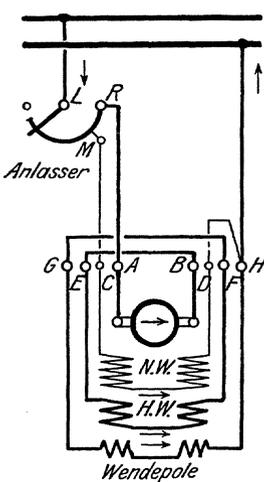


Linkslauf eines Gleichstrom-Doppelschlußmotors. Abb. 41.

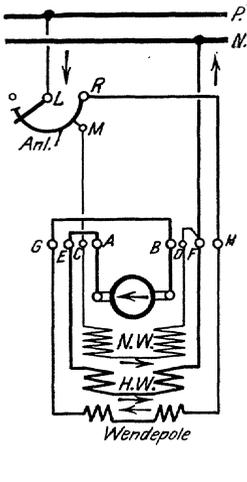
motoren, die beispielsweise mit bis 100 vH Überlastung anlaufen müssen, verwendet man gleichfalls gemischte Nebenschluß- und Hauptschlußerregung und versieht den Motor außerdem noch mit Wendepolen. Die Nebenschlußwicklung dient zur Einstellung der Grunddrehzahl je nach dem zu verarbeitenden Walzgute, während mit der Hauptschlußwicklung durch einen Widerstandsregler der Schlupf in der Weise eingestellt

wird, daß der Motor genau nach der Art des Walzgutes mit der Drehzahl nachgibt und damit die Schwungmassen (Schwungräder) zur Gel-

tung kommen läßt. Hierdurch werden die großen Schwankungen in der Stromaufnahme und damit die Stromstöße auf das Netz erheblich gemildert.



Rechtslauf eines Gleichstrom-Doppelschlußmotors mit Wendepolen. Abb. 42.



Linkslauf eines Gleichstrom-Doppelschlußmotors mit Wendepolen. Abb. 43.

8. Die Schalt-, Sicherungs- und Meßgeräte.

Die Geräte, die für das Ein- und Ausschalten des Motors, die Sicherung desselben gegen unzulässige Überlastung und die Beaufsichtigung bzw. Prüfung des guten Arbeitens notwendig sind, sind sowohl in ihrer Einzeldurchbil-

dung als auch in ihrer Gesamtzusammensetzung für das Schaltbild recht mannigfaltig. Von der eingehenderen Beschreibung der baulichen Einzelheiten der zur Verwendung kommenden Geräte soll abgesehen werden, weil darüber im IV. Bande das Notwendige zu finden

ist. Es werden vielmehr wiederum nur die Gesichtspunkte erläutert, die für die Wahl der Geräte grundsätzlich bestimmend sind. Zudem geben die Preislisten der Firmen über alle Einzelheiten der Bauart und Wirkungsweise zumeist erschöpfende Auskunft.

Je nach der Größe des Motors sind erforderlich für das Ein- und Ausschalten einpolige bzw. zweipolige Hebel- oder Walzenschalter, für die Sicherung gegen Überlastung des Motors selbst bzw. des Netzes bei Fehlern im Motor Patronensicherungen, Streifensicherungen und selbsttätig arbeitende Überstromschalter (Selbstschalter) und für die Sicherung gegen Ausbleiben der Spannung Spannungsrückgangsschalter. Da die Art der Sicherung auch die Wahl des Schalters bestimmt, soll zunächst über die einfache Schmelzsicherung einiges besonders Beachtenswertes gesagt werden.

Ganz allgemein spielt für jede Sicherungsart die Zuverlässigkeit die Hauptrolle. Hierin kommt einer Schmelzsicherung nicht die gleiche Wertigkeit zu wie dem Selbstschalter. Nach den VDE-Vorschriften¹ sollen die Schmelzsicherungen den in der Zahlentafel I angegebenen Bedingungen entsprechen:

Zahlentafel I.

Nennstrom A	Kleinster Prüfstrom ohne abzuschmelzen	Abschmelzstrom (größter Prüfstrom und) Belastungsdauer bis zum Abschmelzen
6 bis 10	1 Stunde 1,5mal Nennstrom	2,10mal Nennstrom 1 Stunde
15 bis 25	1 Stunde 1,4mal Nennstrom	1,75mal Nennstrom 1 Stunde
35 bis 60	1 Stunde 1,3mal Nennstrom	1,60mal Nennstrom 1 Stunde
80 bis 200	2 Stunden 1,3mal Nennstrom	1,60mal Nennstrom 2 Stunden

Zumeist werden die Sicherungen derart hergestellt, daß sie sich erst zu erwärmen beginnen, wenn der Nennstrom auf den 1,6fachen Wert angewachsen ist. Infolgedessen kann der Motor zum mindesten ständig bis zum 1,6fachen Wert seines Nennstromes überlastet werden, ohne daß ihm die Schmelzsicherung hiergegen Schutz bietet. Für eine derartige dauernde Überlastung ist der Motor gewöhnlich nicht gebaut. Die Motorwicklungen werden sich daher zu stark erwärmen, die Isolation trocknet aus und der Motor wird frühzeitig zerstört werden. Noch ungünstiger werden die Verhältnisse bei Motoren für aussetzende Betriebe mit kurzzeitigen Überlastungen, weil dann die Schmelzsicherungen den Überlastungen angepaßt werden müssen. Es ist daher hinsichtlich der Benutzung von Sicherungen besondere Vorsicht zu üben. Können Überlastungen nicht vorkommen, so besteht bei kleineren Motoren für Eigenanlagen gegen ihre Verwendung zumeist kein Bedenken.

Das Auswechseln von Sicherungspatronen oder Schmelzstreifen erfordert naturgemäß Zeit, was im Betriebe oft recht unerwünscht ist, verursacht Kosten für den Ersatz und bedingt einen ständigen Vorrat an verschiedensten Ersatzstücken, der zweckmäßig bei den Motoren

¹ Vorschriften für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial des VDE.

unterzubringen ist. Daß hierbei oftmals Ersatzstücke fehlen werden oder nicht sofort zur Hand sind, der Betriebsingenieur also selbst bei größter Sorgfalt und insbesondere in größeren Betrieben solche Schwierigkeiten nicht immer vermeiden kann, ist eine Tatsache, die nicht unerwähnt bleiben soll. Auch dieses ist daher bei der Wahl der Sicherungsform zu beachten.

Die selbsttätigen Überstromausschalter arbeiten derart, daß durch das Einschalten des Hebels zur Herstellung der Stromverbindung z. B. eine Klinke gespannt wird, die sich als Anker über einem vom Motorstrom durchflossenen Elektromagneten befindet. Übersteigt der Strom eine bestimmte einstellbare Grenze, dann wird die Klinke angezogen, gibt den Hebel frei und letzterer wird durch Federkraft sofort aus dem Kontaktschuh gezogen. Ein solcher Schalter, der ein- oder auch zweipolig hergestellt wird, gewährt demnach nicht nur die beste Sicherung, sondern auch den Vorteil, daß der Stromkreis nach Behebung der Ausschaltursache sofort wieder geschlossen werden kann, oder das erneute Einschalten ein sofortiges abermaliges Ansprechen des Schalters herbeiführt, solange der Fehler noch besteht. Ein solcher Schalter kann auch mit einer Zeiteinstellung für die Dauer einer bestimmten Überlastung versehen werden. Auf eine zweite Ausführungsform soll weiter hingewiesen werden, deren Überstromauslösung mit Zeiteinstellung nicht nach dem beschriebenen elektromagnetischen, sondern nach dem thermischen Grundsatz arbeitet. Bei dieser wird eine Vorrichtung, z. B. ein Metallfaden, vom Strome durchflossen und mit wachsender Stromstärke so erhitzt, daß er bei einer bestimmten Temperatur durch seine Längenveränderung eine Auslösung des Schalters herbeiführt. Ein solches thermisches Überstromrelais kann der zulässigen Betriebserwärmung des zu schützenden Motors besonders gut angepaßt werden und gibt daher noch besseren und zuverlässigeren Schutz als das nur auf einen bestimmten Überstrom mit Zeit eingestellte elektromagnetische Relais des Selbstschalters. Es wird daher das thermische Relais zweckmäßig dort zu wählen sein, wo die Höhe und die Zeitdauer der Überlastung nicht immer in bestimmten Grenzen gehalten werden können (Hebezeuge und ähnliche Antriebe). Mit der gesteigerten Wertigkeit des Sicherungsgerätes ist dann noch der besondere Vorteil verbunden, daß der Motor nicht mehr zu groß, sondern der tatsächlichen Leistung entsprechend gewählt werden kann und somit während der längeren Betriebszeit in einem Belastungsbereich arbeitet, in dem er den besten Wirkungsgrad besitzt. Auch preislich wird sich dieser Vorzug oft nicht unerheblich bemerkbar machen.

Der Spannungsrückgangsschalter oder ein Spannungsschutz arbeitet in ähnlicher Form wie die elektromagnetische Überstromeinrichtung nur mit dem Unterschiede, daß an Stelle der Stromspule eine Spannungsspule tritt. Beide Schalterauslösungsformen werden auch zusammengefaßt für nur einen Schalter ausgeführt. Neuerdings werden die Überstrom- und Spannungsrückgangseinrichtungen auch unmittelbar mit dem Anlasser in Sonderausführungen vereinigt (Abb. 44), um

immer mehr an Geräten selbst, sowie an Platz und Beschaffungskosten zu sparen, Fehlerquellen zu beseitigen und Betriebsvereinfachungen zu gewinnen.

Hinsichtlich der Verwendung entweder einfacher Handschalter und Sicherungen oder Selbstschalter sind folgende Richtlinien maßgebend. Nach den VDE-Vorschriften muß zunächst jeder Motor im Stillstand allpolig vom Netz getrennt sein, damit er auch gegen Erde spannungsfrei ist. Das erfordert also entweder zwei einpolige oder besser einen zweipoligen Schalter. Weiter muß der Motor allpolig gegen Überlastungen gesichert werden, das geschieht durch die erwähnten Patronen- oder Streifensicherungen. Diese Ausrüstung in jedem Motorstromkreise genügt unter den bereits angegebenen Voraussetzungen für kleine Leistungen und ist gleichzeitig in der Anschaffung die billigste Form. In den Schaltbildern, Abb. 14 und 29, sind zweipolige Handschalter und Streifensicherungen gezeichnet.

Bei kleinen Motoren, die durch das Einlegen des Schalters unmittelbar in Betrieb gesetzt werden, also keinen Anlasser erhalten, sind die Sicherungen für den 2fachen Nennstrom zu bemessen. Um den damit verbundenen Nachteil, daß der Motor im Betriebe noch weiter unzulässig hoch gesichert ist, zu vermeiden, verwendet man besser einen Walzenschalter mit zwei Stellungen, der dergestalt ausgebildet ist, daß der Motor in der Stellung 1 ohne Vorschaltung von Sicherungen an das Netz gelegt wird, und nach erfolgtem Anlauf in Stellung 2 die dann richtig für den Nennstrom bemessenen Sicherungen eingeschaltet werden. Abb. 60 zeigt das Schaltbild eines solchen Walzenschalters für Drehstrom, der entsprechend für Gleichstrom zweipolig ist.

Zu der Lage der Sicherungen und Schalter im Stromkreise ist zu bemerken, daß, sofern Streifensicherungen benutzt werden, von den Sammelschienen gerechnet zunächst der Schalter und erst dann die Sicherungen anzuordnen sind, damit letztere durch das Öffnen des Schalters spannungsfrei werden und die Auswechslung der Schmelzstreifen gefahrlos vorgenommen werden kann (Abb. 14). Bei Patronensicherungen ist diese Folge nicht unbedingt einzuhalten, weil die Patronen auch unter Spannung auswechselbar sind.

Eine andere Ausrüstung des Motorstromkreises für größere Motoren in rauen Betrieben, die nicht ständig bedient bzw. bewacht werden, ist in den Schaltbildern Abb. 15 und 17 gewählt worden, und zwar ein Handschalter *Sch.* mit einer Sicherung *S.* in einem Pole der Zuleitung und ein Überstromselbstschalter *Sch.*_{max} im zweiten Pole. Hier sind also zwei Sicherungen verschiedener Art benutzt. Der Zweck dieser Stromkreis-ausrüstung liegt in der Hauptsache darin, daß die eine Sicherungsart die andere überwacht, daß also beim nicht ordnungs-

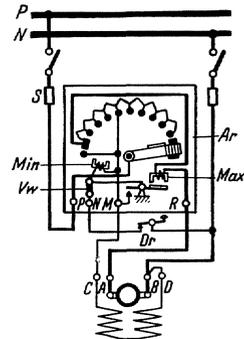


Abb. 44. Anlasser mit selbsttätiger Ausschaltung bei Überstrom (*Max*) und Spannungsrückgang (*Min*). *V_w*-Vorschaltwiderstand.

mäßigen Arbeiten des selbsttätigen Schalters z. B. infolge Klebenbleibens des Schaltmessers im Kontaktschuh durch Anschmörung oder andere Ursachen die Sicherung *S.* bei Überlastung anspricht und umgekehrt. Da die Selbstschalter wie alle solche Geräte, die Gleitbahnen, Federn usw. besitzen, einer gewissen Wartung bedürfen, wenn sie stets zuverlässig arbeiten sollen, wird diese doppelte Sicherungsform für motorische Antriebe empfehlenswert sein, die solcher Wartung nicht ständig unterliegen.

Um den Schmelzstreifenersatz schließlich ganz zu vermeiden, insbesondere auch für alle Motoren großer Leistung mit stark wechselnder Belastung und häufiger Überlastung, wählt man am vorteilhaftesten den doppelpoligen Überstromschalter, der allen Betriebsforderungen hinsichtlich Sicherheit und schneller Schaltbereitschaft entspricht. Der Beschaffungspreis spielt dann zumeist keine nennenswerte Rolle mehr.

Ist damit zu rechnen, daß die Spannung für den Motor ausbleiben kann, so muß unter allen Umständen dafür gesorgt sein, daß sämtliche Motorstromkreise sofort abgeschaltet bzw. die Anlasser in die Anlaßstellung zurückgebracht werden, damit beim plötzlichen Wiederkehren der Spannung die Motoren nicht anlaufen und sich dann selbst, sowie die angetriebenen Maschinen und ihre Bedienung gefährden. Je nach der Größe der einzelnen Motoren und der Ausdehnung der Anlage ist daher entweder jeder Motor mit einem Spannungsrückgangsschalter oder einem Überstromschalter mit Spannungsauslösung zu versehen, oder es sind mehrere kleine Motoren zusammenzufassen und deren Hauptstromzuführung entsprechend zu sichern. Im letzteren Falle ist dann aber mindestens bei allen Motoren, die nicht ständig bedient werden, sofern sie mit Anlassern anzulassen sind, der Anlasser derart zu wählen, daß die Anlaßkurbel beim Sinken oder Ausbleiben der Spannung selbsttätig in die Anlaßstellung zurückkehrt. Bei Fremdstrombezug sind diese von der Spannung abhängigen Sicherungsvorrichtungen besonders zu empfehlen.

Wie bereits gesagt können auch die Anlasser mit Sicherheitsgerät unmittelbar versehen werden. Die Schaltung eines solchen Anlassers, dessen Kurbel mit einem Überstromauslöser und zudem auch mit einem Spannungsrückgangsauslöser versehen ist, zeigt Abb. 44. Der Überstromauslöser wirkt beim Ansprechen auf den Haltemagneten des Spannungsauslösers, unterbricht dessen Stromkreis und gibt damit die Feder frei, die die Anlaßkurbel in die Ausschaltstellung zurückbringt.

Aus diesen Erläuterungen ist zu erkennen, daß der Entwurfs- und auch der Betriebsingenieur bei der Auswahl der Sicherungsgeräte besonders vorsichtig vorgehen muß und die einzelnen Betriebs- und Arbeitsverhältnisse, die Zuverlässigkeit der Bedienung, die Aufstellung von Motor und Schaltgerät und dgl. für jeden Fall zu prüfen hat, um daraus das Zweckmäßigste zu bestimmen. Wohl zu beachten ist dabei, daß hierin nicht zu viel, aber auch nicht zu wenig getan werden darf.

Als Meßgeräte, die ebenfalls im IV. Band eingehender behandelt sind, kommen — in der Regel jedoch nur bei größeren Motoren —

Stromzeiger, Spannungszeiger und Zähler zur Verwendung (Abb. 14). Überall dort, wo mit Rücksicht auf die anzutreibende Maschine vorsichtig angelassen werden muß, oder wo die Leistung, 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 einzubauen. Über der Meßlinie der Stromwerte soll zweckmäßig noch eine in kW geeichte zweite Meßlinie und bei dem Vollastwerte von Strom bzw. Leistung ein roter Strich angebracht sein, damit der den Motor Bedienende stets bequeme Übersicht hat und einwandfreie Ablesungen vornehmen kann.

Spannungszeiger sind bei Gleichstrommotoren selten notwendig. Sie sind hier auch nur von geringem Werte und zumeist nur für die Betriebsleiter vorhanden. Es ist bei allen Anlagen, die nicht von technischem Personal bedient werden, an Meßgeräten tunlichst zu sparen, weil erfahrungsgemäß der einfache Arbeiter, der einen Motor zu bedienen hat, sicherer seine ihm aufgetragenen Handgriffe verrichtet, wenn er nicht viel mit Meßgeräten 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 elektrischen Arbeit dienen, soll 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 ebenfalls zu sparen, dafür besser getrennte Stromkreise für Licht und Kraft anzulegen und den Stromverbrauch für mehrere Motoren durch einen Zähler festzustellen, der dann an der geeignetsten Stelle eingebaut, somit leicht bedient und gewartet werden kann. Dieses ist von vornherein dann erforderlich, wenn der elektrische Strom von einer fremden Anlage bezogen wird, weil der Strompreis für Kraft immer billiger ist als der für Licht. Sind Einzelzähler nicht zu vermeiden, so dürfen dieselben an oder in unmittelbarer Nähe solcher Maschinen, die Erschütterungen aufweisen oder verursachen, nicht angebracht werden, da sie sonst bald nicht mehr zuverlässig arbeiten. Schließlich ist jeder Zähler und jedes andere Meßgerät stets derart in seiner Lage zu der zugehörigen Maschine zu befestigen, daß die Ablesung bequem vorgenommen werden kann.

Zur Aufstellung des Anlagers ist weiter zu bemerken, daß derselbe unmittelbar zum Motor gehört und deshalb nicht an einer Hauptschalttafel oder in größerer Entfernung vom Motor unterzubringen ist. Genau so wie das Dampfventil sich an der Dampfturbine befindet, soll auch der Anlasser beim Motor stehen, damit man sich vor dem Anlassen stets davon überzeugen kann, 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 immer in die unmittelbare Nähe des Motors, damit man sie jederzeit zur Hand hat. Die Lieferfirmen bauen heute

für alle Fälle zweckmäßige Schaltkästen und andere Schalteinrichtungen, auf die hier nur andeutungsweise hingewiesen sein mag.

Für den Nebenschlußmotor bedarf der Anlasser besonderer Erwähnung. Jeder Anlasser für diese Motorgattung muß derart ausgebildet sein, daß das Magnetfeld, noch bevor der Anker Strom erhält, bereits voll vorhanden ist, daß dasselbe also früher eingeschaltet wird als der Anker. Anderenfalls würde der Motor eine unzulässig hohe Drehzahl annehmen. Dasselbe gilt umgekehrt beim Stillsetzen, d. h. die Feldwicklung darf erst dann abgeschaltet werden, wenn der Ankerstromkreis bereits unterbrochen ist.

In Abb. 27 bis 31 ist daher der eine Pol der Magnetwicklung an den Anlasser gelegt und dadurch das oben Gesagte angedeutet. In der praktischen Ausführung des Anlassers mit Kreisbewegung der Kurbel wird eine zu der Kontaktbahn für das Ab- bzw. Zuschalten von Widerstandsstufen gleichlaufende zweite 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 auf diese Weise der oben gestellten Bedingung entsprochen wird. In Abb. 32 und 33 ist die Magnetwicklung 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 Selbststerregung eine Leitung bis zum Schalter bzw. den Sammelschienen.

Ist der Anlasser mit einer besonderen Ausschaltstellung versehen, auf der der eine Pol des Motors vollständig von den Sammelschienen abgetrennt wird, 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 Sicherung hinter den Anlasser, also zwischen Anlasser und Motor zu legen, damit sie im Bedarfsfalle ohne Spannung gegen Erde ausgewechselt werden kann. Die Sicherung schützt in diesem Falle aber nicht den Anlasser. Man sollte aus diesen Gründen daher stets auch bei jedem Nebenschlußmotor einen doppelpoligen Ausschalter einbauen.

Steht der Motor still, dann erst darf und muß auch der Magnetstromkreis geöffnet werden, denn anderenfalls 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), weil im Stillstande die Kühlung für die Magnetwicklung fehlt, die im Betriebe durch den umlaufenden Anker entweder in natürlicher Form oder mit Unterstützung durch besonders angebaute Lüfterflügel hervorgerufen wird, und die bei der Berechnung des Drahtquerschnittes der Feldwicklung berücksichtigt worden ist.

Ist die Magnetwicklung nicht mit dem Anlasser verbunden, sondern unmittelbar vom Netze 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. 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 in Abb. 32 und 33 eingetragen und in Abb. 45 und 46 dargestellt ist. Dieser Magnetschalter ist derart gebaut, daß der Strom beim Ausschalten nicht plötzlich unterbrochen wird, sondern allmählich bis zum Nullwerte herabsinkt. Zumeist wird ein induktionsfreier Widerstand benutzt, der mit der Magnetwicklung nach der Abtrennung von der Stromquelle in Reihe liegt (Abb. 45). Im Augenblicke des Ausschaltens des Motorstromkreises wird mittels eines besonderen Schalters ein neuer 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 Augenblicksschalters erfolgt, dessen Bauart ein solcher Schalter aufweisen muß.

Die Bedienung des Schalters erfolgt durch einen einzigen Handhebel. An diesem Handhebel H_1 ist außer dem Schaltmesser, das die Stromquelle abschaltet, noch ein zweiter Hebel H_2 befestigt, durch den der induktionsfreie Widerstand R eingeschaltet wird. Der Widerstand ist in Form einer kleinen Spule auf der Schaltergrundplatte angebracht (Abb. 46) und trägt einen Kontakt, der mit dem einen Ende der Spule verbunden ist.

Solche Magnetausschalter dienen auch zum Ausschalten von Bremsmagneten und ähnlichen, Eisen enthaltenden Stromkreisen und werden ein- und zweipolig 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 ist.

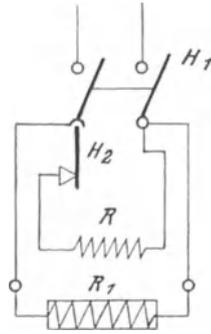


Abb. 45. Schaltbild eines Magnetausschalters.

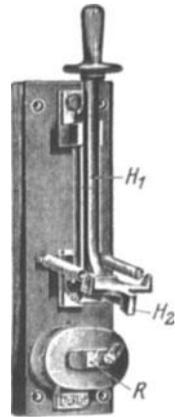


Abb. 46. Einpoliger Hand-Magnetausschalter.

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

9. 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 elektrische Leistungen handelt, bei Gleichstrom bald an eine Grenze, die durch die Höhe der benutzbaren Spannung und den Spannungsverlust gezogen ist. Gleichstrommotoren über 500 bis im Höchsthalle 750 V (mit Ausnahme der elektrischen Bahnen und vereinzelter besonderer Fälle, bei denen man heute bis 4000 V geht), werden für die Zwecke des Arbeitsmaschinenantriebes nicht mehr verwendet, weil sie in der Erzielung funkenfreier Stromwendung Schwierigkeiten machen und sehr reichliche Abmessungen erhalten müssen, im Preise demzufolge stark steigen und einer besonders sorgfältigen Wartung bedürfen, um Betriebsstörungen zu vermeiden. Außerdem gelten Anlagen über 500 V — über 250 V zwischen Leiter und Erde — nach den Errichtungsvorschriften des VDE bereits als Hochspannungsanlagen und sind infolgedessen besonderen Ausführungsbestimmungen unterworfen. Ist aber eine hohe Spannung allgemein vorhanden, dann müßte sie für Motoren kleinerer Leistung herabgesetzt werden, was bei Gleichstrom nur durch Umformer möglich ist und die Gesamtanlage nicht nur ganz erheblich verteuert, sondern auch den Gesamtwirkungsgrad unwirtschaftlich beeinflußt. 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 die Gleichstrommotoren selbst für die größten Leistungen und die schwersten Betriebsverhältnisse, wie sie in Hütten- und Walzwerken vorkommen, mit vollkommenerer 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- und mehrphasigen Wechselstrommotor zu verwenden, wenn es die Bedingungen, die an den Antriebsmotor gestellt werden, nur irgend gestatten (Anlaufmoment, 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. Andererseits liegt ein gewisser Zwang vor, Wechselstrom als Stromart wählen zu müssen, wenn als Stromlieferer ein Überlandwerk herangezogen werden soll, das nur Drehstrom verteilt.

Auch die Ein- und Mehrphasenstrommotoren genügen in ihrer Arbeitsweise heute allen Bedingungen, die durch die Arbeitsmaschinen und die Betriebsverhältnisse gefordert werden¹.

Allgemeine Gleichungen, wie für die Gleichstrommotoren entwickelt wurden, lassen sich für die Wechselstrommotoren nicht aufstellen, denn man unterscheidet bei letzteren je nach der Bauart zwischen: Induktions- und Kollektormotoren. Beide Bauformen werden sowohl für Mehrphasen- wie auch für Einphasenstrom hergestellt.

Die Induktionsmotoren werden eingeteilt in: synchrone und asynchrone, d. h. in solche, die mit einer durch die Frequenz des zugeführten Stromes und die Polzahl unverändert festgelegten, mit den Stromerzeugern im Synchronismus (Phasen- und Frequenzgleichheit) befindlichen Drehzahl laufen, und solche, die von dieser synchronen Drehzahl abweichen. Das Magnetfeld der Synchronmaschine wird mit Gleichstrom, das der Asynchronmaschine mit Wechselstrom erregt. Über die Synchronmotoren wird im II. Abschnitte ausführlicher gesprochen; sie kommen nur verhältnismäßig selten und für ganz bestimmte Fälle zur Verwendung.

Der asynchrone Dreiphasen- oder -Drehstrommotor wird in der Behandlung vorangestellt, weil dieser für den Arbeitsmaschinenantrieb die häufigste Verwendung findet.

Wie schon hier bemerkt sein soll, ist man in den letzten Jahren durch eine außerordentlich große Zahl von Ausführungsformen und Schaltungen bestrebt gewesen, den Asynchronmotor immer mehr den vorzüglichen Betriebseigenschaften der Gleichstrommotoren gleichzumachen, gezwungen einmal durch die gesteigerten Leistungen und die räumliche Ausdehnung der Betriebe, dann aber auch, wie schon angedeutet, durch die Verbreitung der Großkraftübertragung und der sich aus ihr gegenüber der Eigenanlage ergebenden Wirtschaftlichkeit. Von den mannigfaltigen Ausführungen in schaltungstechnischer Hinsicht werden indessen nur die hauptsächlichsten besprochen werden.

10. Der asynchrone Drehstrom-Induktionsmotor.

Der Aufbau des Motors muß als bekannt vorausgesetzt werden. Die Arbeitsweise ist kurz folgende: Fließt durch den mit einer Dreiphasenwicklung versehenen Ständer (Stator) ein Strom, so wird ein Drehfeld erzeugt, das aber auf den Läufer (Rotor) so lange keine mechanische Einwirkung ausübt, solange die Läuferwicklung offen ist. Der Motor steht still. Der von der Ständerwicklung aufgenommene Strom — der Magnetisierungsstrom I_m — ist nur so groß, daß das von ihm erzeugte Drehfeld eine der zugeführten Spannung U entsprechende EMK E_1 in der Ständerwicklung induziert, die gleich ist U , wenn der vom Magnetisierungsstrom hervorgerufene Spannungsabfall in der Ständerwicklung unberücksichtigt bleibt. In der Läuferwicklung wird eine annähernd gleich große EMK E_2 erzeugt, die die gleiche Frequenz besitzt wie E_1 .

¹ Schenkel: Neue Anwendungsmöglichkeiten asynchroner Großmaschinen. ETZ 1927, Heft 17 u. 18.

Mißt man die Spannung an den Enden der Läuferwicklung, so ist $E_2 \cong U$, und wenn mit w_1 bzw. w_2 die Windungszahlen jeder Phase der Ständer- bzw. Läuferwicklung bezeichnet werden, ist bei Stillstand:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1}{U_2} &\cong \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} * \\ \nu_1 &= \nu_2 = \frac{p_1 \cdot n_1}{60} \\ I_1 &= I_m, \quad I_2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Daraus ist ersichtlich, daß der asynchrone Motor im Stillstande gleich ist einem Transformator mit offener Sekundärwicklung.

Schließt man die Läuferwicklung entweder unmittelbar oder über einen Widerstand kurz, so wird von dem Ständerdrehfelde auf den Läufer ein Drehmoment ausgeübt. Das sich drehende magnetische Feld des Ständers schneidet die nun ebenfalls stromführende Läuferwicklung, ruft Zugkräfte hervor und versetzt den Läufer in Drehung. Da die durch die elektrischen und mechanischen Verluste bedingten Widerstände nicht verschwindend klein gemacht werden können, ist die Winkelgeschwindigkeit des Läufers kleiner als die des Drehfeldes. Die Drehzahl des Läufers ist also nicht die gleiche (synchrone) wie die des Ständerdrehfeldes; hieraus rührt die Bezeichnung „asynchron“ her. Das Zurückbleiben des Läufers gegenüber dem Ständerdrehfelde nennt man die Schlüpfung.

Die besonderen Eigenschaften bei den verschiedenen Betriebsverhältnissen sollen nun wiederum an Hand von Gleichungen, Schaulinien und des sog. Spannungsdiagrammes betrachtet werden.

Bezeichnen:

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

n_1, n_2 die Drehzahlen des Ständerdrehfeldes bzw. des Läufers,

ν_1 die Frequenz des zugeführten Stromes,

ν_2 „ „ „ „ Stromes in der Läuferwicklung,

p die Polpaarzahl der Ständerwicklung,

so ist die Schlüpfung:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}, \quad (45a)$$

oder auch, da:

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \frac{2\pi \cdot n_1}{60}, & \omega_2 &= \frac{2\pi \cdot n_2}{60}, \\ s &= \frac{n_1 - n_2}{n_1} \end{aligned} \right\} \quad (45b)$$

* Der Einfachheit wegen sollen die besonderen, von der Wicklung abhängigen Werte — Wicklungswerte — unberücksichtigt bleiben. Näheres siehe Arnold, E.: Die Wechselstromtechnik. Bd. 5, I. Berlin: Julius Springer.

bzw. in vH ausgedrückt:

$$s\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100, \quad (46)$$

d. h. z. B. bei 3 vH Schlüpfung ist $s = 0,03$.

Aus Gl. (45) folgt die Drehzahl des Läufers:

$$n_2 = n_1 (1 - s), \quad (47)$$

und da:

$$n_1 = \frac{60 \cdot \nu_1}{p},$$

geht Gl. (47) über in:

$$n_2 = \frac{60 \cdot \nu_1}{p} (1 - s), \quad (48)$$

d. h. die Drehzahl des Läufers steht in Übereinstimmung mit der Frequenz des zugeführten Stromes und ist abhängig von der Polzahl des Ständers, sowie von der Größe der Schlüpfung.

Die Schlüpfung wird mit zunehmender Belastung größer, also n_2 kleiner. Es ist:

bei Stillstand $s = 1$, $n_2 = 0$,

„ Synchronismus $s = 0$, $n_2 = n_1$.

Die synchrone Drehzahl kann der Läufer nicht erreichen. Da s im Höchstfalle bei kleinen Motoren bis zu 5 vH und bei großen bis zu 3 vH 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-Nebenschlußmotor. Aus den Betriebskennlinien Abb. 47 ist der Verlauf der Drehzahl (nn) ersichtlich.

Der in der Läuferwicklung fließende Strom I_2 hat eine andere Frequenz $\nu_{2,s}$ als der Ständer- also der Netzstrom, und zwar ist:

$$\nu_{2,s} = \frac{p \cdot n_1 \cdot s}{60} = \frac{p \cdot n_s}{60}. \quad (49)$$

Die in der Läuferwicklung induzierte Spannung ist:

$$E_{2,s} = s \cdot E_2, \quad (50)$$

und der von ihr erzeugte Läuferstrom:

$$I_2 = \frac{E_{2,s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2,s}^2}} = \frac{s \cdot E_2}{\sqrt{r_2^2 + (s \cdot x_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}, \quad (51)$$

worin bezeichnet:

r_2 den effektiven Ohmschen Widerstand,

$x_{2,s} = s \cdot x_2$ die Reaktanz

einer Phase der Läuferwicklung, letztere in Abhängigkeit von der Schlüpfung, weil die Reaktanz abhängig ist von der Frequenz und diese sich beim Laufe gegenüber der des Netzes ändert. x_2 gilt bei $\nu_1 = \frac{p \cdot n_1}{60}$, dagegen $x_{2,s}$ bei $\nu_{2,s} = s \cdot \nu_1$.

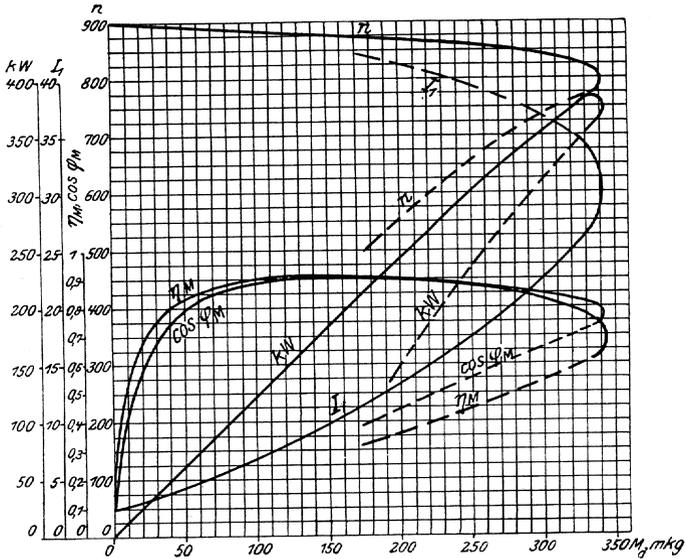


Abb. 47. Betriebskennlinien für den Drehstrom-Asynchronmotor.

Das Drehmoment M_d des Läufers kann sich von demjenigen des vom Ständer ausgeübten nur um soviel unterscheiden, als die vom Ständer auf den Läufer übertragene Leistung gegenüber der vom Läufer nutzbar abgegebenen, also durch den Verlust:

$$V_2 = N_a - N'_2 = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2. \quad (52)$$

m_2 bezeichnet die Anzahl der Phasen der Läuferwicklung. Da nun die übertragene Leistung $N_a = \omega_1 \cdot M_d$ und die nutzbar abgegebene Leistung $N_2 = \omega_2 \cdot M_d$, so folgt aus Gl. (52) das Drehmoment:

$$M_d = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2}{s \cdot \omega_1} \text{ Watt}, \quad (53)$$

bzw. durch Umformung und in mkg ausgedrückt:

$$\begin{aligned} M_d &= \frac{75 \cdot m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 \cdot p}{736 \cdot 2 \pi \cdot s \cdot \nu_1} \\ &= 0,0162 \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 \cdot p}{s \cdot \nu_1} \text{ mkg}. \end{aligned} \quad (54)$$

Ist r_R der Halbmesser einer auf der Motorwelle befestigten Riemenscheibe, so ist die Zugkraft am Umfange letzterer:

$$Z = 0,0162 \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 \cdot p}{r_R \cdot s \cdot \nu_1} \text{ kg}. \quad (55)$$

Wie aus Gl. (54) ersichtlich, steht das Drehmoment bei vollem Laufe des Motors, wenn der Läufer kurzgeschlossen ist, in Abhängigkeit von der sekundären Stromstärke, denn für diesen Fall kann die Gl. (54) auch in der Form geschrieben werden:

$$M_a = \text{const} \frac{I_2^2}{s},$$

und da die Schlüpfung abhängig von 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 Abb. 48 ist der Verlauf des Drehmomentes in Abhängigkeit von der Schlüpfung s bei verschiedenem sekundären Widerstande r_2 gezeichnet. Eine Änderung von r_2 kann, wie schon hier kurz bemerkt sein soll, durch Einschalten von besonderem Ohmschen Widerstande z. B. in Form eines regelbaren Anlassers in den Läuferstromkreis erfolgen. Weil dieser Fall häufig vorkommt, sollen die entsprechenden Kennlinien für M_a etwas eingehender betrachtet werden.

Der Verlauf des Drehmomentes nach der Kennlinie *A* der Abb. 48 ist in der Regel der übliche. Der Läufer sei kurzgeschlossen und demnach $r_2 = \text{const}$. Mit abnehmender Schlüpfung bzw. steigender Drehzahl nimmt das Drehmoment dann zunächst noch weiter zu, bis es bei einer bestimmten Schlüpfung seinen Höchstwert erreicht. Wird der Motor weiter belastet, dann kippt das Drehmoment um, d. h. es fällt rasch ab, und der Motor kommt zum Stillstande (Kippmoment). Das größte Drehmoment, was bei der üblichen Bauart vom Motor abgeben werden kann, beträgt in der Regel das 2fache des normalen. Der Motor ist demnach gewöhnlich bedeutend überlastungsfähig, bis er abfällt. Voraussetzung hierbei ist allerdings, daß die zugeführte Spannung unverändert bleibt, worauf weiter unten noch besonders eingegangen wird. Ist der Motor bis zum Stillstande überlastet und nicht inzwischen durch das Ansprechen der Sicherungen oder des selbsttätigen 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 Selbstschalter Vorsicht zu üben und das Kippmoment zu berücksichtigen.

Durch Änderung von r_2 kann nun M_a vergrößert werden, wie das die Kennlinien *B*, *C* und *D* der Abb. 48 erkennen lassen. Das geschieht allerdings auf Kosten des Wirkungsgrades, weil dabei selbstverständlich der Verlust V_2 bedeutend steigt. Man verwendet daher

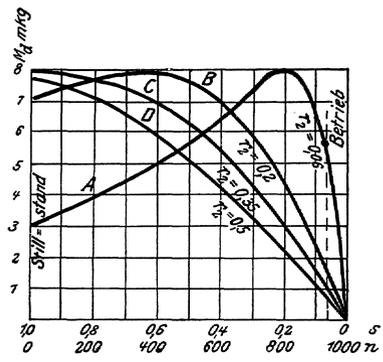


Abb. 48. Verlauf des Drehmomentes bei verschiedenem Läuferwiderstande.

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 bis zu einem bestimmten Maße überlastet werden kann, ohne abzufallen, andererseits η_M und die Drehzahl die größtmöglichen Werte erreichen.

Über den Verlauf des Anlaufmomentes und die Größe desselben wird bei den verschiedenen Anlaßformen besonders gesprochen werden.

Die dem Motor zuzuführende Leistung ist:

$$N_1 = m_1 \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_M. \quad (56)$$

Bringt man von dieser die Ständerkupfer- und -eisenverluste V_1 in Abzug, so ergibt sich diejenige Leistung, die vom Felde auf den Läufer übertragen wird:

$$\begin{aligned} N_a &= N_1 - V_1 = M_a \cdot \omega_1 \\ &= m_2 \cdot E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \psi_{2,s} \\ &= \frac{n_1}{n_s} m_2 \cdot E_{2,s} \cdot I_2 \cdot \cos \psi_{2,s}, \end{aligned} \quad (57)$$

worin:

$\psi_{2,s}$ den Winkel zwischen I_2 und E_2 (siehe Abb. 50)

und:

$n_s = s \cdot n_1 = n_1 - n_2$ die relative Drehzahl zwischen Drehfeld und Läufer, die sog. geschlüpfte Drehzahl

bezeichnen.

Der Teil von N_a , der in mechanische Leistung umgesetzt wird, ist:

$$\begin{aligned} N'_2 &= M_a \cdot \omega_2 = N_a \frac{\omega_2}{\omega_1} \\ &= \frac{n_2}{n_1} \cdot m_2 \cdot E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \psi_{2,s}. \end{aligned} \quad (58)$$

Werden von N'_2 die Verluste durch Lager- und Luftreibung (mechanische Verluste) und die durch Hysterese- und Wirbelströme (magnetische Verluste) abgezogen, so bleibt die an der Motorwelle nutzbar abgegebene Leistung:

$$\begin{aligned} N_2 &= N'_2 - V_e \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_M \cdot \eta_M}{1000} \text{ kW}. \end{aligned} \quad (59)$$

Schließlich ist die in der Läuferwicklung verlorengelende Leistung infolge der elektrischen Verluste nach Gl. (52):

$$\begin{aligned} V_2 &= N_a - N'_2 = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 \\ &= \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot m_2 \cdot E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \psi_{2,s} \\ &= m_2 \cdot E_{2,s} \cdot I_2 \cdot \cos \psi_{2,s}. \end{aligned} \quad (60)$$

$\cos \varphi_M$ ist der sog. Leistungsfaktor des Motors, φ_M der Winkel zwischen zugeführter Spannung U und Strom I_1 (Abb. 50). Der Leistungsfaktor beträgt bei Motoren kleiner und mittlerer Leistung etwa

0,75 bis 0,85 und bei solchen großer Leistung bis zu 0,92. Außerdem ist er bei schnelllaufenden Motoren günstiger als bei langsamlaufenden, weil im ersteren Falle die Wicklungen günstiger verteilt und dadurch die Verluste durch Streuung vermindert werden können. Etwas schlechter wird $\cos \varphi_M$ bei hohen Spannungen. Schließlich hat ein Motor mit Kurzschlußanker einen etwas günstigeren Leistungsfaktor als ein solcher mit Schleifringen. Abb. 49 zeigt die Kennlinien für den Leistungsfaktor von Asynchronmotoren mit Kurzschluß- und Schleifringläufer für verschiedene Leistungen und Drehzahlen. Bei kleiner Leistung und niedriger Drehzahl wird der Leistungsfaktor immer schlechter. Das ist besonders dann beachtlich, wenn es sich innerhalb einer Anlage oder

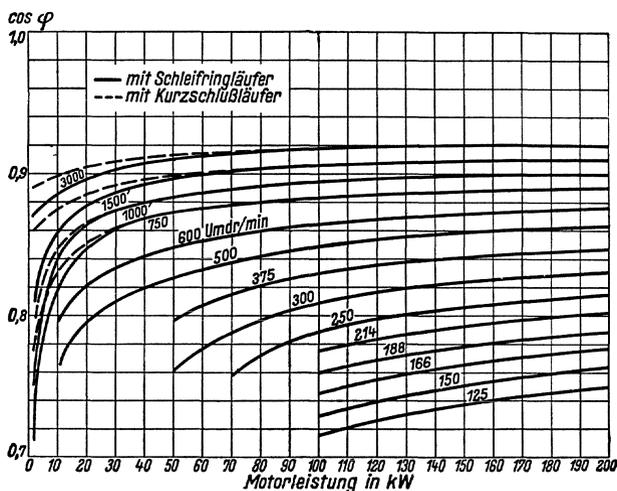


Abb. 49. Leistungsfaktor von Drehstrommotoren mit Kurzschluß- und Schleifringläufer verschiedener Drehzahlen und Leistungen.

auch innerhalb eines größeren Versorgungsgebietes für Fremdstrombelieferung um Einzelantriebe mit vielen kleinen, zum Teil nicht voll ausgenutzten Motoren handelt. Hier kann unter Umständen eine recht erhebliche Verschlechterung des Gesamtleistungsfaktors eintreten, namentlich dann, wenn mit Rücksicht auf die einzelnen Arbeitsmaschinen zudem noch Motoren mit niedrigen Drehzahlen gewählt werden müssen.

Die elektrische Ausnutzung der Generatoren, Transformatoren und Leitungen wird stark beeinflusst durch den Leistungsfaktor der angeschlossenen Motoren. Ist N_1 die vom Motor aufgenommene elektrische Leistung in kW und hat der Motor den Leistungsfaktor $\cos \varphi_M$, so ist der Generator bzw. der zwischengeschaltete Transformator für eine Leistung in kVA von:

$$N_G = \frac{N_1}{\cos \varphi_M} \tag{61}$$

zu bemessen, wenn hier die weiteren Einflüsse der Anlage, die den Gesamtleistungsfaktor bestimmen, zunächst unberücksichtigt bleiben.

Aus Gl. (59) folgt weiter der der Leitungsberechnung zugrundezulegende Strom bei Drehstrom:

$$I_1 = \frac{N_2 \cdot 1000}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi_M \cdot \eta_M}, \quad (62)$$

und dieser Strom, der sich zusammensetzt aus:

$$\text{einem Wirkstrom } I_W = I_1 \cdot \cos \varphi_M,$$

$$\text{und einem Blindstrom } I_B = I_1 \cdot \sin \varphi_M,$$

bestimmt auch den Verlust $I_1^2 \cdot r$ in den Zuführungsleitungen, da $I_1 = \sqrt{I_W^2 + I_B^2}$. Je schlechter also der Leistungsfaktor der Motoren ist, um so größer werden Transformatoren und Stromerzeuger und nicht zuletzt auch die Verluste bzw. die Ausnutzung der Leitungsquerschnitte. Diese wirtschaftlich wesentliche Bedeutung des Motorleistungsfaktors ist erst in den letzten Jahren besonders stark in die Erscheinung getreten, als die Fremdstromübertragung mehr und mehr an die Stelle der Eigenerzeugung trat. Die Stromlieferungsverträge bei Fremdstrombezug nehmen in ihren Tarifen auf besseren oder schlechteren Leistungsfaktor durch Preisab- oder -zuschläge Rücksicht, und darum bedarf es bei der Auswahl der Motoren auch hinsichtlich ihrer Drehzahl und ganz wesentlich hinsichtlich ihrer richtigen Leistungswahl zur geforderten Leistung der Arbeitsmaschine sehr genauer rechnerischer Prüfungen. Auch für die Eigenanlagen wird der Leistungsfaktor mit wachsender Ausdehnung der Motorenanschlüsse im wesentlichen bestimmend für die Stromerzeugung, indem vorhandene Generatoren und Transformatoren nicht mehr zur Deckung des Mehrbedarfes ausreichen, lediglich infolge des schlechten Gesamtleistungsfaktors. Daher ist die Leistungsfaktorfrage, d. h. die Verbesserung des Leistungsfaktors der Motoren, bezogen auf die einzelnen oder insgesamt auf mehrere innerhalb einer Anlage, bestimmend dafür gewesen, den sog. kompensierten Drehstrom-Asynchronmotor durchzubilden, auf den noch besonders eingegangen werden wird. Auch die verschiedenen noch zu behandelnden Regelungsarten des Asynchronmotors nehmen in bestimmter Form auf die Verbesserung des Leistungsfaktors Rücksicht.

Aus Abb. 47 ist ferner zu ersehen, daß der Leistungsfaktor auch des Motors selbst mit abnehmender Belastung sehr schnell sinkt. Die Nennleistung des Motors für Abb. 47 liegt etwa bei einem Drehmoment von 150 mkg. Geht sie auf den Wert von etwa 50 mkg zurück, so beginnt der Leistungsfaktor bereits außerordentlich schnell zu fallen. Ist der Motor also an sich für einen Antrieb zu groß gewählt, so besitzt der Motor betriebsmäßig einen schlechten Leistungsfaktor. Wird bei der Auswahl der Motoren innerhalb einer Anlage nicht sorgfältig genug verfahren, so ist der Gesamtleistungsfaktor an sich und damit für die Stromzeugungsanlage sehr schlecht und kann Werte von etwa 0,5 bis 0,6 erreichen, deren Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit nach dem bisher Gesagten ohne weiteres zu erkennen ist. Überall dort, wo der Leistungsfaktor von Bedeutung ist, wird auf ihn und seinen Einfluß entsprechend hingewiesen werden.

Ein Maß für den Gütevergleich g_D zweier Motoren gleicher Leistung, Spannung und Drehzahl hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Betriebseigenschaften bei verschiedenen Belastungen bildet das Produkt

$$g_D = \text{Leistungsfaktor} \cdot \text{Wirkungsgrad} = \cos \varphi_M \cdot \eta_M, \quad (63)$$

das daher bei der Gegenüberstellung verschiedener Angebote stets festgestellt werden sollte. Ist das Produkt bei einem Motor kleiner als bei einem anderen, so bedeutet das, daß der erstere schlechter ist als der zum Vergleich stehende zweite.

Der Wirkungsgrad η_M ist bei größeren Motoren und höheren Drehzahlen günstiger als bei kleineren Leistungen und niedrigen Drehzahlen. Mit höherer Spannung wird der Wirkungsgrad $\frac{1}{2}$ bis 2 vH schlechter. Ein Kurzschlußläufermotor hat schließlich einen um $\frac{1}{2}$ bis 3 vH besseren Wirkungsgrad als ein Schleifringläufermotor, wobei der erstere Wert für große, der zweite für kleine Motoren gilt.

Die Überlastungsfähigkeit ist zumeist derart bemessen, daß vorübergehend das 2fache des Betriebsdrehmomentes entwickelt werden kann, ohne daß der Motor abfällt. Voraussetzung hierfür ist aber, daß die Netzspannung unverändert bleibt. Hat man mit schwankender Netzspannung zu rechnen, so gestatten die meisten Asynchronmotoren eine Spannungsänderung bis zu 70 vH ohne abzufallen unter der Bedingung, daß nur das Betriebsdrehmoment (Nenn Drehmoment) zu entwickeln ist. Wird die Überlastungsfähigkeit überstiegen, so gilt das auf S. 57 Gesagte. Einen weiteren Vergleichsmaßstab für Motoren gleicher Leistung, Spannung und Drehzahl gibt das Drehmoment-Überlastungsverhältnis:

$$u = \frac{\text{Kippmoment}}{\text{Nenn Drehmoment}}, \quad (64)$$

das daher ebenfalls besonders zu beachten und für die einzelnen Antriebsverhältnisse zu prüfen ist.

Ist die zugeführte Spannung zwischen den einzelnen Phasen des Drehstromnetzes nicht gleich, handelt es sich also um ein in seinen Phasen ungleichbelastetes Netz, an das ein Asynchronmotor angeschlossen werden soll, so ändern sich das Drehmoment und besonders das Anlaufmoment recht bedeutend, wie das aus der Umformung der Gl. (54) nach E leicht festzustellen ist. Die dabei auftretenden Verhältnisse rechnerisch näher zu prüfen, würde hier zu weit führen. Es mag daher die Erfahrung genügen, daß bei nicht zu großen Phasenspannungsunterschieden der Drehstrommotor noch befriedigend arbeitet. Er versucht im Betriebe die Spannungen auszugleichen durch selbsttätige Abstufung der Ströme in den einzelnen Phasen nur durch Verschiebung des Potentials des Nullpunktes in der Ständerwicklung gegenüber dem Potentiale des Nullpunktes im Generator vorausgesetzt, daß Motor und Netz mit Sternschaltung arbeiten.

Das Spannungsdiagramm. An Hand eines Wechselstromdiagrammes, des sog. Spannungsdiagrammes, sollen nun die rechnerisch behandelten elektrischen Verhältnisse beim Asynchronmotor noch zeich-

nerisch näher erläutert werden. Der Aufbau solcher Wechselstromdiagramme, die später bei den Kommutatormotoren und auch im II. Bande häufiger herangezogen werden, muß als bekannt vorausgesetzt werden.

Wie bereits erwähnt, gleicht der Asynchronmotor in seinen elektrischen Verhältnissen vollständig einem Transformator, und man kann daher auch das Diagramm des allgemeinen Transformators heranziehen, das in der nachfolgenden Form für diese Zwecke zuerst von Heyland durchgearbeitet worden ist.

Der von der Ständerwicklung aufgenommene Magnetisierungsstrom I_m setzt sich zusammen aus dem Blindstrom $I_{m,B}$ der den Hauptkraftfluß Φ erzeugt und in Phase mit diesem ist, und dem Wirkstrom $I_{m,W}$. Letzterer steht zeichnerisch senkrecht auf $I_{m,B}$, ist in Phase mit der von Φ induzierten EMK E_1 und deckt die Ohmschen Verluste. In rechtwinkligen Koordinaten trägt man den Kraftfluß Φ in der positiven Richtung der Abszissenachse auf (Abbild. 50). Dann ist:

$$I_{m,B} = \overline{OB_1}, \quad I_{m,W} = \overline{B_1B} = \overline{OB_2}$$

und der gesamte Magnetisierungsstrom $I_m = \overline{OB}$ die geometrische Summe der beiden Einzelströme. Der Kraftfluß Φ eilt dem Magnetisierungsstrom I_m um den Winkel β — den magnetischen Verzögerungswinkel — nach.

Bei Stillstand ist die vom Kraftfluße Φ in der offenen Läuferwicklung induzierte EMK E_2 gleich der in der Ständerwicklung induzierten E_1 , indessen in der Phase um 180° verschoben, also $E_1 = -E_2$. Im Diagramm liegen $E_1 = \overline{OH}$ und $E_2 = \overline{OA}$ in der positiven bzw. negativen Richtung der Ordinatenachse und gegenüber Φ um je 90° in der Phase verschoben.

Beim Lauf war nach Gl. (50) die in der Läuferwicklung induzierte EMK $E_{2,s} = s \cdot E_2$, und da $s < 1$, entspricht im Diagramm die Strecke OC dieser EMK $E_{2,s}$. Sie hat nach Gl. (51) den Strom:

$$I_2 = \frac{E}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}$$

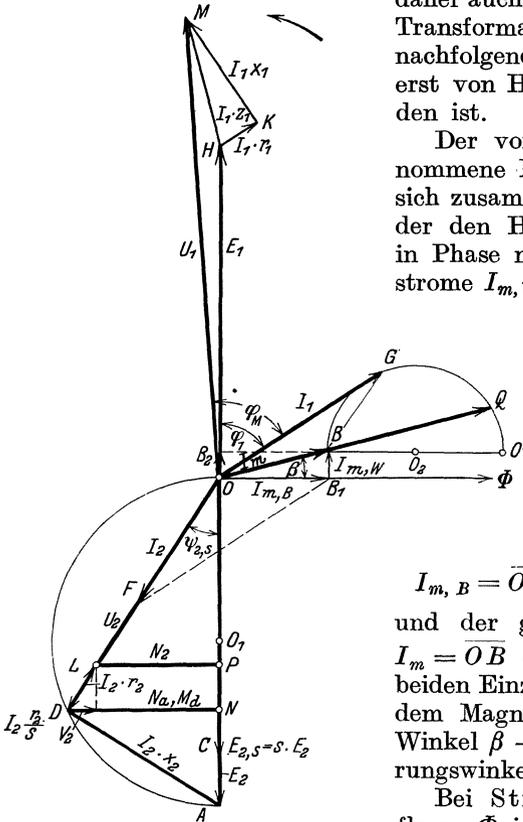


Abb. 50. Spannungsdiagramm für den Drehstrom-Asynchronmotor.

zur Folge. Schreibt man diese Gleichung in der Form:

$$E_2^2 = I_2^2 \cdot \left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + I_2^2 \cdot x_2^2,$$

so sieht man, daß sich die rechte Seite derselben leicht zeichnerisch darstellen läßt, indem man über E_2 als Durchmesser einen Kreis beschreibt und vom Punkte O aus einen Strahl OD unter dem Winkel $\psi_{2,s} = \arctg \frac{x_2}{\frac{r_2}{s}}$ zur Ordinatenachse zieht. Es ist dann $\overline{OD} = I_2 \cdot \frac{r_2}{s}$,
 $\overline{AD} = I_2 \cdot x_2$.

Die Reaktanz bewirkt die Phasenverschiebung zwischen E_2 und I_2 . Es ist x_2 unabhängig von der Belastung, also vom Strome I_2 , und praktisch als unveränderlich anzusehen, wenn der geringe Einfluß der Frequenzänderung bei anderen Schlüpfungen vernachlässigt wird. Demnach ist der Läuferstrom I_2 verhältnismäßig dem Vektor \overline{AD} , in Phase mit dem Vektor \overline{OD} und gegenüber der Spannung um den Winkel $\psi_{2,s}$ verzögert.

Der von der Ständerwicklung aus dem Netze aufzunehmende Strom I_1 muß so groß sein, daß er den Läuferstrom I_2 und den Magnetisierungsstrom I_m deckt. Es ist also I_1 die geometrische Summe von I_2 und I_m und wird zeichnerisch nach der aus dem Diagramm ersichtlichen Form gefunden in der Strecke \overline{OG} .

Die Klemmenspannung, also die dem Motor zuzuführende Spannung U , setzt sich zusammen aus der induzierten EMK E_1 und dem Spannungsabfalle in der Ständerwicklung $I_1 \cdot z_1$, worin z_1 die Impedanz bezeichnet. Die Impedanzspannung besteht aus den Komponenten für den Ohmschen Spannungsverlust $I_1 \cdot r_1$ in Phase mit dem Strome I_1 und für den induktiven Spannungsabfall $I_1 \cdot x_1$ (Reaktanzspannung) um 90° in der Phase gegenüber I_1 verzögert. Trägt man also an E_1 im Punkte H den Vektor $I_1 \cdot r_1 = \overline{HK}$ in Richtung mit I_1 und den Vektor $I_1 \cdot x_1 = \overline{KM}$ senkrecht dazu im Punkte K an, so ist $\overline{HM} = I_1 \cdot z_1$ und $\overline{OM} = U$ die gesuchte Nennspannung des Motors. Der Ständerstrom eilt der zugeführten Spannung U um den Phasenverschiebungswinkel φ_M nach.

Damit ist das Spannungsdiagramm entworfen. Es können nun aus demselben die Arbeitseigenschaften des Motors festgestellt werden. Vorausgesetzt wird in folgendem gleichbleibender Kraftfluß Φ .

Besonders beachtlich sind Drehmoment und Leistung. Nach Gl. (57) war die vom Ständerfelde auf den Läufer übertragene Leistung:

$$N_a = m_2 \cdot E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \psi_{2,s},$$

im Diagramm demnach:

$$N_a \equiv \overline{OA} + \overline{OF} \cdot \cos \psi_{2,s}, *$$

und da:

$$I_2 \equiv \overline{AD},$$

* \equiv bedeutet verhältnismäßig.

so ist $I_2 \cdot \cos \psi_{2,s}$ verhältnismäßig der Höhe \overline{DN} , weil bei gleichbleibendem Kraftflusse die Spannung E_2 unverändert ist. Also ist die Höhe \overline{DN} ein Maß für die Leistung N_a . Aus Gl. (57) folgt ferner das Drehmoment des Läufers:

$$M_d = \frac{N_a}{\omega_1} = \frac{m_2 \cdot E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \psi_{2,s}}{2 \pi \cdot n_1} \text{ Watt};$$

demnach ist die Höhe \overline{DN} oder einfacher der Abstand des Kreispunktes D von der Ordinatenachse auch ein Maß für M_d . Um die Spannung U_2 an den Enden der Läuferwicklung zu finden, muß man die Widerstandsspannung $I_2 \cdot r_2 = \overline{DL}$ der letzteren von dem Vektor \overline{OD} abziehen, so daß:

$$U_2 \equiv \overline{OD} - \overline{DL} = I_2 \left(\frac{r_2}{s} - r_2 \right) = I_2 \cdot r_2 \left(\frac{1-s}{s} \right).$$

Gelte das in Abb. 50 gezeichnete Diagramm der Lage seiner Vektoren nach für Leerlauf, und wird der Motor allmählich belastet, so wächst die Schlüpfung s bzw. der Winkel $\psi_{2,s}$. Damit wird aber auch die Höhe \overline{DN} größer, der Punkt D verschiebt sich, der Läuferstrom I_2 steigt verhältnismäßig dem Wachsen des Vektors \overline{AD} und auch der Ständerstrom I_1 wird größer. Also wachsen Leistung und Drehmoment so lange, bis $\psi_{2,s} = 45^\circ$ ist. Für diesen Fall ist die Schlüpfung:

$$s = \frac{r_2}{x_2},$$

ferner der Läuferstrom:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{2} \cdot x_2},$$

und das Drehmoment:

$$M_d = \frac{m_2 \cdot E_2^2}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2} \cdot x_2 \cdot \omega_1} = \frac{m_2 \cdot E_2^2}{2 \cdot x_2 \cdot \omega_1},$$

und es ergibt sich daraus, daß das größte Drehmoment umgekehrt verhältnismäßig der Reaktanz des Läufers ist. Auch die Änderung von M_d mit steigendem oder fallendem Ohmschen Widerstande r_2 ist aus dem Diagramm leicht vorstellbar.

Die mit wachsender Belastung steigende Ständerstromstärke I_1 kann ebenfalls zeichnerisch gefunden werden. Dem Vektor für $I_2 = \overline{OF}$ entspricht der Vektor \overline{BG} , der sich demnach verhältnismäßig \overline{AD} ändern muß. Da nun der Punkt D sich auf einem Kreise bewegt, der durch den Punkt A geht, muß notwendigerweise der Punkt G sich ebenfalls auf einem Kreise bewegen. Diesem Kreise muß der Punkt B angehören. Wie sich beweisen läßt, verläuft der Durchmesser dieses neuen Kreises parallel zur Abszissenachse und seine Länge ist $\overline{BO'} = \frac{\overline{OA}}{x_2}$.

Um den Kraftfluß bei veränderlicher Belastung auf gleicher Stärke zu erhalten, muß die primäre Spannung U geändert werden. Der Magnetisierungsstrom I_m bleibt unverändert, I_2 und I_1 dagegen wachsen mit steigender Leistung, und infolgedessen muß U mit steigender Be-

lastung vergrößert werden. Es würde zu weit führen, auch hierauf noch zeichnerisch und mit analytischen Erklärungen näher einzugehen. Jedenfalls ist einzusehen, daß der Winkel φ_M kleiner und dadurch $\cos \varphi_M$ größer, also der Leistungsfaktor besser wird. Für den praktischen Betrieb kommt diese Steigerung der zugeführten Spannung einmal darin zum Ausdruck, daß die vorgeschriebene Spannung bei Vollbelastung an den Motorklemmen herrscht, der Spannungsabfall in den Zuführungsleitungen also aus einem Überschuß über diese Vollast-Klemmenspannung gedeckt wird, und ferner die größere Netzbelastung durch Steigerung der Spannung im Kraftwerke berücksichtigt wird.

Wenn auch dieses Heylandsche Diagramm nicht vollständig behandelt worden ist — es ist insbesondere der zweite Kreis noch ähnlich wie der erste für die Darstellung von Leistung, Drehmoment und Schlüpfung auswertbar —, so werden die Entwicklungen immerhin die Möglichkeit geben, sich ein allgemeines Bild über den Zusammenhang und die gegenseitig bedingten Änderungen von U , I_1 , I_2 , φ_M , $\psi_{2,s}$, N_a , M_d bei Belastungsänderungen und anderen Betriebsvorkommnissen, sowie auch unter verschiedenen Betriebsverhältnissen (veränderliches r_2 und x_2) machen zu können.

In Abb. 47 waren wiederum die Betriebskennlinien zusammengestellt für die abgegebene Leistung, die Drehzahl, den primär aufgenommenen Strom, den Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor in Abhängigkeit vom Drehmomente. Man kann aus dem Verlauf der Kennlinien das Verhalten der einzelnen Größen zueinander bei verschiedenem Drehmomente leicht erkennen. Aus Abb. 47 geht ferner hervor, daß der Motor wie 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.

Bei Motoren für aussetzenden Betrieb ist darauf zu achten, daß auch bei geringer Belastung und im Leerlaufe Blindstrom infolge der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung aufgenommen wird. Die Erwärmungsverhältnisse in den Zeiten geringerer Belastung bzw. bei Leerlauf sind daher schlechter als beim Gleichstrommotor. Auch die geringere Überlastungsfähigkeit ist zu beachten, die nicht mehr als das 2- bis 2,5fache des Betriebs-Drehmomentes betragen darf, und schließlich muß darauf Rücksicht genommen werden, daß das Anzugsmoment sich mit dem Quadrate der Spannung Gl. (65) ändert, was für die Bemessung der Zuleitungen und bei Eigenanlagen für die Größe des Kraftwerkes von Bedeutung ist.

11. Die Regelung des asynchronen Drehstrommotors.

a) **Der Drehrichtungswechsel.** Für den Wechsel der Drehrichtung genügt beim Drehstrommotor der Wechsel von zwei Phasen in der Stromzuführung zum Ständer. In Abb. 51 wird dieses durch einen dreipoligen Umschalter erreicht, der dann gleichzeitig als Hauptschalter benutzt werden kann, weil er in geöffnetem Zustande den Motor allpolig vom

Netz trennt. Die Schaltung nach Abb. 52 zeigt die Phasenvertauschung durch einen nur zweipoligen Umschalter. Hier ist dann als Hauptschalter noch ein besonderer dreipoliger Schalter *Sch.* zu benutzen. Wann die eine oder andere Form zu wählen ist, wird durch die Höhe der Motorleistung und der Spannung bestimmt. Bei Steuerwalzen für Spannungen bis 500 V wird der Umschalter von vornherein eingebaut.

b) Die Regelung der Drehzahl im allgemeinen.

Eine Regelung der Drehzahl, wozu auch wiederum 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 r_2 ,
2. der zugeführten Spannung,
3. der Frequenz des zugeführten Stromes,
4. der Polzahl.

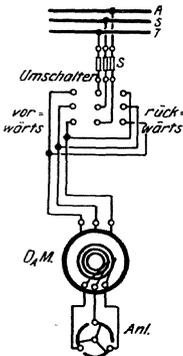


Abb. 51. Drehrichtungswechsel beim Drehstrom-Asynchronmotor (Haupt- und Umschalter gemeinsam).

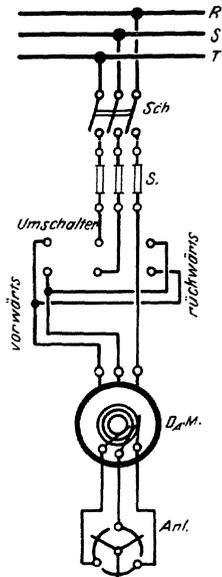


Abb. 52. Drehrichtungswechsel beim Drehstrom-Asynchronmotor (Haupt- und Umschalter getrennt).

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

Ganz allgemein ist vorweg zu bemerken, daß sowohl das Anlassen als auch die Regelung von Drehstrom-Asynchronmotoren in den letzten Jahren zur Durchbildung einer großen Zahl von Schaltungsformen geführt hat, um, wie bereits auf S. 52 gesagt, Verhältnisse zu erhalten, die den Gleichstrommotoren möglichst nahekommen. Wesentlich ist dabei wiederum sowohl das Anlaufmoment als auch die mit Verlusten verbundene oder die verlustlose Regelung. Da beim Drehstrom-Asynchronmotor aber noch auf den Leistungsfaktor geachtet werden muß, spielt auch die Regelung von $\cos \varphi_M$ eine sehr bedeutende Rolle. Es hat daher der Betriebsingenieur bei der Auswahl der Motoren ein reiches Feld der Betätigung, sei es, die vorteilhafteste Regelung für die verschiedenen Arbeitsmaschinenantriebe, die Motoren für landwirtschaftliche Zwecke, die Handhabung eines Stromtarifes, die Aufstellung eines solchen und dgl. mehr zu finden. Neben dem bereits Erwähnten ist das Nachfolgende nach all diesen Richtungen besonders zu beachten und zu bewerten.

c) **Das Anlaufmoment.** Bei der Wahl der Regelungsart zunächst zum Zwecke des Anlassens kommt es in erster Linie darauf an, welches Drehmoment der Motor zu entwickeln hat. Ferner spielen die Leistung, die Drehzahl selbst und die Spannung, mit der der Motor betrieben werden soll, eine wesentliche Rolle.

Über das Anlaufmoment ist noch folgendes zu erwähnen. Im Augenblicke des Anlaufes ist $s = 1$, und die Gl. (54) geht über in die Form:

$$M_{d,A} = 0,0162 \cdot \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 \cdot p}{\nu_1}, \quad (65a)$$

also ist das Anlaufmoment abhängig vom sekundären Widerstande r_2 und von der Frequenz des zugeführten Stromes. Andererseits ist, wie bereits angegeben, der Motor bei Stillstand nichts anderes als ein Transformator, dessen Amperewindungen für den primären und sekundären Teil einander gleich und gleich:

$$I_1 \cdot w_1 = I_2 \cdot w_2$$

sind. Mit dieser Berücksichtigung geht die Gl. (65a) über in:

$$M_{d,A} = 0,0162 \cdot \frac{m_2 \cdot I_1^2 \cdot w_1^2 \cdot r_2 \cdot p}{w_2^2 \cdot \nu_1}. \quad (65b)$$

Aus Gl. (65a) und (65b) können bereits eine Reihe von Schlüssen auf das Verhalten und die Abhängigkeit des Anlaufmomentes von den einzelnen Größen wie w_1 , w_2 , r_2 , ν_1 usw. gezogen werden, so z. B. daß das Anlaufmoment sich mit dem sekundären Widerstande ändert und eine Änderung des primären Stromes im Quadrat zur Folge hat. Um aber mit Rücksicht auf die verschiedenen Anlaßmöglichkeiten einen vollständigen Überblick über $M_{d,A}$ zu gewinnen, soll noch eine dritte Gleichung für $M_{d,A}$ und zwar in Abhängigkeit von der primären EMK E_1 eingeschaltet werden. Setzt man in Gl. (65a) den Wert für I_2 aus Gl. (51) ein und ferner für $E_2 = -E_1$, so ergibt sich:

$$M_{d,A} = 0,0162 \cdot \frac{m_2 \cdot E_1^2 \cdot r_2 \cdot p}{\nu_1 \cdot (r_2^2 + x_2^2)}. \quad (66)$$

Das Drehmoment ändert sich also auch mit dem Quadrate der primären EMK und ist um so größer, je kleiner die Frequenz des zugeführten Stromes ist. Für E_1 kann annähernd auch die zugeführte Spannung U gesetzt werden. Diese Gl. (65b) und (66) sollen daher bei den einzelnen Anlaßformen über die Größe von $M_{d,A}$ Aufschluß geben.

Ganz allgemein sind die Anlaufverhältnisse gekennzeichnet durch den Anlaufstrom, das Anlaufmoment und das Verhältnis dieser beiden Größen. Man bezeichnet als spezifisches Anlaufstromverhältnis:

$$\alpha = \frac{I_A}{I_1} : \frac{M_{d,A}}{M_d} = \frac{I_A}{M_{d,A}} \cdot \frac{M_d}{I_1}, \quad (67)$$

also das Verhältnis Anlaufstrom im Stillstande I_A zu Nennstrom I_1 einerseits und dann Anlaufmoment im Stillstande $M_{d,A}$ zu Nennmoment andererseits. Nach α wird heute das Anlaufvermögen eines Motors zum Vergleich mit einem anderen beurteilt. Das Glied $\frac{I_A}{M_{d,A}}$ in Gl. (67) gibt den Vergleichsmaßstab bei zwei Motoren gleicher Leistung, Spannung und Drehzahl. Je kleiner dieses Glied ist, um so besser ist der Anlauf. Das zweite Glied $\frac{M_d}{I_1}$ hat dagegen keine Beziehungen zum Anlauf und wird für den Vergleich verschiedener Motoren gleicher

Leistung, Spannung und Drehzahl gleich, wenn das Produkt $\cos \varphi_M \cdot \eta_M$ nach Gl. (63) das gleiche Ergebnis hat. Fällt $\cos \varphi_M \cdot \eta_M$ bei einem Motor kleiner aus, was nach S. 61 schlechteren Betriebseigenschaften gleichkommt, so wird α kleiner, also nach Müller¹ ein besserer Anlauf vorgetauscht. Infolgedessen erscheint es richtiger, für das spez. Anlaufstromverhältnis die Größe:

$$\alpha' = \frac{I_A}{I_W} \cdot \frac{M_{d,A}}{M_d} = \frac{I_A}{M_{d,A}} \cdot \frac{M_d}{I_W} \quad (68)$$

zu wählen, worin nunmehr der der Nennleistung (in kW) entsprechende Wirkstrom $I_W = \frac{N \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U}$ erscheint. Das Glied $\frac{M_d}{I_W}$ ist dann für Motoren gleicher Leistung, Spannung und Drehzahl unveränderlich. Aus Gl. (67) und (68) folgt schließlich:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{\cos \varphi_M \cdot \eta_M} \quad (69)$$

Wird ein kräftiges Anlaufmoment verlangt, so ist schließlich ganz besonders darauf zu achten, daß der Spannungsabfall in der Zuleitung nicht zu groß wird, denn nach Gl. (66) ändert sich $M_{d,A}$ mit dem Quadrate der zugeführten Spannung U . Man kann, um nicht zu starke

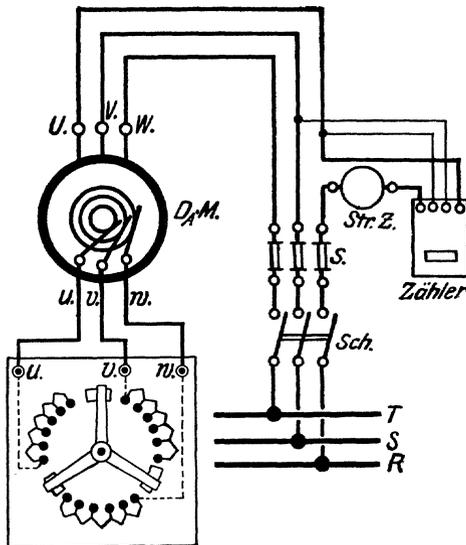


Abb. 53. Vollständiges Schaltbild des Drehstrom-Asynchronmotors mit Schleifringläufer und Anlasser.

Leitungsquerschnitte zu erhalten, in solchem Falle derart verfahren, daß man den Motor für eine geringere Nennspannung wickelt, also z. B. bei 500 V Sammelschienenspannung für 450 oder 480 V, doch darf man hierbei nicht zu weit gehen, weil sonst der Magnetisierungsstrom in der Ständerwicklung zu groß wird. Die Folge des letzteren wäre eine zu starke Erwärmung des Ständers und dadurch eine Gefährdung der Wicklung.

d) Der Schleifringläufermotor und sein Anlassen. Um ein kräftiges Anlaufmoment zu erzielen, muß nach Gl. (65a) der sekundäre Widerstand r_2 groß sein, wie das auch aus Abb. 48 ersichtlich ist. Andererseits wiederum muß r_2 möglichst klein gemacht werden, um beim vollen Laufe des Motors die Drehzahl auf den höchst erreichbaren Wert zu bringen und ferner den dauernden Verlust tunlichst gering, damit den

¹ Müller, Dr. F.: Beitrag zur Frage der Doppelkäfigmotoren. Bergmann-Mitt. 1928, H. 6, S. 160.

Wirkungsgrad am günstigsten zu gestalten. Um diese beiden sich widersprechenden Forderungen zu erfüllen, gibt man der Läuferwicklung den geringsten Widerstand, führt die Enden der Wicklung zu Schleifringen und verbindet letztere über Bürsten mit einem besonderen, regelbaren Widerstande, der nach Beendigung des Anlassens kurzgeschlossen wird (Abb. 53). Das ist statthaft, denn r_2 bedeutet den gesamten sekundären Widerstand, und in welcher Form dieser gebildet wird,

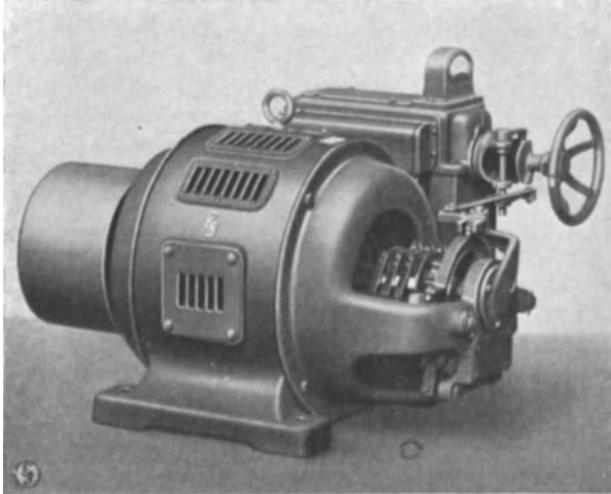


Abb. 54. Offener Drehstrommotor mit Schleifringläufer und angebaute Anlaßwalze mit Bürstenabhebevorrichtung.

ob nur durch die Läuferwicklung oder durch diese und³ einen besonderen Widerstand, ist gleichgültig.

Dieser gesamte Widerstand, also der Läuferwiderstand r_2 zusammen mit dem Vorschaltwiderstande R_v :

$$r_2 + R_v = r_2'$$

wird nun so groß gemacht, daß das Drehmoment beim Anlaufe seinen höchsten Wert erreicht.

Der für diese Art des Anlassens gebaute Motor wird als Schleifringläufermotor bezeichnet (Abb. 54). 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. (66) der Einfluß der Reaktanz x_2^2 gegenüber r_2^2 vernachlässigt werden, und man erhält:

$$M_{d,A} = 0,0162 \cdot \frac{m_2 \cdot p \cdot E_1^2}{v_1 \cdot r_2}. \quad (70)$$

Um die Bürsten und Schleifringe während des Betriebes zu schonen und die durch diese erzeugten Reibungsverluste zu vermeiden, werden die Bürsten entweder von Hand oder selbsttätig nach dem Anlassen abgehoben und gleichzeitig die Läuferwicklung kurzgeschlossen, 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 Drehzahl 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 Abb. 83 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 beim jedesmaligen erneuten Inbetriebsetzen der Kurzschluß der Läuferwicklung aufgehoben ist und die Bürsten auf den Schleifringen liegen.

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 Widerstand r_2 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. In Abb. 54 ist z. B. der Anlasser unmittelbar mit dem Motor zusammengebaut, was naturgemäß elektrisch und betrieblich besonders vorteilhaft ist.

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, U_2 die Spannung zwischen zwei Schleifringbürsten des Läufers bei Stillstand, l die einfache Länge der Verbindungsleitung in m, q den Querschnitt derselben in mm^2 und ρ den spezifischen Widerstand des Leitungsbaustoffes (für Kupfer $\rho = 0,0175$), dann ist:

$$q = \frac{l \cdot I_2 \cdot \sqrt{3} \cdot n_s}{n_z \cdot U_2} \rho, \quad (71)$$

worin:

$$I_2 = \frac{N_2 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi_M}.$$

Die Spannung U_2 muß von der Lieferfirma des Motors besonders angegeben werden. Sie ist in der Regel wesentlich niedriger als die zugeführte Spannung U_1 .

Da das Anlassen sehr großer Motoren, die mit Schwungmassen gekuppelt sind, mittels Widerständen im Läuferstromkreise mit Rücksicht auf die den Massen zu erteilende Beschleunigung und die Erwärmung des Motors während der Anlaufzeit Aufmerksamkeit erfordert, kann man das Abschalten der einzelnen Widerstandsstufen selbsttätig erfolgen 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, 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 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, 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 Einschalten der einzelnen Widerstandsstufen regeln. Auf eine nähere Beschreibung und die Wiedergabe eines Schaltbildes muß jedoch verzichtet werden, weil solche Steuerungen nur 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.

Für schwere Betriebe, die ein häufiges Anlassen und auch Umsteuern notwendig machen, kommen wie bei den Gleichstrommotoren Steuerwalzen als Anlasser zur Verwendung. In Abb. 55 ist die praktische Ausführung einer solchen und in Abb. 56 das Schaltbild für dieselbe dargestellt; der Motor wird hier sowohl vorwärts als auch rückwärts gesteuert.

Bei Nenndrehmoment laufen diese Motoren mit Anlasser im Läuferstromkreise ohne wesentliche Überschreitung der Vollaststromstärke an, geben also keinen Stromstoß auf das Netz. Ist das Anlaufmoment aber größer — im Höchsthalle etwa bis zum 2,5fachen des Nenndrehmomentes —, dann steigt die Anlaufstromstärke ebenfalls und zwar annähernd

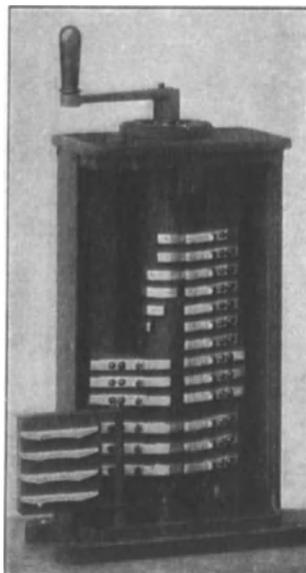


Abb. 55. Drehstrom-Anlaßwalze (geöffnet).

in gleichem Maße wie die Zunahme des Drehmomentes. Hier ist bezüglich des Spannungsabfalles das auf S. 68 Gesagte zu berücksichtigen (siehe auch S. 73).

Eine besondere Ausführung von Motor und Anlasser, auf die noch kurz hinzuweisen ist, besteht darin, daß die Anlaßvorrichtung auf die Welle des Motors fliegend aufgesetzt ist. Das Abschalten der einzelnen

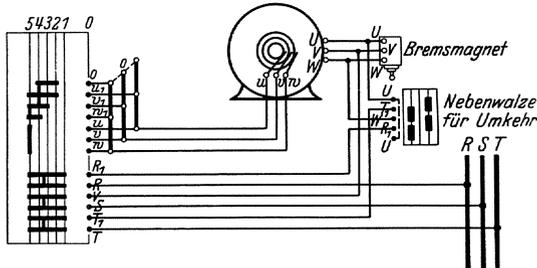


Abb. 56. Schaltbild einer Anlaßvorrichtung für Drehstrom-Asynchronmotoren mit Schleifringläufer.

Widerstand sind in der hohlen Welle untergebracht. Im Augenblicke des Einschaltens entwickeln diese Motoren, die bis zu 100 kW in solcher Form gebaut werden, etwa das 1,7fache Drehmoment bei etwa dem

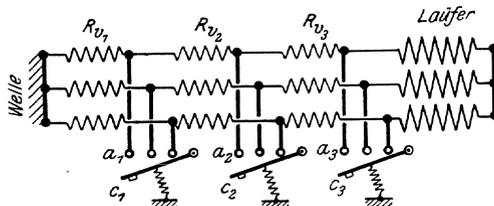


Abb. 57. Anlassen eines Drehstrom-Asynchronmotors durch Läuferwiderstand mit Fliehkraftregler.

nimmt ab, wenn die Drehzahl weiter steigt, und so fort, bis der Anlasser kurzgeschlossen ist.

Der praktische Unterschied gegenüber der Ausführung mit getrenntem, von Hand bedientem Anlasser besteht in der Hauptsache darin, daß das Anlassen genauer und unabhängig von der Geschicklichkeit des Bedienenden, ferner unabhängig von den Anlaufverhältnissen bei bestimmt festgelegter Drehzahl vor sich geht. Die Verwendung derart angelassener Motoren wird daher dort empfehlenswert sein, wo schlechte Bedienung einerseits oder sehr sorgfältiges Anlassen andererseits als Bedingungen vorliegen¹.

e) Der Kurzschlußläufermotor und sein Anlassen. Im Gegensatz zum Schleifringläufermotor bezeichnet man mit Kurzschlußläufermotor einen solchen, dessen Läuferwicklung in Form einer Käfigwicklung in einem genuteten Eisenringe liegt und ständig kurzgeschlossen bleibt. Diese Bauform ist elektrisch und mechanisch die einfachste

¹ Suter, Ph.: Wechselstrommotoren mit Zentrifugalanlasser. BBC Mitt. 1926, S. 201.

und billigste, die einem Elektromotor überhaupt gegeben werden kann (Abb. 58); Schleifringe oder Kommutator sind also nicht vorhanden. Vom betrieblichen Standpunkte ist dieser Motor wegen seines außerordentlich einfachen Aufbaues, seiner einfachen Bedienung und Wartung und seines niedrigen Preises zu bevorzugen. Dazu kommt weiter, daß auch hinsichtlich der elektrowirtschaftlichen Verhältnisse Wirkungsgrad und Leistungsfaktor, insbesondere bei kleiner Motorleistung, günstiger als beim Schleifringmotor liegen. Diesen bedeutenden Vorteilen steht allerdings der eine betriebstechnische Nachteil gegenüber, daß der Kurzschlußläufermotor nur ein verhältnismäßig geringes Anlaufmoment entwickeln kann und einen hohen Anlaufstrom aufnimmt, da die elektrischen Verhältnisse des Läufers unveränderlich festliegen und derart gewählt sein müssen, daß Wirkungsgrad und Lei-

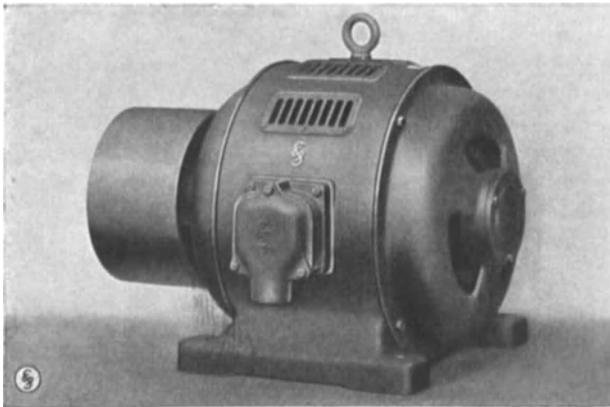


Abb. 58. Offener Drehstrommotor mit Kurzschlußläufer.

stungsfaktor im Betriebe den günstigsten Wert aufweisen. Das Anlaufmoment beträgt etwa das 1,5fache des Betriebsmomentes und der Anlaufstrom das 4- bis 5fache des Nennstromes. Das ist unerwünscht, einmal für viele Arbeitsmaschinengattungen, andererseits für die Stromerzeugungsanlage gleichgültig, ob es sich um eine Eigenanlage oder um Anschluß an ein öffentliches Elektrizitätswerk handelt. Gebaut wird der Kurzschlußläufermotor für Leistungen bis etwa 600 kW und für alle Spannungen, soweit solche praktisch Verwendung finden können. Im Hinblick auf den hohen Anlaufstrom lassen in Deutschland die Elektrizitätswerke Kurzschlußläufermotoren nur für kleine Leistungen zu. Die entsprechenden Bestimmungen sind vom VDE und von der Vereinigung der Elektrizitätswerke aufgestellt und sollen hier der Vollständigkeit wegen kurz zusammengefaßt eingeschaltet werden. Sie beziehen sich auf Motoren bis 100 kW Nennleistung und schreiben zunächst für Drehstrom-Schleifringläufermotoren über 5 bis 100 kW Nennleistung und Vollastanlauf vor, daß das Verhältnis von Anlaufspitzenstrom zu Nennstrom den Wert 1,6 nicht überschreiten

soll. Im Gegensatz hierzu soll bei Kurzschlußläufermotoren, die nur bis 15 kW Nennleistung angeführt sind, das Verhältnis von Anlaufspitzenstrom zu Nennstrom bei Nennleistungen von 1,5 bis 15 kW und beispielsweise 3000 und 1500 Umdr./min den Wert 2,4 nicht überschreiten. Diese Leistungsgrenze wird aber noch beträchtlich eingeschränkt dadurch, daß im Anschluß an Niederspannungsnetze Kurzschlußläufermotoren im allgemeinen nur bis zu Leistungen von 4 kW einschließlich zulässig sind, wenn das vom Motor beim Anlauf zu überwindende Drehmoment nicht größer ist als $\frac{1}{3}$ seines Nenndrehmomentes, Kurzschlußläufermotoren größerer Leistung nur dann, wenn das vom Motor beim Anlauf zu überwindende Drehmoment nicht größer ist als $\frac{1}{6}$ seines Nenndrehmomentes und der Anlaufstrom nicht größer wird, als einer Leistung von 10 kVA entspricht. Nur in Anlagen, die aus einem besonderen Transformator bis zu 100 kVA gespeist werden, sind Kurzschlußläufermotoren bis zu 15 kW zulässig, während bei größeren Transformatoren höhere Leistungen besonders vereinbart werden können.

In anderen Ländern, namentlich in Amerika, beschränkt man die Anwendung der Kurzschlußläufermotoren nicht in gleichem Maße.

Um die an sich sehr bedeutenden Vorzüge dieser Motorbauform dennoch ausnutzen zu können, sind eine ganze Reihe von Anlaufverfahren durchgebildet worden, auf die hier im einzelnen einzugehen nicht möglich ist. Sie beruhen entweder auf der Wirkung mechanischer Mittel oder ändern die elektrischen Verhältnisse. Für die ersteren kommt, sofern die Arbeitsmaschine hohes Anlaufmoment verlangt, in der Hauptsache die Zwischenschaltung von besonders durchgebildeten Fliehkraftriemenscheiben oder -kupplungen in Frage, die die geschilderten Anlaufnachteile dadurch vermeiden, daß der Motor zunächst leer anläuft und erst nach Erreichen der asynchronen Drehzahl mit der anzutreibenden Maschine dann unter Entwicklung des entsprechenden Drehmomentes verbunden wird. Der Anlauf des Motors und das Anspringen der Arbeitsmaschine werden hier also zeitlich getrennt. Solche Kupplungen sind in großer Zahl in die Praxis eingeführt. Dieser Hinweis auf sie muß genügen. Die Lieferfirmen geben sehr genaue Vergleichsdaten mit Schaulinien und oszillographischen Aufnahmen des Anlaufvorganges. Das Anlassen des Motors erfolgt durch Einlegen eines dreipoligen Schalters. Ist der dann auftretende Stromstoß nicht mehr zulässig, so ist Stern-Dreieckschaltung zu wählen. Die Einzelheiten werden weiter unten besprochen.

Für das Anlassen auf elektrischem Wege kann nur die Ständerwicklung benutzt werden. Auch hierfür sind in den letzten Jahren eine große Zahl von Ausführungsformen entstanden, die nur kurz gestreift werden sollen, da dem Ingenieur für Entwurf, also Auswahl des Motors, und Betrieb lediglich das Anlaufmoment und die Anlaufstromstärke von besonderer Bedeutung sind.

Ganz allgemein gilt für das elektrische Anlassen folgendes:

Dadurch, daß die Läuferwicklung kurzgeschlossen ist, können, wie schon kurz angedeutet, Anlaufvorrichtungen nur im Ständerstromkreise liegen.

Für diesen Fall ist demnach eine Beeinflussung der Drehzahl nur auf die auf S. 66 unter 2. genannte Art durch allmähliche Steigerung der zugeführten Spannung U möglich. Wird dann beim Anlassen die wiederum als unveränderlich vorausgesetzte Netzspannung durch einen Widerstand teilweise vernichtet (Abb. 59), so entstehen naturgemäß ganz bedeutende Verluste. Trotz der großen, dem Netze entnommenen Leistung ist dabei das Anlaufmoment des Motors gering, da durch das Abdrosseln der Spannung $U(E_1)$ das Ständerfeld, das mit dem Läuferstromme das Drehmoment ergibt, schwach ist.

Die Gl. (65) geht, da der Läuferwiderstand nur klein ist, über in:

$$M_{d,A} = 0,0162 \cdot \frac{m_2 \cdot E_1^2 \cdot r_2 \cdot p}{\nu_1 \cdot x_2^2}, \quad (72)$$

oder da:

$$x_2 = 2 \pi \cdot \nu_1 \cdot L_1,$$

(L_1 = Selbstinduktionskoeffizient der Ständerwicklung)

kann die Gl. (72) auch geschrieben werden:

$$M_{d,A} = k_4 \cdot \frac{E_1^2}{\nu_1^3}, \quad (73)$$

worin:

$$k_4 = \frac{0,0162 \cdot m_2 \cdot p}{(2 \pi \cdot L_1)^2},$$

denn jetzt kann r_2^2 gegenüber x_2^2 vernachlässigt werden; das Anlaufmoment ist also unmittelbar abhängig vom Quadrate der zugeführten Spannung und ändert sich umgekehrt mit der dritten Potenz der Frequenz, wenn von dem Einflusse von r_2 auf $M_{d,A}$ abgesehen wird. Letzteres kann hier geschehen, weil r_2 bereits beim Aufbau des Motors dem günstigsten Wert entsprechend gewählt wird.

Die Verwendung von Anlaßwiderständen im Ständerstromkreise für Hochspannungsmotoren mit Kurzschlußläufer ist wegen der bautechnischen Schwierigkeiten bei der Isolation der beweglichen Kontakte in vielen Fällen nicht empfehlenswert.

Für die Wahl der im folgenden weiter behandelten Anlaßformen ist in der Hauptsache bestimmend die Motorleistung, die Höhe der Spannung und das verlangte Anlaufmoment.

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 infolge der Beschleunigung der Massen aus dem Zustande der Ruhe ein sehr großer Stromstoß 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 daher nur bei Motoren mit einer Leistung bis etwa zu 3 kW angewendet. Die Anlaufstromstärke erreicht hierbei etwa den 4- bis 8fachen Wert

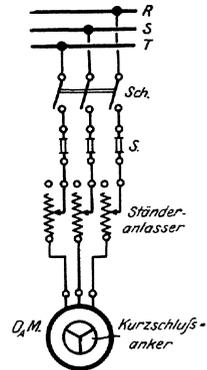


Abb. 59. Anlassen des Drehstrom - Asynchronmotors mit Kurzschlußläufer durch Ständeranlasser.

der Vollaststromstärke. Das dabei entwickelte Anlaufmoment ist ungefähr das 1,5- bis 2,5fache des Nenndrehmomentes. Um nicht beim Einschalten jedesmal die Sicherungen *S*. infolge der großen Anlaufstromstärke zum Schmelzen zu bringen oder den Motor zu übersichern, kann man die Schaltung so treffen, daß die Sicherungen mittels eines Umschalters erst eingeschaltet werden, wenn der Motor im vollen Betriebe ist (Abb. 60). Es ist dann besonders darauf zu achten, daß der Umschalter nicht etwa in der ersten Stellung belassen werden kann, da dort der Motor ungesichert ist. Muß besondere Vorsicht auch beim

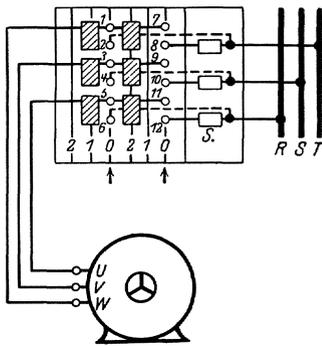


Abb. 60. Anlansschaltung des Drehstrom-Asynchronmotors mit K. L. durch Primärschalter und Sicherungsumschaltung.

Einschalten beachtet werden, so ist der Anlaßstromkreis ebenfalls mit stärkeren Sicherungen zu sichern (Grosicherung).

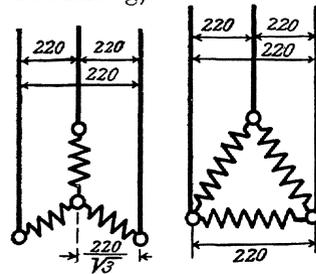


Abb. 61. Stern-Dreieckumschaltung der Ständerwicklung beim Drehstrom-Asynchronmotor.

Bei Motoren bis etwa 20 kW und Spannungen bis 500 V ist eine bedeutende Verminderung der Anlaufstromstärke dadurch erreichbar, daß man die Ständerwicklung einmal in Stern und dann in Dreieck schaltet (Abb. 61). Wird ein Motor, dessen Ständerwicklung für gewöhnlich in Dreieck geschaltet ist, auf Stern umgeschaltet, so ist das, wenn sein elektrisches Verhalten ungeändert bleiben soll, gleichbedeutend mit einer Spannungsänderung im Verhältnisse von $1 : \sqrt{3}$. Die **Stern-Dreieckschaltung** ist demnach gleichbedeutend mit einem einstufigen Anlaßtransformator, dessen Anlaßstufe die Netzspannung ändert wie:

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

Die Schaltung ist in Abb. 62 dargestellt. Die sechs Enden der Ständerwicklung werden mit einem besonders gebauten Umschalter verbunden. Der Motor, der im Betriebe mit dreieckgeschalteter Wicklung läuft, erhält auf der ersten Stufe (Sternstufe) nur 58 vH 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 eigentliche Betriebszustand hergestellt ist. Es ist durch diese Schaltung möglich, den Stromstoß beim Anlassen bis etwa auf das 1,7- bis 2,4fache

der Betriebsstromstärke in der Sternstellung zu beschränken. In der Dreieckstellung tritt etwa der dreifache Betriebsstrom auf. Abb. 63 zeigt den Verlauf des Anlaßstromes bei $\frac{1}{3}$ Drehmoment.

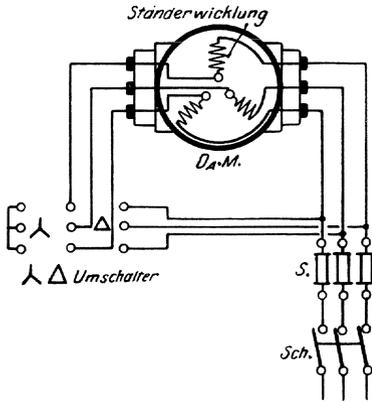


Abb. 62. Anlassen des Drehstrom-Asynchronmotors mit Kurzschlußläufer durch Stern-Dreieckumschaltung.

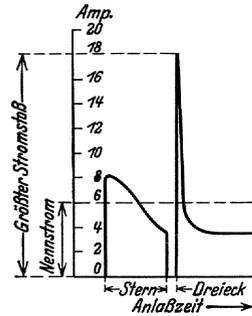


Abb. 63. Verlauf des Anlaßstromes beim Drehstrom-Asynchronmotor mit K.L. in Stern-Dreieckanlaßschaltung mit Unterbrechung.

Diese Art des Anlassens ist indessen nur dort anwendbar, wo der Motor ohne oder nur mit etwa $\frac{1}{3}$ der Belastung anläuft.

Zur Vermeidung von Bedienungsfehlern und zur Vereinfachung der Schaltgeräte wird an Stelle des Stern-Dreieckumschalters und des Ausschalters ein Anlasser mit Schaltwalze verwendet, der den Motor in der Nullstellung gleichzeitig allpolig vom Netze trennt. In Abb. 64 ist auch hierfür ein Schaltbild gezeichnet.

Der einfache Stern-Dreieckschalter (Abb. 64) schaltet den Motor beim Übergange von der Stern- auf die Dreieckstellung auf einen Augenblick vom Netze ab. Durch diese Umschaltung mit Unterbrechung tritt, wie Abb. 63 zeigt, ein zweiter, größerer Stromstoß auf, der, wie bereits gesagt, etwa den 3fachen Wert des Betriebsstromes erreicht. Da dieser Stromstoß bei größeren Motoren im allgemeinen nicht zulässig ist, wird der Stern-Dreieckschalter mit Schutzwiderständen ausgerüstet, die beim Übergange von der Stern- auf die Dreieckstellung eingeschaltet werden, und die Umschaltung nunmehr ohne Unterbrechung des Stromes und des Drehmomentes erfolgt. Die Abb. 65 zeigt den Stromverlauf

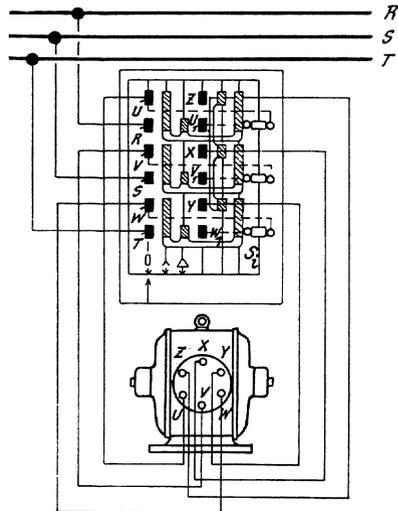


Abb. 64. Stern-Dreieckschalter mit Unterbrechung.

und Abb. 66 das Schaltbild für einen solchen Schalter. Nach Abb. 66 wird in Stellung 1 als Anlaßstellung die Sternschaltung ohne Widerstand herbeigeführt. In Stellung 2 werden zu den 3 Phasen 3 Widerstände parallelgeschaltet. Die Stellung 3 schafft den Übergang zur Dreieckschaltung, die Widerstände liegen nach Aufhebung des Knotenpunktes mit den Phasenwicklungen des Motors in Reihe. In Stellung 4 wird durch Kurzschließen der Widerstände die Betriebsstellung in der Dreieckschaltung erreicht.

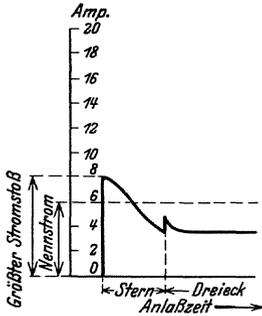


Abb. 65. Verlauf des Anlaufstromes beim Drehstrom-Asynchronmotor mit K. L. in Stern-Dreieckschaltung ohne Unterbrechung (Schutzwiderstandsschaltung).

Der umgekehrte Weg zum Anlassen, also Dreieck-Sternschaltung, wird gewählt, wenn es auf ein möglichst hohes Anlaufmoment ankommt und der dabei auftretende Stromstoß zulässig ist. Hierbei erhält jede Phase eine um $\sqrt{3} = 1,73$ fache höhere Spannung, I_1 nimmt in demselben Verhältnisse zu, während das Drehmoment wiederum im quadratischen Verhältnisse steigt.

Die Stern-Dreieckschaltung im Dauerbetriebe wird vereinzelt auch dort angewendet, wo es sich um eine für längere Zeit erwünschte ständige Leistungs-herabsetzung handelt wie z. B. bei Pumpen, in Wasserhaltungen

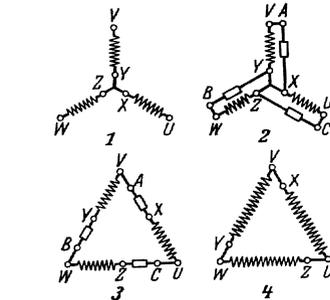
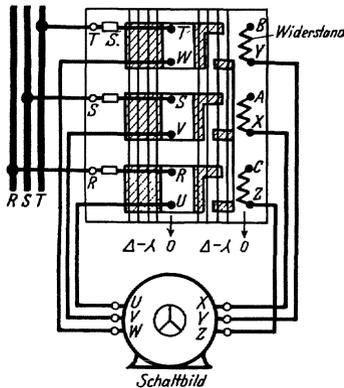


Abb. 66a und b. Stern-Dreieckschalter mit Schutzschaltung.

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 Förderung gewählt werden, so wird sie für die erste Betriebszeit mit dem in Stern geschalteten Motor betrieben, und der Motor bei Leistungssteigerung auf Dreieck umgeschaltet. Für die Leistungen gilt wiederum das Verhältnis $1 : \sqrt{3}$. Diese Schaltung bringt weiter den Vorteil eines besseren Leistungsfaktors bei geringer Last in der Sternschaltung, fordert aber besondere Vorsicht in ihrer Anwendung, da in der Sternschaltung der ganze Netzstrom jede Phasenwicklung durchläuft, in der

Dreieckschaltung aber nur der $\sqrt{3}$ Teil des Netzstromes. Es besteht daher die Gefahr, daß der Motor infolge des in der Sternschaltung gemessenen kleinen Stromes überlastet wird und zerstört werden kann. In Abb. 67 ist der Verlauf der Stromaufnahme in beiden Schaltungen gezeichnet. Die Punkte *a* bis *d* sind hier besonders beachtlich.

Der Lastpunkt *a* gibt die Stromaufnahme im gewöhnlichen Betriebe in Dreieckschaltung bei Vollast an. Im Punkte *b* ist der Netzstrom in beiden Schaltungen gleich, im Punkte *c* ist der Netzstrom in der Sternschaltung gleich dem Phasenstrom des Motors in der Dreieckschaltung. In diesem Punkte liegt also die Grenze der Belastbarkeit in Sternschaltung. Im Punkte *d* sind die Phasenströme im Motor in beiden Schaltungen gleich. Die Umschaltung von einem zum anderen Betriebe müßte also spätestens im Lastpunkt *c* erfolgen. Aber auch dieser Lastpunkt ist in Rücksicht auf genügend große stoßweise Überlastbarkeit schon zu hoch gegriffen. Es ist daher die Belastung des Motors in Sternschaltung nicht höher zu treiben, als etwa 45 vH der Vollast in der Dreieckschaltung.

Zwischen den Punkten *c* und *b* ist zwar der Netzstrom in Stern kleiner als in Dreieck, aber der Motor ist bereits überlastet. Deshalb ist dieser Lastbereich für den Motor besonders gefährlich und kann zur Beschädigung der Motorwicklung führen.

In Abb. 68 sind die Betriebskennlinien für beide Schaltungen zusammengestellt. Aus ihnen ist der große Unterschied in der Belastbarkeit und der starke Drehzahlabfall in der Sternschaltung besonders hervorgehoben. Auch der Motorwirkungsgrad wird zum Teil trotz kleinerer Leistung in der Sternschaltung schlechter; diese Schaltung ist demnach bei derselben geleisteten Arbeit im Betriebe unwirtschaftlicher. Lediglich der Leistungsfaktor zeigt innerhalb der zulässigen Belastungsgrenze wesentlich bessere Werte, was im Hinblick auf das auf S. 60 Gesagte gegebenenfalls von beachtlicher Bedeutung sein kann. Für die Sicherung gegen Überlastung ist noch zu beachten, daß das Sicherungsgerät (Sicherung oder Überstromschalter) nicht in den Zuleitungen, sondern in den Motorphasen liegen müßte.

Der Doppelstab- oder Doppelkäfigmotor¹. Das Verlangen des Betriebes, den schleifringlosen Drehstrommotor, also den Kurzschlußläufermotor, immer mehr einzuführen, hat in letzten Jahren zur Durch-

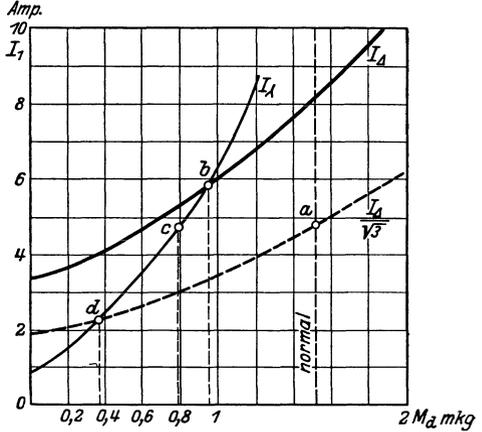


Abb. 67. Stromaufnahme eines Kurzschlußläufermotors in Abhängigkeit vom Drehmoment in Stern- und in Dreieckschaltung.

¹ Müller, Dr.: Beitrag zur Frage des Doppelkäfigmotors. Bergmann Mitt. 1928, H. 6. — Dr. Liwschitz: Käfigankermotoren mit durch Stromverdrängung verbesserten Anlaufverhältnissen. Siemens-Zeitschrift 1928, H. 4. — H. Lund: Der

bildung des Doppelstab- oder Doppelkäfigmotors in den verschiedensten Ausführungen des Läufers geführt. Mit dieser Motorbauart soll der der Stern-Dreieckschaltung hinsichtlich des geringen Anlaufmomentes anhaftende Nachteil weiter eingeschränkt werden. Aus Gl. (65) ist zu ersehen, daß der Motor nur durch Erhöhung des Widerstandes des Läuferkreises befähigt werden kann, im Stillstande ein bestimmtes Drehmoment zu entwickeln, da er im Stillstande die diesem Drehmomente und der synchronen Drehzahl entsprechende Leistung aus dem Netze aufnehmen muß. Um nun den Widerstand des Läuferstromkreises an

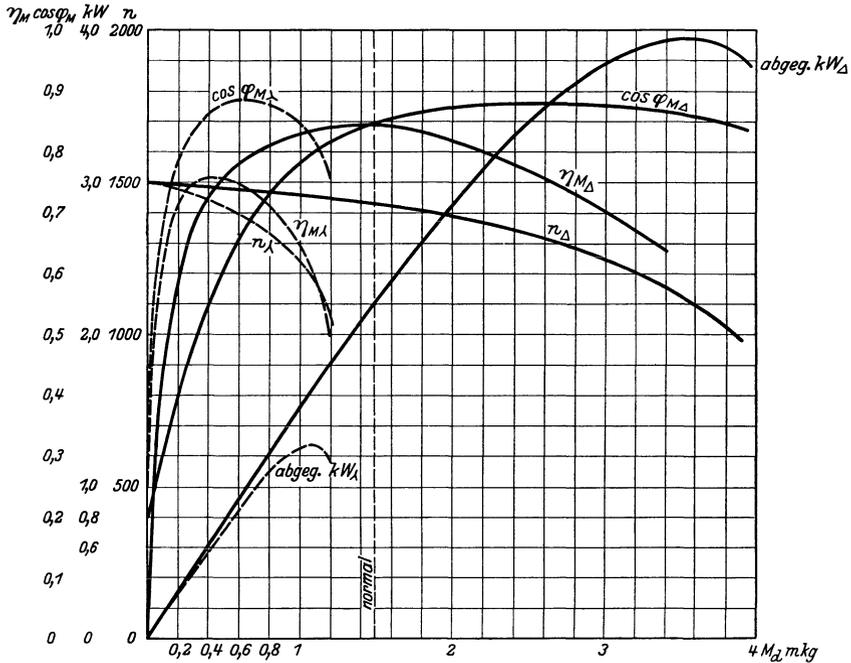


Abb. 68. Betriebskennlinien für einen Kurzschlußläufermotor in Stern- und Dreieckschaltung.

sich zu erhöhen, wird der Läufer mit zwei getrennten, in sich kurzgeschlossenen Wicklungen versehen, von denen die eine in Nuten am Umfange des Läufers wie beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer liegt und die zweite ebenfalls in Nuten etwa in halber Höhe des Läuferkernes untergebracht ist. Die äußere Wicklung (Oberkäfig) erhält einen hohen Ohmschen Widerstand und kleine Reaktanz und gilt als Anlaufwicklung. Der zweiten Wicklung (Unterkäfig) wird kleiner Ohmscher Widerstand und große Reaktanz gegeben; sie stellt die Arbeitswicklung dar.

Eine andere Bauform besteht darin, daß die äußere Wicklung aus mehreren in der radialen Höhe unterteilten Stäben zusammengesetzt

ist (Wirbelstromanker). Auch durch diese Ausführungen wird der Läuferwiderstand beim Anlauf erhöht, da die Reaktanz abhängig ist von der Frequenz des Stromes und diese Frequenz im Stillstande den höchsten Wert = der Netzfrequenz, im Lauf den geringsten Wert = der Frequenz der Nenndrehzahl des Läufers besitzt. Was beim Schleifringläufer durch die Anlaßwiderstände erreicht wird, wird hier also durch die Ungleichheit der beiden Wicklungen herbeigeführt. Bei der Nenndrehzahl wird durch die Kraftflußverhältnisse im Läufer die dem Läufer gegebene Widerstandsvermehrung Null.

Je nach der Leistung derart gebauter Motoren kann das Anlaufmoment bis zum Kippmoment getrieben werden, das zweckmäßig dem 2,5- bis 3fachen Nennmomente gleichgemacht wird. Der Anlaufstrom beträgt hierbei etwa das 4,2- bis 5,3fache des Nennstromes. Muß der Anlaufstrom in den vom VDE vorgeschriebenen Grenzen bleiben, so ist auch hier die Stern-Dreieckschaltung anzuwenden oder ein Ständeranlasser zu benutzen. Der Wirbelstromanker entwickelt in der Sternschaltung nur etwa das 0,4- bis 0,5fache des Nennmomentes und ist daher für viele Antriebe nicht ausreichend. Er wird infolgedessen nur dort zu wählen sein, wo unmittelbares Einschalten zulässig ist. Der Doppelkäfigläufer dagegen besitzt das 0,8- bis 1fache des Nenndrehmomentes in der Sternschaltung beim Anlassen und erfüllt dadurch die Anlaufbedingungen eines großen Teiles der Arbeitsmaschinen. Der Strom bleibt dabei unterhalb der VDE-Grenzen. Soll das Anlaufmoment noch größer sein, so ist ein Ständeranlasser zu benutzen.

Nach den Angaben auf S. 67 bietet die Gl. (67) die Möglichkeit, Motoren verschiedener Bauart hinsichtlich ihrer Anlaufverhältnisse zu vergleichen. Ein solcher Vergleich für die Verhältnisse:

$$\frac{\text{Anlaufstrom}}{\text{Nennstrom}} = \frac{I_A}{I_1}$$

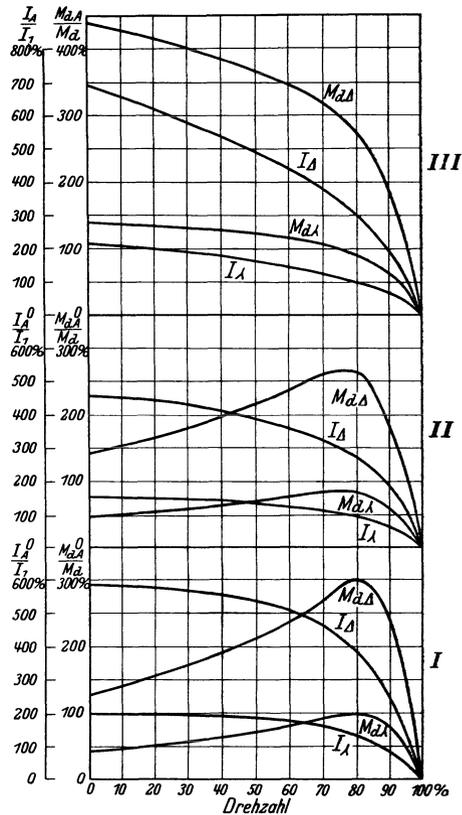


Abb. 69. Drehmoment- und Stromverlauf eines Drehstrommotors von 22 kW $n = 1450$ bei Schaltung in Stern oder Dreieck mit I. gewöhnlichem Kurzschlußläufer, II. Wirbelstromläufer, III. Doppelstahläufer.

und:

$$\frac{\text{Anlaufmoment}}{\text{Nenn Drehmoment}} = \frac{M_{a,A}}{M_a}$$

ist in Kennlinien für die verschiedenen Bauarten und bisher besprochenen Anlaßformen des Kurzschlußläufermotors in Abb. 69 zusammengestellt und zeigt deutlich die nach dieser Richtung dem Betriebe zur Beurteilung besonders wichtigen Unterschiede.

Bei sehr großer Motoreinzelleistung und hoher Spannung kann man die bisher beschriebenen Anlaßformen und -schaltungen nicht mehr ohne weiteres verwenden. Es muß vielmehr dazu übergegangen werden, entweder einen Vortransformator in gewöhnlicher Bauart zur Herabsetzung der Spannung allgemein oder einen **Anlaßtransformator** zu benutzen. Der Anlaßtransformator als weiteres Mittel zum Anlassen führt dem Motor in einzelnen Stufen veränderte Spannung zu. Man vermindert hierdurch nach dem bereits bei der Stern-Dreieckschaltung Gesagten gleichfalls die starken Stromstöße beim Anlauf. Eine Vernichtung von Spannung und damit von elektrischer Energie in Widerständen wie z. B. bei dem Ständeranlasser (S. 75) wird dabei vermieden, weil dem Motor nur so viel Leistung zugeführt wird, als derselbe jeweils benötigt.

Der Anlaufstrom kann bis etwa auf das 1,5fache des Vollaststromes tiefgehalten werden.

Die Anlaßtransformatoren für Drehstrommotoren bestehen in der Regel aus zwei zusammengebauten Einphasentransformatoren, die für Spannungen bis etwa 5000 V 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 Netze, dem Motor und dem Anlaßschalter verbunden. Die Ober- und die Unterspannungswicklung des Transformators sind vereinigt (Abb. 70); als Unterspannungswicklung 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 Unterspannungswicklung induziert. Diese Sparschaltung, über die im III. Abschnitte

ausführlicher gesprochen wird, hat den Vorteil, daß nicht die gesamte vom Motor benötigte Leistung zu transformieren ist, wodurch man einen besseren Wirkungsgrad erzielt und auch einen kleineren Transformator verwenden kann.

Für die Abnahme der Anlaßspannungen vom Transformator und die Zuführung derselben zum Motor dienen besondere Anlaßstufenschalter. Dieselben bestehen aus einer Anzahl von Kontaktstücken, welche isoliert voneinander auf einer Walze angeordnet sind. In Abb. 303

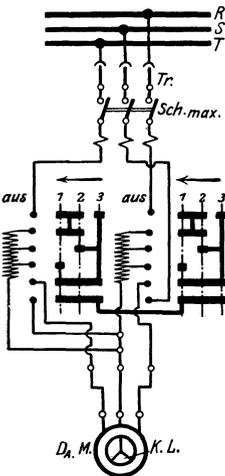


Abb. 70. Anlassen des Drehstrom-Asynchronmotors mit Kurzschlußläufer durch Anlaßtransformator.

ist ein ausführlicheres Schaltbild eines solchen Stufentransformators mit Funkenentzieher beim Ausschalten der Kontaktbürsten und in Abb. 305 ein Stufenschalter der Bergmannwerke abgebildet.

Die Arbeitsweise des Anlaßschalters in Abb. 70 ist kurz folgende: Steht die Walze auf „aus“, so ist sowohl der Motor als auch der Transformator vollständig vom Leitungsnetze getrennt. Wird die Walze auf die Stellung „1“ gebracht, so liegt der Transformator am Netze 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 Abzweigung des Transformators geschaltet. Der Motor erhält jetzt etwa drei Viertel der Netzspannung. Nachdem der Motor nahezu seine volle Drehzahl erreicht hat, wird die Schaltwalze in Stellung „3“ gebracht, wobei der Motor dann 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 dagegen während des Betriebes vom Netze getrennt sein, denn ihre Größe ist zumeist diesen Bedingungen entsprechend bemessen. Außerdem wird so der Leistungsverbrauch durch den Leerlauf des Transformators vermieden.

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

f) **Das Anlassen durch Änderung der Frequenz.** Die auf S. 66 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:

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

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 als Kurzschlußläufer auszuführen. In der Praxis kommt dieser Fall nur selten vor.

Da beim Kurzschlußläufer r_2 klein ist, so ändert sich das Anlaufmoment nach Gl. (73) umgekehrt mit der dritten Potenz der Frequenz; $M_{a, A}$ kann infolgedessen einen hohen Wert erreichen.

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. Darin liegt ein recht unangenehmer Nachteil des Drehstrommotors. Da die Drehzahl n des Läufers nur abhängig ist von der Frequenz des zugeführten Stromes, der Polzahl und der Schlüpfung, so sind durch diese drei Größen v , p und s die Möglichkeiten für die Regelung von n gegeben und begrenzt. Die Form, die Drehzahl durch Änderung der zugeführten Spannung

etwa durch einen unterteilten Transformator zu regeln, wird in der Praxis außer für das Anlassen nicht angewendet. Widerstände in der Ständerwicklung sind aus den bereits 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 Regelung besitzt aber zwei große Nachteile, und man benutzt sie daher nur selten, wählt vielmehr vorteilhafter eine der folgenden Arten, wenn es die Betriebsverhältnisse irgend zulassen.

Der erste Nachteil besteht darin, daß die im Regelwiderstände verbrauchte elektrische Leistung nutzlos in Wärme umgesetzt und damit der Wirkungsgrad des ganzen motorischen Antriebes bedeutend verschlechtert wird. Das ist besonders zu beachten für Anlagen, die Fremdstrom beziehen. Die in den Widerständen vernichtete Schlupfleistung wächst übereinstimmend mit dem erzielten Drehzahlabfall und ist bei halber Drehzahl bereits ebenso groß wie die vom Motor mechanisch abgegebene Leistung. 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 entnimmt also auch der Drehstrom-Asynchronmotor dem Netze die volle Leistung, von der bei geringerer Drehzahl nur ein Teil nutzbar verwendet wird (Abb. 195).

Der zweite Nachteil liegt darin, daß die Drehzahl von der Belastung abhängig ist, weil der Läufer stets das Bestreben hat, in Synchronismus mit dem Ständerdrehfeld zu kommen, und von letzterem nur um den Betrag der Schlüpfung abweicht. Wird z. B. ein Motor, der mit 1000 synchronen bzw. etwa 975 tatsächlichen Umdrehungen läuft, durch den Regelwiderstand bei einem bestimmten zu leistenden Drehmomente auf 500 Umdrehungen gebracht, so steigt bei unverändertem

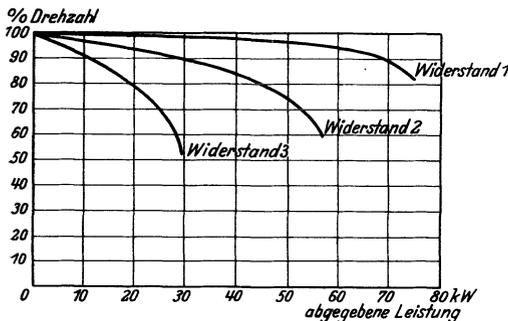


Abb. 71. Drehzahl in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung bei verschiedenen Widerständen im Läuferkreis des Drehstrom-Asynchronmotors.

vorgeschaleten Widerstände, 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 an-

nähernd die höchst erreichbare asynchrone immer noch unter der Voraussetzung, daß die Größe des Regelwiderstandes unverändert dieselbe geblieben ist. Eine derartige Regelung bei schwankender Belastung bzw. wechselndem Drehmomente ist daher wenig brauchbar, und bei den meisten Arbeitsmaschinen nicht anwendbar, wenn nicht bei jeder Änderung in der Belastung der Widerstand nachgestellt wird, was natürlich zeitraubend, wenn nicht oft sogar undurchführbar ist. Eine Drehzahleinstellung bei Leerlauf ist nicht möglich.

In Abb. 71 ist die Drehzahl bei verschiedenen Widerstandsstufen im Läuferkreise in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung gezeichnet. Ein derart geregelter Asynchronmotor bekommt somit eine um so ausgeprägtere Hauptschluß-Arbeitsweise, je größer der Regelbereich ist.

Die Benutzung der Schlüpfungsänderung für die Regelung wird auch durch besondere Regelsätze angewendet, über die auf S. 95 im einzelnen gesprochen wird. Nur zur Vollständigkeit ist dieser Hinweis hier gebracht.

h) Die Regelung der Drehzahl durch Änderung der Polzahl. Da sich nach Gl. (48) die Drehzahl bei gegebener Frequenz angenähert umgekehrt mit der Polzahl ändert, so hat dieser Umstand dazu ge-

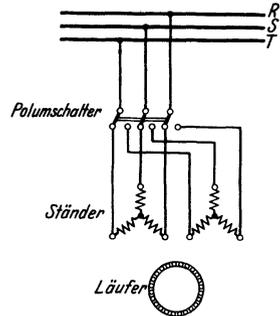


Abb. 72. Kurzschlußläufermotor für Polumschaltung (2 Ständerwicklungen).



Abb. 73 a.

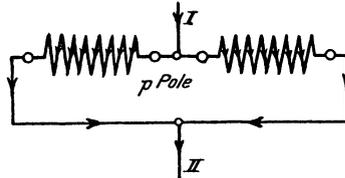


Abb. 74 a.

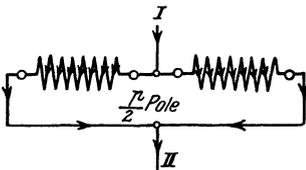


Abb. 73 b.

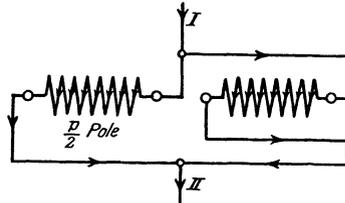


Abb. 74 b.

Drehmoment = gleichbleibend = Leistung.

Drehzahlregelung durch Polumschaltung beim Drehstrom-Asynchronmotor.

führt, 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. Die Nachteile der Widerstandsregelung, also die

Abhängigkeit der Drehzahl von der Belastung, die nutzlose Aufwendung elektrischer Leistung, 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, und der Wirkungsgrad sowie der Leistungsfaktor haben wesentlich günstigere Werte, als diese bei der Widerstandsregelung zu erreichen sind.

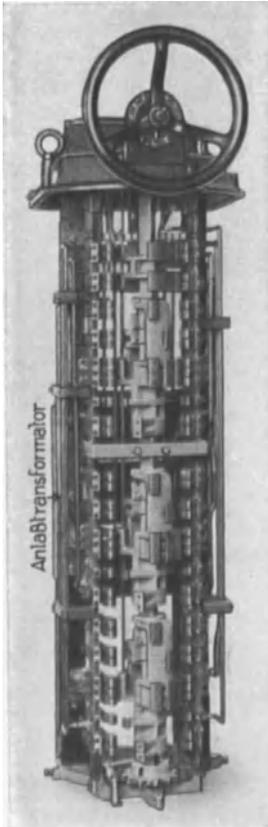


Abb. 75. Schaltwalze für Polumschaltung zusammengebaut mit Anlaßtransformator.

Die gebräuchlichsten Ausführungen solcher Motoren sind die mit zwei, drei oder vier verschiedenen Polzahlen und damit ebenso vielen verschiedenen Drehzahlen. Dabei ist darauf hinzuweisen, daß die asynchronen Drehstrom- und auch die 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 trägt. 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.

In Abb. 72 ist eine einfache Schaltung für zwei beliebige Drehzahlen gezeichnet. Der Läufer wird vorzugsweise in der Ausführung als Kurzschlußläufer gewählt, weil dann ein Umschalten beim Übergange von einer auf die andere Drehzahl entfällt, der Kurzschlußläufer vielmehr bei beiden Drehzahlen wirksam ist. Außerdem hat dann dieser Kurzschlußläufermotor alle die Vorteile, über die bereits gesprochen worden ist.

Für die richtige Bemessung des Motors ist stets notwendig, anzugeben, ob das Drehmoment bei allen Drehzahlen unverändert 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 unverändertem Drehmomente bei der höheren Drehzahl die Wicklungshälften in Reihe und bei der niederen Drehzahl parallel liegen (Abb. 73). Bei gleichbleibender Leistung sind die Wicklungshälften stets parallel geschaltet; es wird dann die Änderung der Polzahl durch Umkehr der Stromrichtung in einer Wicklungshälfte bewirkt (Abb. 74).

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 (Abb. 72). Wenn eine Regelung in drei Stufen gefordert wird, erhält der Motor in der Regel eine um-

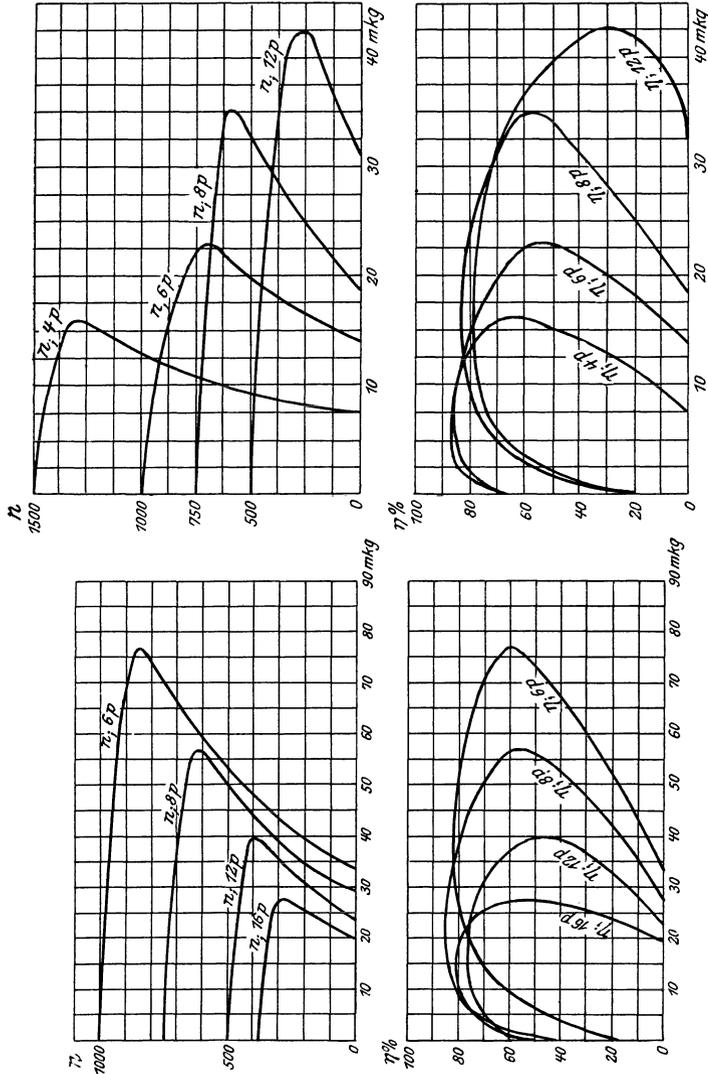


Abb. 76. Drehmoment = gleichbleibend
 Drehzahlen und Wirkungsgrade bei einem polumschaltbaren Drehstrom-Asynchronmotor (4 Drehzahlen).
 Abb. 77. Leistung =
 Drehzahlen und Wirkungsgrade bei einem polumschaltbaren Drehstrom-Asynchronmotor (4 Drehzahlen).

schaltbare Wicklung und außerdem eine zweite Wicklung, deren Polzahl der dritten Drehzahl angepaßt ist. In ähnlicher Weise wird verfahren, wenn vier Drehzahlen verlangt werden.

Das Anlassen und Überschalten von einer Drehzahl zur anderen erfolgt durch Umschalter, die je nach der Höhe der Spannung aus-

gebildet sind. Abb. 75 zeigt ein vom Sachsenwerk besonders durchgebildetes Schaltgerät mit einem mehrfach angezapften Anlaßtransformator, der dem Motor beim Anlassen und Überschalten zunächst niedrige Spannung zuführt. Schaltwalze und Anlaßtransformator sind zusammengebaut und liegen unter Öl. Das Schalten erfolgt durch die Betätigung nur eines Handrades, wodurch Bedienungsfehler vermieden werden¹.

In den Abb. 76 und 77 sind die Betriebskennlinien eines Drehstromstufenmotors sowohl für gleiches Drehmoment als auch für gleiche Leistung gezeichnet. Man erkennt aus denselben ohne besondere Erklärung, wie sich Drehzahl und Wirkungsgrad zueinander verhalten. Diese

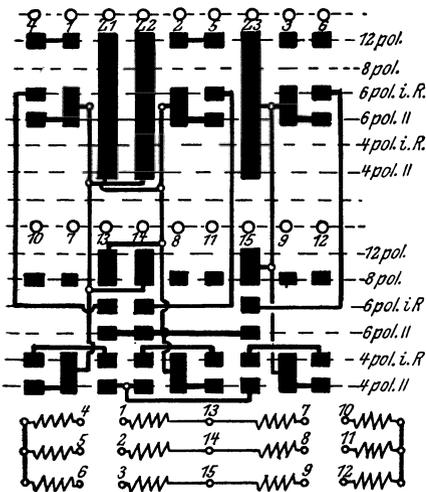


Abb. 78. Schaltbild für die Polumschaltung eines Drehstrom-Asynchronmotors mit 4 Drehzahlen.

Kennlinien sind von der Maschinenfabrik Oerlikon veröffentlicht² worden und beziehen sich auf einen polumschaltbaren Motor mit zwei getrennten Wicklungen im Ständer, von denen jede von der einfachen auf die doppelte Polzahl umgeschaltet werden kann. Die Umschaltung erfolgt nach dem Schaltbilde Abb. 78. Wird bei allen Geschwindigkeiten ungefähr gleichbleibendes Drehmoment verlangt, so kommen aus den Schaltmöglichkeiten nach Abb. 78 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 gleich-

bleiben (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.

Zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit zwischen einem mit Widerständen im Läuferkreise geregelten und einem polumschaltbaren Motor sind in Zahlentafel 2 die Werte für Leistung, Drehzahl, Verluste und Leistungsfaktor zusammengestellt einmal bei quadratisch mit der Drehzahl abnehmendem Drehmomente und dann bei Regelung mit unverändertem Drehmomente eines Sachsenwerksmotors von 165 kW Leistung bei 975 Umdr./min. Die Überlegenheit des polumschaltbaren Motors tritt besonders bei den niedrigeren Drehzahlen in die Erscheinung. Wie beim gewöhnlichen Kurzschlußläufermotor kann auch hier

¹ Tellert, F.: Polumschaltbare Motoren, Fortschritte im Bau und in der Anwendung. Sachsenwerk-Mitt. 1929, H. 1, S. 20.

² Schweiz. Bauzg. 54, Nr. 12 vom 18. Sept. 1909 und E. K. B. 1909, H. 4 u. 5. O. Knöpfli: Neuer sechsstufiger Motor und die Verwendung der Stufenmotoren zum Antriebe von Stoffdruckmaschinen.

zur Verminderung des Anlaufstromstoßes der Doppelkäfigläufer Verwendung finden.

Nur der Vollständigkeit wegen sei erwähnt, daß für besondere Fälle auch polumschaltbare Schleifringläufermotoren gebaut werden, so z. B. wenn nur zwei Drehzahlen verlangt werden, große Leistung und unmittelbarer Hochspannungsanschluß in Frage kommen und die Stromstöße beim Anlassen und Überschalten, die der Kurzschlußläufer bedingt, vom Netz nicht ertragen werden können.

Zahlentafel 2.

Abgegebene Leistung kW	Betriebsdrehzahl i. d. Min.	Schleifringmotor mit Widerstandsregelung		Polumschaltbarer K.L. Motor	
		Verluste kW	$\cos \varphi_M$	Verluste kW	$\cos \varphi_M$
a) Quadratisch mit der Drehzahl abnehmendes Drehmoment					
165	975	14,0	0,90	14,0	0,91
70	730	33,4	0,83	7,5	0,88
20,3	485	28,0	0,62	3,0	0,78
b) Gleichbleibendes Drehmoment					
165	975	14,0	0,88	14,0	0,91
124	735	54,5	0,88	11,1	0,89
82	485	96,8	0,88	8,1	0,84

Einen mit Rücksicht auf die sonstigen Vorzüge der Polumschaltung nicht übermäßig ins Gewicht fallenden Nachteil hat aber auch diese 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 schlechter als beim gewöhnlichen Motor. Wie stark aber zugunsten des polumschaltbaren Motors der Wirkungsgradunterschied bei dieser Regelung gegenüber derjenigen mittels Widerständen im Läuferstromkreise ist, zeigen die in Abb. 79 gezeichneten Kennlinien. Sie gelten für gleichbleibendes Drehmoment.

Das über das Anlauf- und Betriebsdrehmoment beim Kurzschlußläufermotor Gesagte gilt für den polumschaltbaren Motor indessen nicht mehr. Über die Verhältnisse zwischen Anlauf- und Vollaststrom bei unveränderter Netzspannung und zwischen Betriebsdrehmoment und Anlaufmoment gibt für den erwähnten Oerlikonmotor die Zahlentafel 3

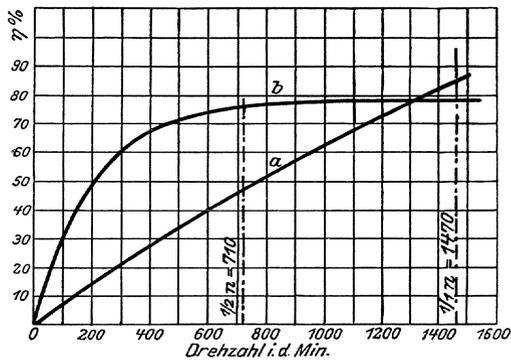


Abb. 79. Wirkungsgradkennlinien bei Regelung a durch Läuferwiderstand, b durch Polumschaltung.

die einzelnen Werte für die verschiedenen Polzahlen an. Bei der 24 poligen Schaltung beträgt die Anlaufstromstärke das Doppelte der Betriebsstromstärke, und das Anlaufmoment ist etwa das 1,87fache des Betriebsdrehmomentes. Beim Umschalten auf eine geringere Polzahl somit auf

Zahlentafel 3.

Polzahl	Verhältnis der Vollast- zur Anlaufstromstärke	Verhältnis des Betriebs- 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

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, 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 Kurzschlußläufermotor ohne besondere Anlaßvorrichtungen.

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

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. 103 wird dieses noch besonders behandelt werden.

Der Polumschaltung haftet schließlich 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.

i) **Die Kaskadenschaltung.** Um den Leistungsverlust, der beim Schleifringmotor im Regelwiderstande entsteht, nutzbar zu machen, sind eine ganze Reihe von Schaltungen entwickelt und in die Praxis eingeführt worden, die alle mehr oder weniger den Grundgedanken aufweisen, die an den Läuferklemmen verfügbare elektrische Leistung einem zweiten Motor zuzuführen, der dann seinerseits auch wiederum mechanische Leistung abgeben kann. Eine Schaltung dieser Art ist die Kaskadenschaltung. Sie wird abgesehen von der Benutzung für elektrische Bahnen in der Hauptsache für Grubenlüfter u. dgl. angewendet.

Die Schaltung ist folgende: (Abb. 80) von zwei miteinander verbundenen asynchronen Motoren wird der eine (*St.W₁* und *L.W₁*.) an

das vorhandene Netz angeschlossen, während der zweite (*St.W₂*. und *L.W₂*.) seinen Strom aus dem Läufer des ersten erhält.

Bezeichnet:

- p_1 die Polpaarzahl des Motors I (Vordermotor),
 p_2 die Polpaarzahl des Motors II (Hintermotor),

dann ist die Drehzahl des Maschinensatzes:

$$n = \frac{60 \cdot \nu}{p_1 + p_2}. \quad (74)$$

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

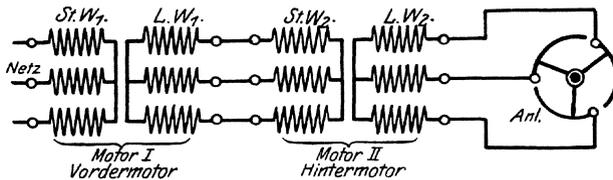


Abb. 80. Drehzahlregelung beim Drehstrom-Asynchronmotor durch Kaskadenschaltung.

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

- N_1 die dem Motor I zugeführte elektrische Leistung,
 $N_{n,1}$ die vom Motor I abgegebene mechanische Leistung,
 N_2 die dem Motor II zugeführte elektrische Leistung,
 $N_{n,2}$ die vom Motor II abgegebene mechanische Leistung,

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

$$V_1 = N_2.$$

Nach früherem war:

$$V_1 = s_1 \cdot N_1;$$

in gleicher Weise ist also auch hier:

$$V_2 = s_2 \cdot N_2,$$

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

Durch Umrechnung findet man:

$$\frac{N_{n,2}}{N_{n,1}} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{n_2}{n_1}, \quad (75)$$

d. h. die ganze von beiden Motoren abgegebene Leistung $N_n = N_{n,1} + N_{n,2}$ verteilt sich so, wie die Produkte aus Polzahl und Drehzahl, und wenn die Polzahlen einander gleich sind, wie die Drehzahlen. Wird die For-

derung gestellt, daß beide Motoren gleiche Leistungen hergeben sollen, so müssen sich nach Gl. (75) 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 die Drehzahlen gleich sein. Das ist erreicht, wenn beide Motoren fest miteinander gekuppelt sind. Die Schlüpfungen für diesen Fall sind:

$$\text{bzw. } \left. \begin{aligned} s_2 &= 2 - \frac{1}{s_1}, \\ s_1 &= \frac{1}{2 - s_2}. \end{aligned} \right\} \quad (76)$$

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:

$$s_1 = \frac{1}{1 + \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{p_1}{p_2} (1 - s_2)}, \quad (77)$$

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 Maschinensatzes erfolgt durch Widerstände im Läuferstromkreise des zweiten Motors.

Diese Form der Drehzahländerung ist naturgemäß durchaus günstig. Sie hat aber den Nachteil der kostspieligen Anlage durch die Verwendung von zwei Motoren, und außerdem erfordert der Maschinensatz 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 brauchbar.

Die Notwendigkeit, zwei oder mehrere Drehzahlen für dauernde Einschaltung zur Verfügung zu haben, mit denen vor allen Dingen wirtschaftlich gefahren werden kann, findet sich häufiger beim Antriebe großer Lüfter zur Bewetterung von Grubenanlagen. Während der Schichtzeiten hat der Lüfter die volle Luftmenge zu fördern; dagegen sind am Wochenschluß und Feiertags geringere Luftmengen erforderlich; der Lüfter kann also in letzterem Falle langsamer laufen. Ferner muß mit dem fortschreitenden Ausbau der Grube die Lüfterleistung gesteigert werden, was sich zumeist auf einen großen Zeitraum, meist Jahre hinaus, zu erstrecken hat. Also kommt es bei diesen Verhältnissen auf einen stets möglichst hohen Wirkungsgrad des Maschinensatzes an. Da nun in Bergwerken wegen der großen Leistungen für Fördermaschinen, Lokomotiven, Wasserhaltungen usw. und der bedeutenden Entfernungen zwischen Stromerzeuger und Verbraucher heute nur hochgespannter Drehstrom zur Anwendung kommt, und die Lüfter ebenfalls oft große

Leistung zum Antriebe brauchen, kann für die Lüftermotoren auch nur Drehstrom als Stromart benutzt werden, und dann ist die Kaskadenschaltung vorteilhaft. Daß man indessen die Kaskadenschaltung neuerdings weniger anwendet, hat seinen Hauptgrund darin, daß der Leistungsfaktor wesentlich schlechter ist als der anderer Regelungsarten. Es bedarf daher stets besonderer Berechnungen über die Leistungsanlage, die Größe der Generatoren und ihre Ausnutzungsfähigkeit, da der größere Blindstrom, den die Kaskadenschaltung erfordert, unter Umständen recht beträchtlich schlechtere Ausnutzung der Stromerzeuger und Zuleitungen verursacht¹. Bei Fremdstrombezug gilt das in besonderem Maße, sofern der Tarif auch auf den Leistungsfaktor abgestellt ist, worauf bereits auf S. 60 hingewiesen wurde. In Abb. 81 und 82 sind aus den Zederbohmschen Betrachtungen zwei Schaubilder widergegeben, die die Wirkungsgrad- und Leistungsfaktorunterschiede der verschiedenen Regelarten leicht erkennen lassen. Über die anderen Formen der Kaskadenschaltung wird weiter unten noch eingehender gesprochen.

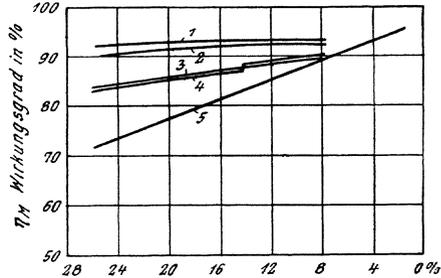


Abb. 81. Wirkungsgrad verschiedener Regelarten, abhängig von der prozentualen Regelung. 1 Kaskadenmotor, 2 Gleichstromkaskade (Krämer), 3 Frequenzwandler (Heyland), 4 Drehstromkaskade (Scherbius), 5 Widerstandsregelung.

In Abb. 83 ist das vollständige Schaltbild zweier in Kaskade geschalteter Motoren gezeichnet. Dasselbe zeigt einige besondere Einzelheiten, die von Bedeutung sind und infolgedessen ausführlicher beschrieben werden sollen.

Es handelt sich um den Antrieb eines Lüfters zur Bergwerksbewetterung. Der Lüfter hat zeitweise die doppelte Wettermenge zu fördern, wozu der vierfache Unterdruck notwendig ist, weil die Strömungswiderstände mit dem Quadrate der Geschwindigkeit wachsen². Diesen Unterdruck erzeugt der Lüfter, wenn er mit der doppelten Drehzahl läuft. Der zweifachen Luftmenge bei vierfachem Unterdruck entspricht die achtfache Leistung des Antriebsmotors, weil die Wettermenge mit der Drehzahl, der Kraftbedarf aber mit der dritten Potenz der Dreh-

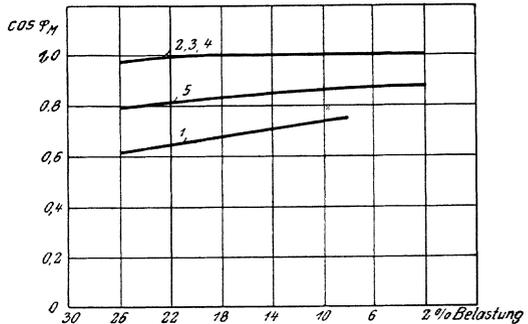


Abb. 82. Leistungsfaktoren verschiedener Regelarten, abhängig von der prozentualen Belastung. 1 Kaskadenmotor, 2 Gleichstromkaskade (Krämer), 3 Frequenzwandler (Heyland), 4 Drehstromkaskade (Scherbius), 5 Widerstandsregelung.

¹ Zederbohm: Ventilatorantrieb mit Drehstrom-Kaskadenmotor auf der Zeche Werne: Glückauf 1912, Nr. 24.

² Über Lüfter befinden sich auf Seite 365 u. f. einige Bemerkungen.

zahl zunimmt. Es sind nun ein 370-kW-Motor mit 12 Polpaaren und ein 160-kW-Motor mit 4 Polpaaren in einem Gehäuse zusammengebaut

zur Aufstellung gekommen. Die Grunddrehzahlen betragen 245 bzw. 182 i. d. Min. bei einer Netzfrequenz = 50. Es kann entweder der Motor *I* allein oder mit dem Motor *II* in Kaskade geschaltet in Betrieb genommen werden. Die Schaltung der Geräte in der Zuführung ist deshalb derart durchgeführt, daß Fehler in der Bedienung des Anlassers, des Umschalters usw. nicht vorkommen 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 Schaltbild Abb. 83 ist folgendermaßen zu lesen: Der hochgespannte Strom, der durch ein dreifach verseiltes Kabel der Motorschaltanlage zugeführt wird, geht zunächst durch Trennschalter¹ (*Tr.*), dann zu Meßgeräten mit zugehörigen Meßwandlern (Spannungszeiger *Sp.Z.* und Stromzeiger *Str.Z.*) und gelangt zum Hauptausschalter (Öl-Schutzschalter *S.Sch._{max}* mit Höchststromrelais *R.* und Öl-widerständen *Ö.W.*).

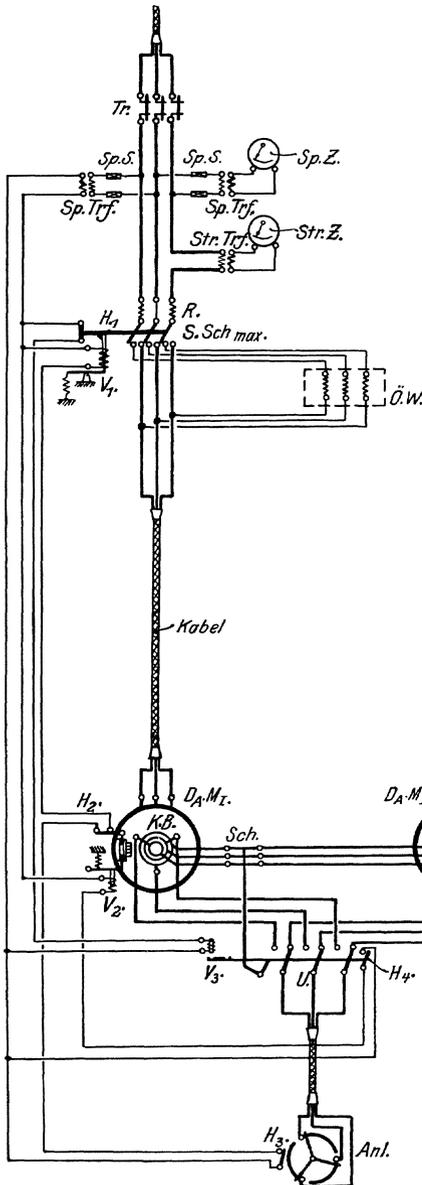


Abb. 83. Schaltbild eines Lüfterantriebes mit Drehstrom-Asynchronmotoren in Kaskade.

licher behandelt. Es empfiehlt sich, schon hier diese Seiten nachzulesen, damit das Schaltbild auch nach dieser Richtung leichter verstanden wird.

¹ Die Schalt-, Sicherungs- und Meßgeräte sind auf S. 147 u. f. ausführlicher

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 Hebelschalter derart zwangsläufig 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 der Maschinensatz in Kaskade in Betrieb zu nehmen ist.

Sowohl die Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung $K.B.$, als auch der Umschalter $U.$ und der Hauptschalter $S.Sch_{max}$ sind elektrisch miteinander verriegelt. Der Strom hierfür wird der Hauptleitung vor dem Höchststromschalter über einen allpolig gesicherten Spannungswandler $Sp.Trf.$ entnommen. Der Hauptschalter kann erst dann geschlossen werden, wenn $K.B.$ außer Tätigkeit ist, die Bürsten also aufliegen, und der Anlasser sich in Nullstellung befindet. In diesem Falle sind $H_2.$ und $H_3.$ (Hilfsschalter) geschlossen, $V_1.$ (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 $V_3.$ schließt. Damit endlich auch beim Kaskaden-Betriebe die Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung im Augenblicke des Anlassens in richtiger Stellung steht, ist die letztere noch mit dem Umschalter durch den Hilfsschalter $H_4.$ 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. 103 ist hierüber weiteres gesagt.

k) Die Regelung der Drehzahl durch besondere Regelsätze. Die Widerstandsregelung befriedigt infolge der ihr anhaftenden Betriebseigenheiten für viele Regelfälle nicht. Die Polumschaltung und die einfache Kaskadenschaltung gestatten Regelung nur in festen Grenzen. Alle bisher behandelten Regelarten bei Drehstrom-Asynchronmotoren zeigen nicht die gleichen Betriebsvorteile, wie sie der geregelte Gleichstrom-Nebenschlußmotor aufweist. Da aber bestimmte Arbeitsmaschinen besonders für große Leistungen einen Motorantrieb fordern, der in der Feinstufigkeit und Gleichmäßigkeit unbedingt der Betriebseigenart des Gleichstrom-Nebenschlußmotors oder der Leonardschaltung bzw. der Gleichstrom-Gruppenschaltung entsprechen muß, so sind auch für den Drehstrommotor in den letzten Jahren eine große Zahl von Schaltungen durchgebildet worden, die im wesentlichen wiederum darin bestehen, daß die Regelbarkeit durch Änderung der Schlüpfung s erreicht wird. Diese Änderung der Schlüpfung erfolgt durch Entnahme elektrischer Leistung aus dem Läufer und Nutzbarmachung in besonderen Maschinen entweder in Form mechanischer oder elektrischer Leistung. Der Vorteil der einfachen Kaskadenschaltung, daß die Regelung annähernd verlustlos erfolgt, bleibt voll bestehen: Die zu diesem

Zwecke verbundenen Maschinen bezeichnet man zusammengefaßt als Regelsatz.

Am gebräuchlichsten sind folgende Regelsätze¹:

1. Drehstromkaskade mit Hintermotor (Brown-Boveri-Scherbius-Krämer),
2. Drehstrom-Gleichstromkaskade mit Hintermotor (Linseman, Krämer),
3. Drehstromkaskade mit Umformer (Siemens-Schuckert-Heyland, Brown-Boveri, Scherbius),
4. Drehstrom-Nebenschlußkaskade.

1. Drehstromkaskade mit Hintermotor (Brown-Boveri, Scherbius, Krämer). In Abb. 84 ist das Schaltbild für diese Form gezeichnet. Sie besteht darin, daß als Haupt- oder Vordermotor ein gewöhnlicher

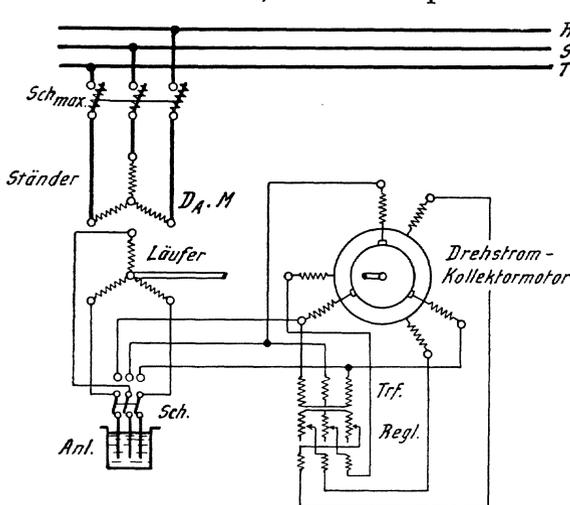


Abb. 84. Drehstromkaskade mit Hintermotor.

Weise mit Hilfe eines Anlassers *Anl.* in Betrieb gesetzt wird. Während dieser Zeit ist der Hintermotor elektrisch abgetrennt (Umschalter *Sch.*) und läuft nur mechanisch mit. Ist die höchste Leerlaufdrehzahl erreicht, dann schaltet man den Läufer des Vordermotors auf den Ständer des Hintermotors um. Solange der Vordermotor im Leerlauf bleibt, ist die Leistung des Hintermotors Null, weil der Läufer des Vordermotors keine Leistung aufnimmt. Soll nun die Drehzahlregelung vorgenommen werden, so wird die Erregerwicklung des Hintermotors eingeschaltet und dann mit Hilfe des Regeltransformators *Reg.Trf.* die gewünschte Drehzahl des Maschinensatzes eingestellt. Auf diese Weise wird die dem Kollektormotor zugeführte Spannung geändert, wodurch dem Vordermotor ebenfalls die Eigenschaft eines Kollektormotors gegeben wird. Die an der Welle

Induktionsmotor (*D.A.M.*) benutzt wird, dessen Läufer mit einem Drehstrom-Kollektormotor in Kaskade geschaltet und mechanisch gekuppelt wird. Die Läuferleistung des Vordermotors wird in mechanische Leistung umgeformt und an die Welle des Vordermotors zurückgegeben.

Die Regelung des Vordermotors wird bei dieser Schaltung folgendermaßen erzielt:

Zunächst der Anlauf wird dadurch bewirkt, daß der Vordermotor allein in der üblichen

¹ Baudisch: Regelbare Drehstromantriebe für Maschinen mit quadratisch ansteigendem Moment. Siemens-Zeitschrift 1925 und erweiterter Sonderdruck.

des Maschinensatzes erforderliche Leistung verteilt sich dabei auf Vorder- und Hintermotor derart, daß der Hintermotor eine der Drehzahlregelung des Vordermotors prozentuale Leistung entwickelt. Soll z. B. die Drehzahlregelung 30 vH im Höchsthalle betragen, dann ist der Kollektormotor nur für 30 vH der Leistung des Vordermotors zu bemessen. Je nachdem der Hintermotor als Hauptschluß- oder Nebenschlußmotor arbeitet, richtet sich die Arbeitsweise des ganzen Maschinensatzes.

Auch die Beseitigung der Phasenverschiebung, also der Leistungsfaktor 1 kann erzielt werden.

Die Grundeigenschaft hinsichtlich der Arbeitsweise eines Maschinensatzes nach dieser Schaltung liegt darin, daß die Leistung bei allen Drehzahlen innerhalb des Regelbereiches unverändert bleibt. Das Drehmoment wächst dabei im gleichen Verhältnisse, wie die Drehzahl abnimmt.

2. Drehstrom-Gleichstromkaskade mit Hintermotor (Linseman, Krämer). Bei dieser Form tritt an Stelle des Drehstrom-Kollektormotors als Hintermotor ein freilaufender Einankerumformer, der die Läuferleistung des Vordermotors in Gleichstrom umformt und an einen mit dem Vordermotor gekuppelten Gleichstrommotor weitergibt. Es wird also wiederum die Läuferleistung durch den Hintermotor unter den verhältnismäßig sehr geringen Verlusten im Einankerumformer und Gleichstrommotor nutzbar gemacht. Die Abb. 85 zeigt das Schaltbild.

Das Anlassen bis zur höchsten Leerlaufsdrehzahl geschieht in gleicher Weise wie bei der Kaskade nach I. durch den über den Schalter *Sch.₁* mit den Schleifringen des Induktionsmotors verbundenen Anlasser *Anl.* Der Schalter *Sch.₂* ist offen. Soll die Regelung vorgenommen werden, dann wird der Einankerumformer zunächst erregt und der Schalter *Sch.₂* geschlossen. Da nach S. 183 die Drehzahl des Einankerumformers abhängig ist von der Frequenz des zugeführten Stromes, wird also der Umformer eine der an den Schleifringen des Läufers des Vordermotors vorhandenen Frequenz entsprechende Drehzahl annehmen. Der Hintermotor *G.M.* bleibt vorerst noch unerregt. Hierauf wird der Anlasser *Anl.* ausgeschaltet. Erregt man nun den Gleichstrom-Hintermotor *G.M.*, so entnimmt derselbe über den Einankerumformer

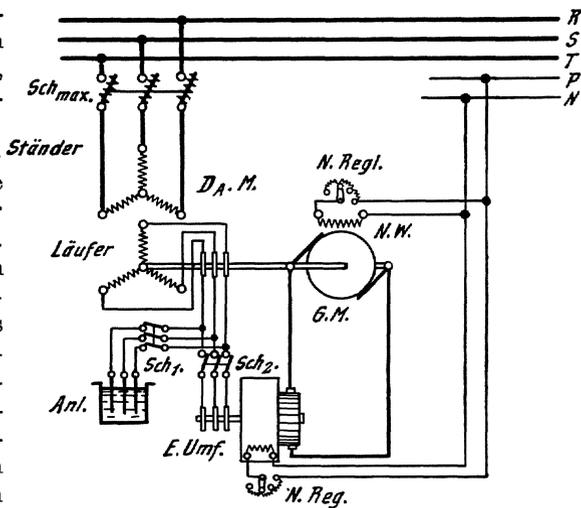


Abb. 85. Drehstrom-Gleichstromkaskade mit Hintermotor.

elektrische Leistung aus dem Läufer des Vordermotors, und die Drehzahl des Maschinensatzes sinkt. Mit zunehmender Verstärkung der Erregung des Hintermotors kann die Drehzahl weiter vermindert werden. Der Leistungsanteil des Hintermotors entspricht wiederum der Drehzahlverminderung des Vordermotors. Es kann infolgedessen jede gewünschte Drehzahl innerhalb des Regelbereiches fest eingestellt werden. Für die Größe der Hintermaschine gilt das gleiche wie für die Kaskade nach 1., sie entspricht also dem Prozentsatze der Regelung. Durch Einstellen der Erregung des Einankerumformers kann der Leistungsfaktor des Regelsatzes auf den Wert 1 bei allen Belastungen gebracht werden.

Die elektrische Arbeitsweise dieses Maschinensatzes ist ebenfalls gleich derjenigen der Drehstromkaskade mit Hintermotor d. h.

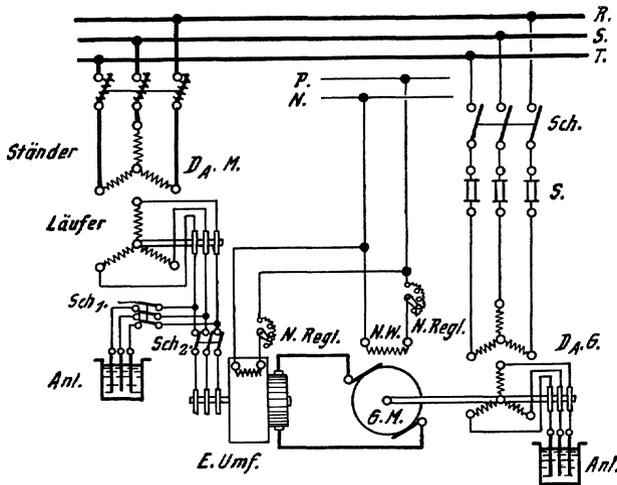


Abb. 86. Kaskade mit Einankerumformer.

gleichbleibende Leistung bei allen Drehzahlen innerhalb des Regelbereiches.

Die Spannung für den Einankerumformer ergibt sich aus der Läufer-Spannung des Vordermotors, die den besten elektrischen Verhältnissen für den Umformer entsprechend bemessen werden kann.

Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß dem Maschinensatz auch ein gewisser Schlupf erteilt werden kann und dadurch Schwungmassen zur Mitarbeit und zum Leistungsausgleich herangezogen werden können, wie es in Betrieben mit stark schwankenden Arbeitsbedingungen oftmals erwünscht oder notwendig ist. Das ist dadurch möglich, daß der Einankerumformer Strom veränderlicher Frequenz aus dem Läufer des Vordermotors erhält und infolgedessen mit veränderlicher Drehzahl läuft. Bei dieser Arbeitsweise muß der Gleichstrom-Hintermotor eine dem gewünschten Drehzahlabfalle entsprechend bemessene Doppelschlußwicklung erhalten. Ein solcher Regelsatz eignet sich für die schwersten Belastungsverhältnisse und großen Regelbereich.

Bei der Kaskadenschaltung mit Umformer sinkt mit der Drehzahlverminderung die Leistung (Lüfter- und Kompressorenantrieb), es bleibt also das Drehmoment unverändert.

4. Die Drehstrom-Nebenschlußkaskade. Dieser Regelsatz besteht aus einem Asynchronmotor ($D_A.M.$) und einem elektrisch und mechanisch mit diesem gekuppelten Drehstrom-Nebenschlußmotor ($E.M.$ = Erregermaschine). Wie schon die Bezeichnung erkennen läßt, arbeitet dieser Regelsatz nach den Kennlinien eines Gleichstrom-nebenschlußmotors und zwar bei unverändertem Drehmoment, sie

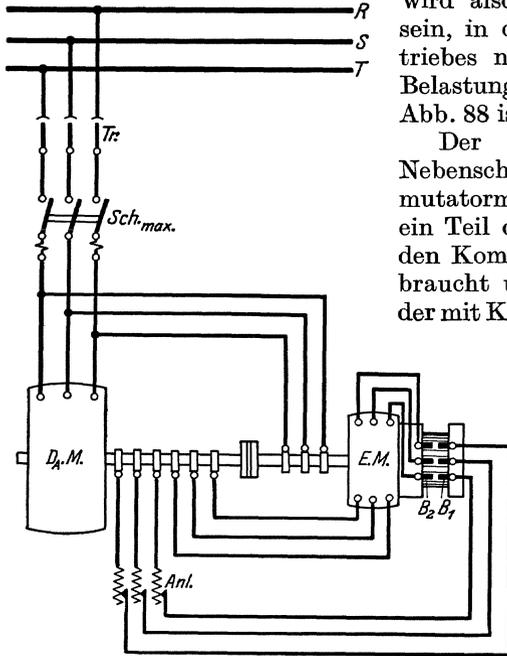


Abb. 88. Drehstrom-Nebenschlußkaskade.

wird also in den Fällen zu wählen sein, in denen die Drehzahl des Antriebes nahezu unabhängig von der Belastung eingehalten werden soll. In Abb. 88 ist das Schaltbild gezeichnet.

Der Vorteil der Drehstrom-Nebenschlußkaskade gegenüber Kommutatormotoren liegt darin, daß nur ein Teil der gesamten Leistung über den Kommutator geführt zu werden braucht und damit der teuerste Teil der mit Kommutator regelbaren Drehstrommaschine erheblich kleiner und billiger ausgeführt werden kann. Ferner sind die Kommutierungsschwierigkeiten aus dem gleichen Grunde bei der Kaskade leichter zu beherrschen, wodurch der Regelsatz an Betriebssicherheit gewinnt.

Gegenüber den anderen elektrischen Regelsätzen ist die Drehstrom-Nebenschlußkaskade weiter

dadurch im Vorteil, daß die Kommutator-Hintermaschine besser ausgenutzt wird. Während bei allen anderen Regelsätzen der Kommutator-Hintermaschine nur die Schlupfleistung zugeführt wird, wird der Nebenschlußmotor der Drehstrom-Nebenschlußkaskade auch noch unmittelbar vom Netz gespeist. Insbesondere bei Drehzahlen, die in der Nähe des Synchronismus liegen, führt die Hintermaschine der bisher beschriebenen Regelsätze dem Schlupf entsprechend nur eine geringe Leistung, während die Hintermaschine der Drehstrom-Nebenschlußkaskade bei allen Drehzahlen, also auch in der Nähe des Synchronismus, voll ausgenutzt wird.

Nach Abb. 88 liegen der Ständer des Asynchronmotors und die Schleifringe des Nebenschlußmotors parallel am Netz. Die Läuferwicklung des Asynchronmotors ist offen und erhält 6 Schleifringe. Sie wird

einerseits an die Ständerwicklung des Nebenschlußmotors angeschlossen, andererseits über einen Anlasser *Anl.* mit aufgelöstem Nullpunkt zu dem einen der beiden Bürstensätze des Nebenschlußmotors geführt. Der zweite Bürstensatz liegt am anderen Ende der Ständerwicklung des Nebenschlußmotors. Beide Maschinen besitzen also einen gemeinsamen sekundären Stromkreis, in dem die Läuferwicklung des Asynchronmotors, Ständerwicklung und Bürstensatz des Nebenschlußmotors hintereinander geschaltet sind.

Die beiden Bürstensätze sind zur Drehzahleinstellung mit Hilfe eines Handrades drehbar angeordnet. Steht nur Hochspannung zur Verfügung, so muß mit Rücksicht auf den Drehstrom-Nebenschlußmotor ein Transformator für diesen zwischen Schleifringe und Netz geschaltet werden. Bei kleineren Kaskaden wird der Transformator zweckmäßig so groß bemessen, daß auch der Asynchronmotor von ihm gespeist wird.

Die Verhältnisse in elektrischer Hinsicht für die Regelung sind den bei der Regelung eines Asynchronmotors verwandt. Beim Asynchronmotor muß der aufgedrückten Läufer-Spannung die dem Schlupf entsprechende Läufer-EMK das Gegengewicht halten, d. h. der der Regelung entsprechend aufgedrückten Spannung stellt sich der Schlupf selbsttätig ein. Das gleiche Regelverfahren besteht für den Nebenschlußmotor, nur daß bei dieser läufergespeisten Maschine der Ständerwicklung eine Spannung aufgedrückt wird, die die Ständer-EMK das Gleichgewicht halten muß. Die aufgedrückte Spannung wird in diesem Falle durch Verschieben der Bürstensätze erzeugt. Stehen die Bürsten zugehöriger Phase auf ein und derselben Kommutatorlamelle, so ist die aufgedrückte Spannung Null; der Motor läuft fast synchron. Werden die Bürsten nach verschiedenen Richtungen verschoben, so greifen sie von der über die Schleifringe aufgedrückten Spannung einen der Verschiebung entsprechenden Teil ab und drücken ihn der Ständerwicklung auf. Der Motor ändert dann so lange seine Drehzahl, bis die Ständer-EMK der aufgedrückten Spannung das Gleichgewicht hält.

Bei der Drehstrom-Nebenschlußkaskade wird die Bürstenverschiebung dazu benutzt, den Asynchronmotor gleichzeitig mitzuregeln. Ferner kann diese Kaskade durch die Bürstenverschiebung sowohl übersynchron als auch untersynchron arbeiten. Dadurch ergeben sich besondere Vorteile für die elektrische Ausnutzung der Maschinen. Der Regelbereich liegt etwa zwischen 60 vH untersynchron und 140 vH übersynchron.

Das Anlassen der Kaskade erfolgt mit dem Anlasser *Anl.* im gemeinsamen sekundären Stromkreis. Beide Maschinen werden ans Netz gelegt und laufen gemeinsam belastet, durch den Anlasser in ihrer Stromführung gesteuert, auf die durch die Bürstenverschiebung eingestellte Drehzahl. Die Regelung der Kaskade erfolgt in beliebig feinstufiger Weise durch Bürstenverschiebung mittels des Handrades.

Durch den Nebenschlußmotor kann ferner der Leistungsfaktor der Kaskade bei Vollast und den über- bzw. untersynchronen Höchstdrehzahlen erheblich verbessert werden. In der Nähe des Synchronismus hat die Kaskade den normalen Leistungsfaktor eines Asynchron-

motors. Je nach den Betriebsbedingungen ist es möglich, den besten Leistungsfaktor innerhalb des Regelbereiches auf verschiedene Drehzahlen einzustellen. Das Anwendungsgebiet dieser Kaskade liegt bei mittleren Leistungen und kleinerem Regelbereich, bei dem die Anwendung von reinen Drehstromkommutatoren bereits zu schwierig und zu teuer werden würde, und bei denen andererseits Regelvorrichtungen wie Leonardschaltung, Gleichstrom-Krämersätze usw. wegen der hohen Anlagekosten nicht wirtschaftlich sind.

1) Die Auswahl eines Regelsatzes aus den vielen Formen der Zusammensetzung hat naturgemäß nach bestimmten Gesichtspunkten zu erfolgen, für die maßgebend sind einmal die Arbeitsbedingungen der anzutreibenden Maschine hinsichtlich des Regelbereiches und des Leistungsverlaufes innerhalb desselben, des Anlauf- und Betriebsdrehmomentes, des ruhigen, also stoßfreien Lastverlaufes, zweitens die Stromerzeugungsverhältnisse und die Auswirkung der Arbeitsbedingungen auf diese. Für die ersteren ist der Fachingenieur zuständig. Auf sie näher einzugehen ist nicht Aufgabe dieses Werkes; die an zweiter Stelle genannten Gesichtspunkte dagegen müssen hier besonders erläutert werden, da es auch heute noch vorkommt, daß ihnen nicht immer die erforderliche Bedeutung beigemessen wird, was schon wiederholt zu Mißerfolgen geführt hat. Zu unterscheiden ist dabei zwischen „Eigenanlage“ und „Fernstrombezug“.

In der Eigenanlage mit Antrieb der Generatoren durch Gas- oder Dieselmotoren und beim Fernbezug aus mittleren, selbst aus großen Anlagen ist nicht immer mit gleichbleibender Frequenz und Spannung zu rechnen. Da Einankerumformer und Synchronmaschinen empfindlich gegen Frequenz- und Spannungsschwankungen sind und leicht aus dem Tritt fallen oder zum Pendeln kommen, sind Regelsätze mit Maschinen dieser Art zweckmäßig nicht zu wählen.

In Eigenanlagen wird ferner Stromunterbrechung, Leistungs-factorregelung, stoßweiser Belastungsverlauf oftmals keine wesentliche Rolle spielen, während beim Fernstrombezuge hierin wesentlich andere Verhältnisse vorliegen. Eine Stromunterbrechung wird immer einmal, selbst bei den besten Anlagen, vorkommen können. Der Stromlieferungsvertrag wird Vergünstigungen vorsehen für guten Leistungsfaktor; stoßweiser Belastungsverlauf wird je nach Tarif und dann auch je nach der Größe der Fernstromanlage mehr oder weniger von Bedeutung sein. Entsprechende Bedingungen soll der Regelsatz daher ebenfalls erfüllen z. B. Leistungs-factorregelung, einfachste und schnellste Inbetriebsetzung mit Sicherheitsschaltung beim Ausbleiben und sofortigen Wiederkehren der Spannung, Milderung von Belastungsstößen durch Schwungradentladung u. dgl. Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit schließlich erfordern ebenfalls weitgehendere Beachtung (Anlagekosten einschließlich Platzbedarf usw.) bei Fernstrombezug.

In Abb. 81 waren die Wirkungsgrade der verschiedenen Regelarten einschließlich der reinen Kaskadenschaltung zusammengestellt und zwar für fast gleiche Leistung und Drehzahl über einen Regelbereich von 8 bis 26 vH. Für die gleichen Maschinen zeigte die Abb. 82 die

Kennlinien für den Leistungsfaktor abhängig von der prozentualen Belastung. Aus diesen Kennlinien ist ersichtlich, daß die reine Widerstandsregelung am unvorteilhaftesten ist. Dann folgt die reine Kaskadenschaltung, während die Regelmaschinensätze wesentlich günstigere Werte zu erreichen gestatten.

m) Die elektrische Bremsung. Auch beim asynchronen Drehstrommotor ist eine elektrische Bremsung bei gleicher Drehrichtung und als Nutzbremung möglich, jedoch sind die Betriebsbedingungen für diese Arbeitsweise des Motors grundverschieden von denjenigen für den Gleichstrom-Hauptschluß- und -Nebenschlußmotor. Während bei den Gleichstrommotoren erstlich lediglich das Arbeitsvermögen der auslaufenden Maschine genügt, um die Bremsung durch generatorische Wirkung herbeizuführen und weiter das Vorhandensein einer Netzspannung nicht erforderlich ist, kann beim asynchronen Drehstrommotor dieses Arbeiten nur dann erzielt werden, wenn der Motor durch eine äußere Kraft im gleichen Drehsinne über seine synchrone Drehzahl angetrieben wird, und ferner die Netzspannung vorhanden ist. Bei der übersynchronen Drehzahl überwiegt die elektromotorische Gegenkraft, die vom Läufer in der Ständerwicklung erzeugt wird, gegen die dem Motor vom Netz aufgedrückte Spannung, und nur dann kann Strom ins Netz abgegeben werden.

Ist die Netzspannung nicht vorhanden, ist die Generatorwirkung des Motors, also ein Bremsen nicht möglich. Das ist ganz besonders zu beachten z. B. dann, wenn Förderanlagen mit Asynchronmotorenantrieb an eine Fernkraftübertragung angeschlossen werden sollen.

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

$$s' = \frac{n_2 - n_1}{n_2} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2}, \quad (78)$$

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

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

und aus Gl. (60) wird der Verlust:

$$V_2 = M_a(\omega_1 - \omega_2) = -s' \cdot \omega_2 \cdot M_a, \quad (79)$$

oder da:

$$\omega_2 \cdot M_a = N'_2,$$

so wird:

$$V_2 = -s' \cdot N'_2. \quad (80)$$

Der Verlust wird negativ, d. h. die mechanische Leistung N'_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:

$$N_a = \omega_1 \cdot M_a = \omega_2(1 - s') M_a, \quad (81)$$

und die mechanische Leistung:

$$N'_2 = \omega_2 \cdot M_a. \quad (82)$$

Der asynchrone Drehstrommotor wird als Asynchrongenerator auch unmittelbar als Stromerzeuger in ausgedehnten Kraftübertragungsanlagen benutzt, worauf im IV. Bande näher eingegangen ist.

Bei der Kaskadenschaltung ist diese Nutzbremung folgendermaßen zu erzielen. Arbeiten die beiden Motoren nicht in Hintereinanderschaltung, sondern parallel also mit der höchsten 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 Parallellauf in die Kaskadenschaltung so schnell und ohne Unterbrechung beim Arbeitsmaschinenantriebe äußerst selten vorkommt. Die Drehzahlübergänge vollziehen sich vielmehr allmählich. Bei der Schaltung nach Abb. 83 wäre die Nutzbremung auf diese Art ebenfalls nicht möglich. Nur bei Drehstrombahnen mit zwei oder vier Triebmotoren hat diese Bremswirkung und Stromrückgewinnungsmöglichkeit praktische Bedeutung erlangt, weil hierzu auch die Nutzbremung im Gefälle hinzukommt¹.

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

Neben diesem übersynchronen Betriebe, wobei der Drehsinn des Motors nicht geändert wird, 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 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. (80) der Verlust V_2 größer als die zugeführte Leistung N_a , d. h., daß dem Motor jetzt sowohl elektrische wie auch mechanische Leistung zugeführt werden müssen, und beide im Läuferstromkreise in Wärme umgesetzt werden. Das folgt ferner auch aus $N'_2 = \omega_2 \cdot M_a$, wobei jetzt ω_2 negativ, also deshalb auch die mechanische Leistung N'_2 negativ ist. Der Motor wirkt demnach vollständig als Bremse.

In Abb. 89² ist die Arbeitsweise des asynchronen Drehstrommotors für alle vorkommenden Schlüpfungen s in den Grenzen von 0 bis + 1

¹ Siehe Kyser: Die elektrischen Bahnen und ihre Betriebsmittel. Band 9 der Elektrotechnik in Einzeldarstellungen.

² Benischke, Dr.: Der Asynchronmotor. Elektrotechnik in Einzeldarstellungen Bd. 5.

(Motor), $+1$ bis $+\infty$ (Bremsen) und 0 bis $-\infty$ (Generator) durch Schaulinien für N_a , N_2 , $\cos \varphi_M$, I_1 und M_a dargestellt und wohl ohne weitere Erklärung verständlich.

n) Die besondere Leistungsfaktorverbesserung durch den Drehstrom-Asynchronmotor.

1. Der kompensierte Drehstrom-Asynchronmotor im allgemeinen. Wie bereits auf S. 53 gesagt, entnimmt zur Aufrechterhaltung der in der Maschine auftretenden magnetischen Felder jeder gewöhnliche Induktionsmotor dem Netz einen gewissen Magnetisierungsstrom, der seiner

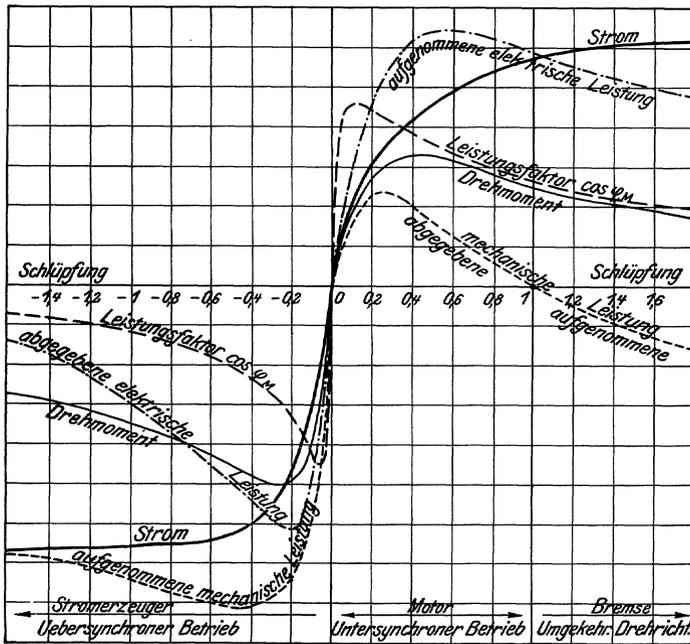


Abb. 89. Betriebskennlinien für alle Arbeitsweisen des Drehstrom-Asynchronmotors in Abhängigkeit von der Schlupfung.

Größe nach unabhängig von der Belastung ist. Dadurch bleibt der Leistungsfaktor des Motors stets unter Eins. Wie weiter aus Abb. 49 zu ersehen ist, haben langsam laufende Motoren einen schlechteren Leistungsfaktor als raschlaufende und ferner wird der Leistungsfaktor mit abnehmender Belastung bei allen Asynchronmotoren immer schlechter (Abb. 90). Mit der außerordentlichen Zunahme der Benutzung des Drehstrom-Asynchronmotors tritt dieser Nachteil des schlechten Leistungsfaktors ganz besonders nach der wirtschaftlichen Seite scharf in die Erscheinung. Gesamtleistungsfaktoren einzelner Stromversorgungsgebiete, die überwiegenden Motorenanschluß aufweisen, mit Werten bis 0,6 oder 0,5 am Tage sind häufig anzutreffen. Die Nachteile eines solchen schlechten Leistungsfaktors für die Gesamtanlagen sind auf S. 59 bereits

gekennzeichnet worden. Von den Mitteln, die je nach den Verhältnissen in den verschiedensten Formen zur Verbesserung des Leistungsfaktors angewendet werden, sollen im folgenden nur diejenigen zur Behandlung

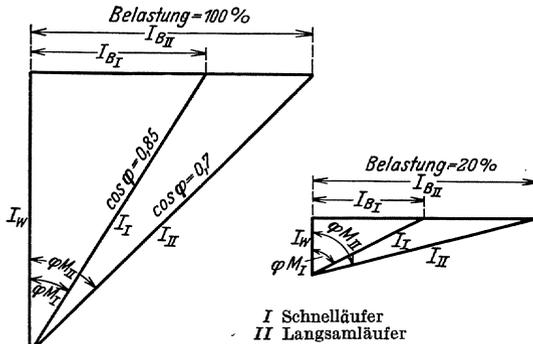


Abb. 90. Einfluß des Motorblindstromes I_B bei verschiedener Belastung auf den Leistungsfaktor des Motors.

kommen, die beim Motor unmittelbar den von diesem aufgenommenen Blindstrom beseitigen, oder wie man auch sagt, „kompensieren“. Die Leistungsfaktorverbesserung wird hier also an der Stelle vorgenommen, an der der Blindstrom auftritt, d. h. an der wirtschaftlich richtigsten Stelle. Der Grundgedanke beruht darauf, daß der Magnetisierungsstrom nicht mehr dem Netze

entnommen, sondern dem Läufer des Asynchronmotors unmittelbar zugeführt wird.

Führt man einem gewöhnlichen Gleichstromanker, der zum Zwecke des Schlusses der magnetischen Kraftlinien in einem Eisengehäuse läuft, an drei gleichmäßig am Umfange verteilten Punkten über Bürsten (Abb. 91) Drehstrom zu, so entwickelt sich ein verhältnismäßig starkes Drehfeld, das mit einer der Frequenz des Drehstromes entsprechenden Geschwindigkeit über den Ankerumfang hinwegstreicht. Die in der Wicklung induzierte Spannung ist abhängig von der Drehgeschwindigkeit des Ankers. Bei Stillstand ist dieser Apparat gleich einer gewöhnlichen Drosselspule. Der Ankerstrom eilt der Spannung an den Bürsten um 90° nach. Dreht sich der Anker im Sinne des umlaufenden Feldes, so wird die Schnittgeschwindigkeit der Ankerleiter mit dem Felde geringer und gleich Null, wenn sich die Ankerleiter mit der gleichen Schnelligkeit bewegen wie das Drehfeld, wenn also Synchronismus zwischen beiden besteht. Das ist aber gleichbedeutend mit Synchronismus zwischen der Drehzahl des Ankers und der Frequenz der zugeführten Ströme. Werden die Ankerleiter mechanisch schneller gedreht als das Drehfeld, so kehrt sich die Schnitttrichtung um, und es wird eine der vorherigen entgegengesetzt gerichtete Spannung induziert. Diese eilt also nunmehr dem erzeugenden Strome um 90° nach. Das bedeutet dann Entnahme phasenvoreilenden Stromes aus dem Netze, oder, was dasselbe ist, Abgabe von phasennacheilendem Strome an das Netz.

Wird eine solche Maschine an den Läufer eines Drehstrommotors (Abb. 91) angeschlossen, ihr also der — sehr niedrige Frequenz besitzende — Läuferstrom zugeführt, so bedarf es für den Gleichstromanker nur einer verhältnismäßig geringen Drehzahl, um ihm Übersynchronismus gegenüber der Läufer- oder Schlupffrequenz zu geben

und ihn dadurch zur Lieferung von Magnetisierungsstrom an den Asynchronmotorläufer zu befähigen. Der Ständer des Asynchronmotors nimmt dann aus dem Netze keinen Magnetisierungsstrom mehr auf, die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung primär also an den Motorklemmen wird aufgehoben, der Motorleistungsfaktor somit $\cos \varphi_M = 1$. Durch entsprechende bauliche Gestaltung des Gleichstromankers und Wahl besonderer Schaltungen, über die noch gesprochen werden wird, kann erreicht werden, daß dem Läufer mehr Magnetisierungsstrom zufließt, als für die Felderzeugung des Hauptmotors erforderlich ist. Dieser

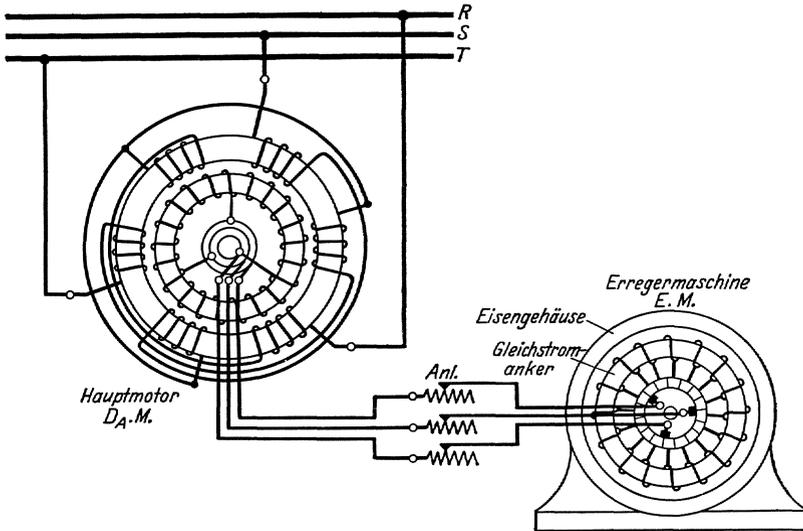


Abb. 91. Allgemeinschaltbild für den komp. Drehstrom-Asynchronmotor.

Mehrbetrag an Magnetisierungsstrom bewirkt eine negative Phasenverschiebung zwischen Netzspannung und Ständerstrom oder, was gleichbedeutend ist, eine Lieferung kapazitiven Stromes an das Netz, der dann zur Kompensierung anderen Blindstromes verfügbar ist. Im erstenen Falle spricht man von einer Eigenkompensierung, im zweiten von einer Überkompensierung. Durch die Überkompensierung kann z. B. in einer Fabrikanlage ein Teil des von kleineren Motoren geforderten Magnetisierungsstromes gedeckt, das Netz also weiter von Blindstrom entlastet werden (Gruppenkompensierung).

Da die Läuferspannung nur der sehr geringen Schlupffrequenz entspricht, ist auch die Leistung, die dem Läufer zur Magnetisierung zugeführt werden muß, verhältnismäßig sehr gering, so daß die Kompensationseinrichtungen klein und billig ausfallen.

Von der Erläuterung der elektrischen Verhältnisse im Motor an Hand von Spannungsdiagrammen¹ muß abgesehen werden, da der Entwurfs-

¹ Rüdberg, R.: EKB 1914, S. 425 und 469. Nehlsen, H.: ETZ 1917, H. 50.

und Betriebsingenieur in der Hauptsache die Arbeitsweise der verschiedenen Ausführungsformen kennen soll, um je nach den Verhältnissen entsprechende Entscheidung treffen zu können.

Hinsichtlich der Schaltung der Erregermaschine, wie diese besondere Gleichstrommaschine genannt wird, werden zwei Grundformen unterschieden, und zwar die Eigenerrregung und die Fremderrregung.

2. Der kompensierte Drehstrom-Asynchronmotor mit eigenerregter Erregermaschine. In Abb. 92 ist das Schaltbild gezeichnet. Dem Gleichstromanker (der Erregermaschine) wird der Läuferstrom unmittelbar zugeführt. Der Schleifringläufer-Anlasser *Anl.* ist mit aufgelöstem Nullpunkt ausgeführt.

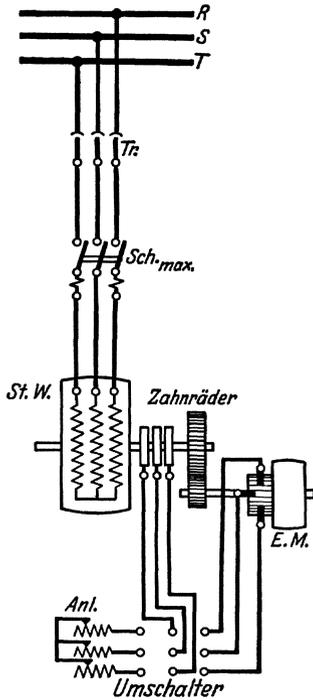


Abb. 92. Schaltbild des kompensierten Drehstrom-Asynchronmotors mit eigenerregter Erregermaschine (angebaut).

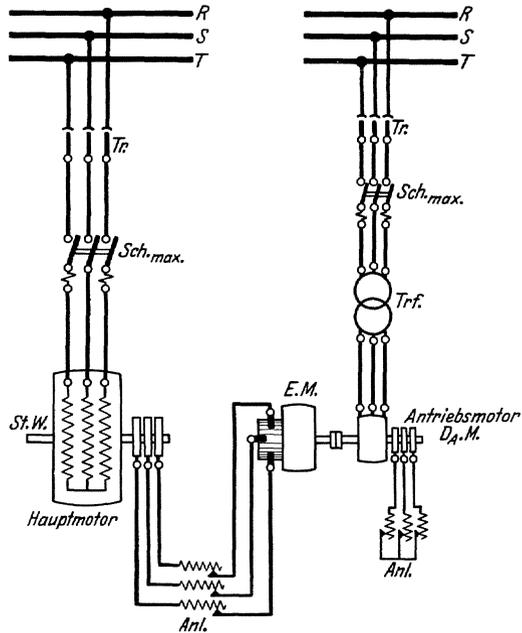


Abb. 93. Schaltbild des kompensierten Drehstrom-Asynchronmotors mit eigenerregter Erregermaschine (getrennte Aufstellung).

Der Hauptmotor liegt am Drehstromnetz. Soll die Erregermaschine einem vorhandenen Motor beigegeben werden, dessen Anlasser keinen aufgelösten Nullpunkt hat, so ist ein dreipoliger Umschalter vorzusehen, durch den an Stelle des Anlassers die Erregermaschine eingeschaltet wird, nachdem der Hauptmotor in Gang gesetzt worden ist. Je nach der Größe und Drehzahl des Hauptmotors und den örtlichen Verhältnissen wird die Erregermaschine entweder unmittelbar oder über ein Zahnrad-, Riemen- oder Kettenvorlege mit dem Hauptmotor verbunden (Abb. 92) oder getrennt aufgestellt. Im letzteren Falle

ist die Erregermaschine durch einen besonderen Drehstrommotor je nach der Höhe der Netzspannung ohne oder mit Zwischentransformator anzutreiben (Abb. 93). Falls Gleichstrom vorhanden, kann auch ein Gleichstrom-Nebenschlußmotor verwendet werden. Wird der Hauptmotor häufig angelassen und stillgesetzt, dann ist es empfehlenswert, die Erregermaschine vor dem Hauptmotor anzulassen, um ihre Wirkung möglichst auch während der Anlaufzeit auszunutzen.

Dem Vorteil der Einfachheit und dem verhältnismäßig billigen Beschaffungspreise steht elektrisch ein Nachteil gegenüber, der betriebswirtschaftlich besonders zu beachten ist. Da das Feld, in welchem der Gleichstromanker läuft, durch die eigene Erregung der Ankerströme

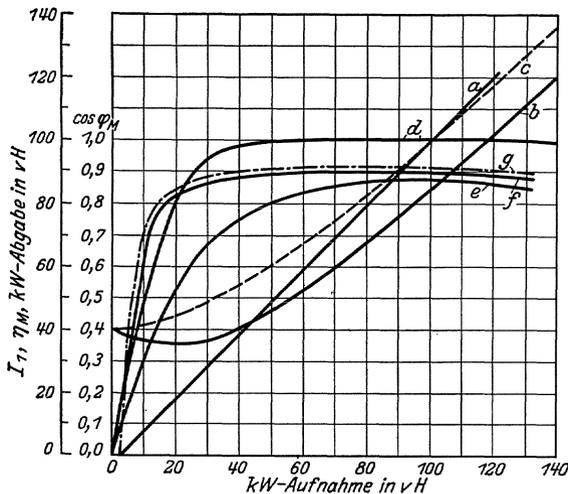


Abb. 94. Vergleich der Betriebskennlinien eines komp. Drehstrom-Asynchronmotors mit eigen-erregter Erregermaschine und eines Asynchronmotors. *a* Leistung, *b* Aufgenommener Strom des komp. Motors. *c* Aufgenommener Strom des Asynchronmotors. *d* Leistungsfaktor des komp. Motors. *e* Leistungsfaktor des Asynchronmotors. *f* Wirkungsgrad des komp. Motors. *g* Wirkungsgrad des Asynchronmotors.

hervorgerufen wird, kann es seine volle Wirkung für die Leistungsfaktorverbesserung nur dann erzielen, wenn der Strom und damit die Belastung des Hauptmotors der Vollbelastung entspricht. Mit abnehmender Belastung des Hauptmotors wird die Kompensierung immer geringer, bis sie etwa bei $\frac{1}{3}$ Last schnell ganz abfällt und bei Leerlauf völlig versagt. Abb. 94 zeigt die Betriebskennlinien eines mit eigenerregter Erregermaschine versehenen Drehstrommotors und gleichzeitig den Unterschied gegenüber dem gewöhnlichen Asynchronmotor. Diese Art der Kompensierung ist daher nur dort am Platze, wo der Hauptmotor nicht häufig anzulassen, sondern ständig mit mindestens $\frac{3}{4}$ Last im Betriebe ist.

Wird die Erregermaschine derart gebaut, daß ihre elektromotorische Kraft Voreilung gegen den Strom erhält, so ist es möglich, die Phasenkompensation gegen den Leerlauf zu verbessern.

3. Der kompensierte Asynchronmotor mit fremderregter Erregermaschine. Soll der betriebswirtschaftliche Nachteil der Eigenerrregung vermieden, also die Phasenkompensation auch bei geringer Belastung des Hauptmotors oder im Leerlaufe desselben vorhanden sein, so ist die fremderregte Erregermaschine zu wählen. Bei dieser wird nach Abb. 95 die Gleichstromwicklung noch an drei Schleifringe angeschlossen, die unter Zwischenschaltung eines Transformators mit dem Drehstromnetz verbunden werden.

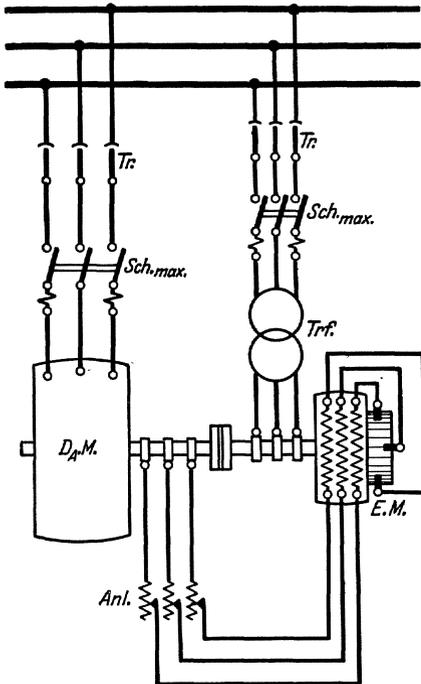


Abb. 95. Schaltbild des komp. Drehstrom-Asynchronmotors mit fremderregter Erregermaschine.

Das Magnetfeld des Gleichstromankers fremderregt, es ist somit unabhängig von den Belastungsverhältnissen des Hauptmotors und kann seine Wirkung für die Phasenverbesserung bei allen Belastungen von Leerlauf bis Vollast ausüben. Da Frequenz und Spannung für den Schleifringanschluß der Erregermaschine übereinstimmen müssen mit den Verhältnissen, wie sie aus dem Läufer des Hauptmotors gegeben sind, wird die richtige Abhängigkeit dadurch erzielt, daß die Schleifringe die Frequenz des Drehstromnetzes erhalten und die Erregermaschine wiederum unmittelbar oder unter Zwischenschaltung eines Übersetzungsgetriebes vom Hauptmotor angetrieben wird, so daß die Kollektor- und Schleifringfrequenzen bei allen Betriebsverhältnissen mit den Ständer- und Läuferfrequenzen des Hauptmotors übereinstimmen. In Abb. 96 sind die Betriebskennlinien eines in dieser Form kompensierten

Motors gezeichnet und auch hier mit denjenigen eines gewöhnlichen Asynchronmotors verglichen.

4. Der kompensierte Drehstrom-Asynchronmotor mit Selbsterregung. Von den bisher behandelten vollständig abweichend ist diese Bauart mit Selbsterregung. Hier erfolgt die Erzeugung des Magnetisierungsstromes im Motor selbst nur mit Hilfe einer kleinen, im Läufer untergebrachten, aus wenigen Windungen bestehenden Hilfswicklung, die mit einem schmalen, neben den Schleifringen sitzenden Kollektor verbunden ist. Abb. 97 zeigt die Schaltung des Sachsenwerkes.

Die Hilfswicklung ist mit der Primärwicklung transformatorisch verkettet, so daß in ihr unabhängig von der Drehzahl eine bei allen Motorbelastungen praktisch gleichbleibende Spannung von Netzfrequenz ent-

steht. Mit Hilfe der auf dem Kommutator schleifenden Bürsten wird die Frequenz dieser Spannung auf die Schlupffrequenz transformiert, so daß sie sich in den Sekundärkreis in Reihe mit der Schlupfspannung einfügen läßt. Durch

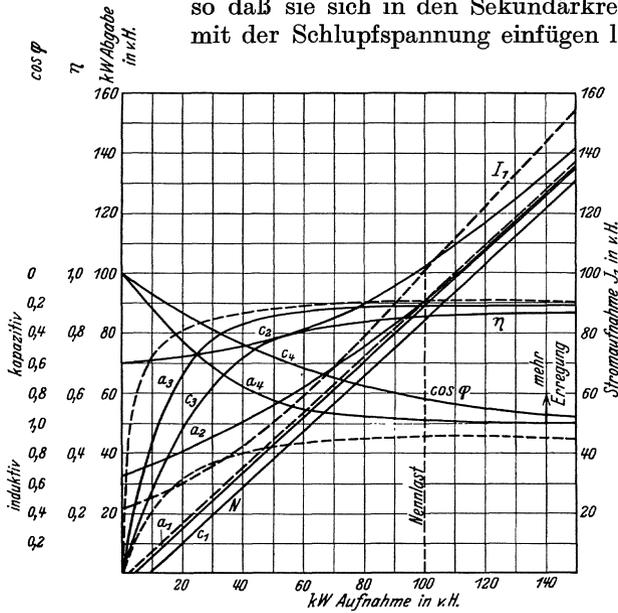


Abb. 96. Vergleich der Betriebskennlinien eines komp. Drehstrom-Asynchronmotors mit fremderregter Erregermaschine und eines Asynchronmotors (---). a_1 c_1 Abgegebene Leistung. a_2 c_2 Aufgenommener Strom. a_3 c_3 Wirkungsgrad. a_4 c_4 Leistungsfaktor. Die Werte c gelten für besseren Leistungsfaktor.

eine entsprechende Stellung des drehbar eingerichteten Kollektor-Bürstenträgers kann die Richtung der Spannung derartig verschoben werden, daß ein voreilender Strom entsteht, d. h., daß die Erzeugung des magnetischen Kraftflusses vom Ständer aus erfolgt. Die primäre, am Netz liegende Wicklung führt daher keinen Magnetisierungsstrom, kann vielmehr sogar noch Magnetisierungsstrom an das Netz abgeben. In Abb. 98 sind die Betriebskennlinien für diesen und einen gleichgroßen Asynchronmotor zusammengestellt. Nach dem Schaltbilde Abb. 97 liegen hier die Schleifringe am Netz und der Anlasser in der Ständerwicklung. — Motoren kleinerer Leistung werden derart gebaut, daß eine voll-

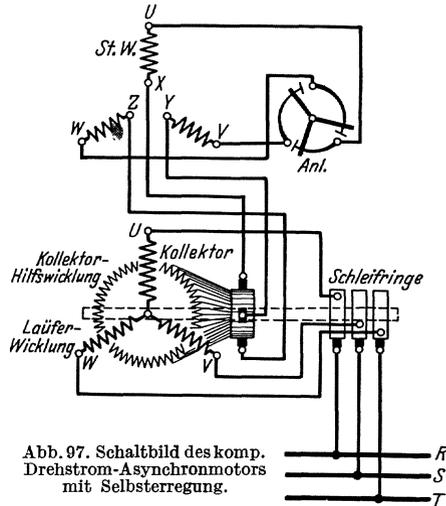


Abb. 97. Schaltbild des komp. Drehstrom-Asynchronmotors mit Selbsterregung.

ständige Phasenkompensation auf $\cos \varphi_M = 1$ in einer Bürstenstellung zwischen Leerlauf und Vollast erreicht wird. Motoren größerer Leistung können auf eine von der Belastung unabhängige, praktisch gleichbleibende Blindstromabgabe eingestellt werden, so daß dann auch der Blindstrom anderer gewöhnlicher Motoren kompensiert, also Gruppenkompensierung angewendet werden kann.

Die Betriebseigenschaften dieses Motors gleichen im allgemeinen denen des Asynchronmotors. Durch die Kompensierung gewinnt der

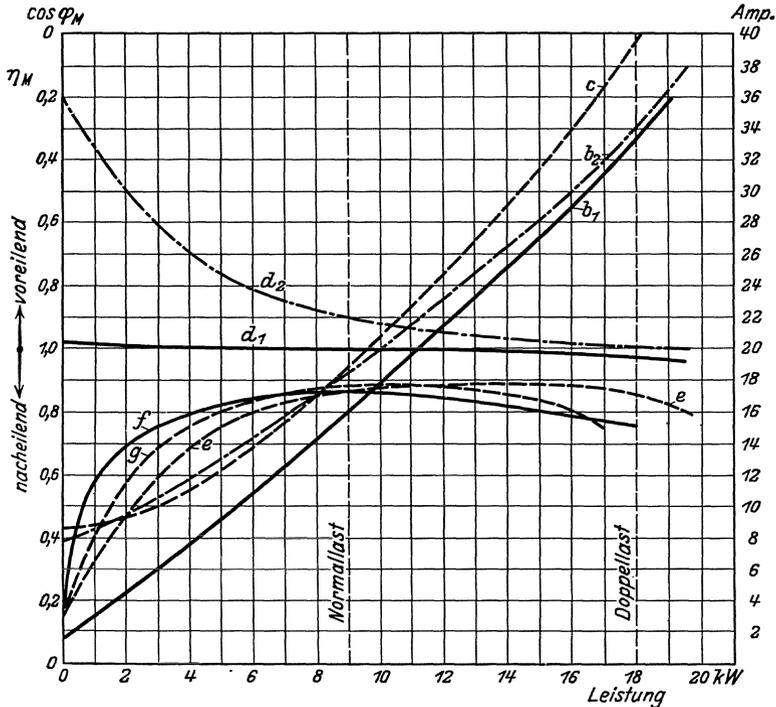


Abb. 98. Vergleich der Betriebskennlinien eines komp. Drehstrom-Asynchronmotors und eines Asynchronmotors. b_1 Aufgenommener Strom. a_1 Leistungsfaktor. f Wirkungsgrad beim komp. Motor und Bürstenstellung für $\cos \varphi = 1$. b_2 Aufgenommener Strom. a_2 Leistungsfaktor. g Wirkungsgrad beim komp. Motor und Bürstenstellung für $\cos \varphi = 0,9$ voreilend bei Vollast. c Aufgenommener Strom. e Wirkungsgrad beim Asynchronmotor.

Motor eine größere Überlastbarkeit. Das Kippmoment ist etwa das 2½- bis 3fache des Vollastmomentes. Gegen Spannungsschwankungen ist der Motor praktisch unempfindlich. Bei Spannungsänderungen um etwa ± 15 vH bleibt die Phasenkompensation praktisch unverändert im Gegensatz zu dem gewöhnlichen Asynchronmotor, dessen Blindstromaufnahme in hohem Maße von der zugeführten Spannung abhängt (Abb. 99). Außerdem ist infolge des hohen Kippmomentes auch bei stark verminderter Spannung noch genügende Überlastbarkeit vorhanden. Aus Abb. 100 geht hervor, daß bei Verminderung der Spannung um etwa 10 vH eine Verringerung des Drehmomentes um weniger

als 5 vH und bei 20 vH um etwa 10 vH eintritt, während bei einem gewöhnlichen Asynchronmotor das Drehmoment ungefähr quadratisch mit der Spannung sinkt [Gl. (53)]. Auch bei Frequenzschwankungen bleibt der Motor stabil und die Phasenkompensation praktisch unverändert.

Das Anlassen erfolgt wie beim gewöhnlichen Asynchronmotor mit dem 1- bis etwa 2½fachen des Vollastmomentes. Die Kompensation setzt erst gegen Ende des Anlaufes ein. Bei einem auf $\cos \varphi_M = 1$ zwischen Leerlauf und Vollast eingestellten Motor ist nach Abschaltung vom Netz bei kurzgeschlossenem Anlasser noch kurze Zeit Spannung an den Primärklemmen vorhanden, sofern der Motor nicht sofort stehenbleibt. Sie verschwindet rasch mit

sinkender Drehzahl oder bei Zurückstellen des Anlassers in die Nullstellung. Um diese Erscheinung, die an sich nicht von Belang ist, zu vermeiden, sind kompensierte Motoren vorteilhafter mit Anlassern für Netzabschaltung zu verwenden, bei denen erst in der Nullstellung ein Abschalten des Netzes erfolgt. Mit dieser Einrichtung wird auch zwangsweise verhindert, daß der Netzschalter bei kurzgeschlossenem Anlasser eingelegt wird.

Bei plötzlichem Wegbleiben der Netzspannung übernimmt der Motor als Generator nur mit Hilfe seiner Schwungmassen arbeitend die ganze Netzbelastung und ver-

liert daher sofort seine Spannung. Fällt dagegen bei Eigenanlagen der Generatorschalter oder bei Fremdstrombezug der Hauptanschlußschalter aus anderen Gründen, so verliert der Motor ebenfalls sofort seine Spannung, sofern die Belastung, die der durch das Auslösen des Hauptschalters abgeschaltete Netzteil darstellt, groß ist zur Motorleistung, so daß die Generatorwirkung des Motors vernichtet wird. Ist dagegen diese Belastung im Verhältnis zu der Motorleistung sehr gering, oder sind mehrere kompensierte Motoren in der Anlage vor-

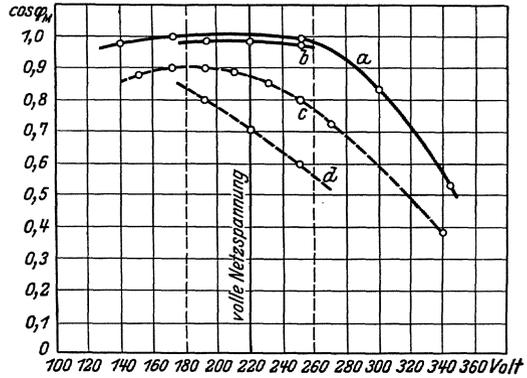


Abb. 99. Leistungsfaktor eines komp. und eines gewöhnlichen Drehstrom-Asynchronmotors in Abhängigkeit von der Spannung.

- | | | |
|---|-------------------|-----------------------|
| a | volles Drehmoment | } komp. Motor. |
| b | halbes Drehmoment | |
| c | volles Drehmoment | } gewöhnlicher Motor. |
| d | halbes Drehmoment | |

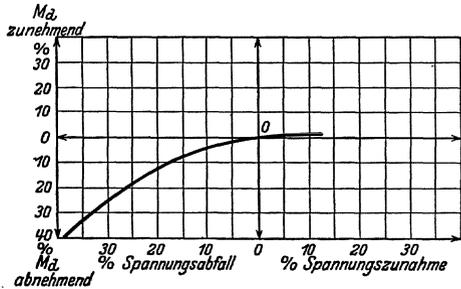


Abb. 100. Drehmomentverlauf bei Spannungsänderungen des komp. Drehstrom-Asynchronmotors mit Selbsterregung.

handen, so erzeugt die Generatorwirkung unter Umständen eine starke Spannungserhöhung, durch die in der Hauptsache angeschlossene Lampen zerstört werden können. Im letzteren Falle wird am einfachsten der Hauptschalter und der Motorschalter derart in Abhängigkeit gebracht, daß der Motorschalter mit zur Auslösung kommt.

Eine solche Spannungssteigerung tritt auch ein bei Motoren, die im Leerlauf Blindstrom an das Netz abgeben, weil beim Abschalten und Nachlaufen des Motors Übererregung an den Motorklemmen vorhanden ist. Hier wird dann der Anlasser mit Netzabschaltung gewählt.

Bei Kurzschlüssen im Netz verliert der Motor im Gegensatz zum Synchronmotor sofort seine Erregung, was zur Vermeidung hoher Kurzschlußströme besonders bei Motoren größerer Leistungen von besonderer Bedeutung ist.

5. Der synchronisierte Drehstrom-Asynchronmotor¹. Wird dem Asynchronmotor im Läufer Gleichstrom zugeführt, so verliert er seine asynchronen Eigenschaften und wird zum Synchronmotor. Er arbeitet dann

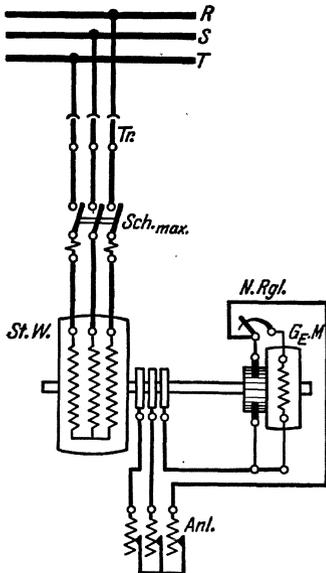


Abb. 101. Schaltbild des synchronisierten Asynchronmotors.

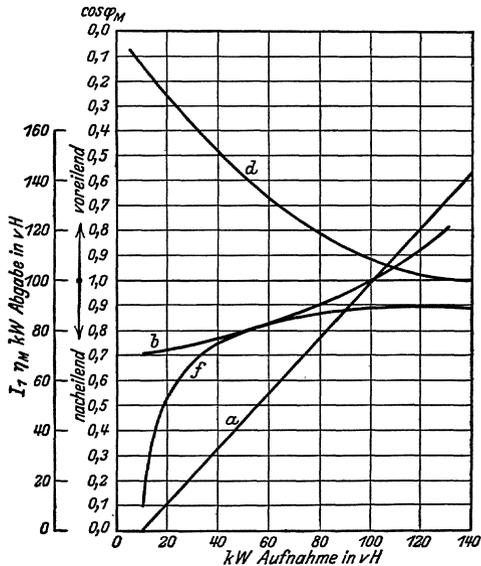


Abb. 102. Betriebskennlinien des synchronisierten Asynchronmotors.
 a Leistung. b Aufgenommener Strom.
 c Leistungsfaktor. d Wirkungsgrad.

im Vollbetriebe auch als Synchronmotor und kann dadurch Blindstrom noch ins Netz liefern. Schaltbild und Betriebskennlinien zeigen die Abb. 101 und 102. Den Nachteil des Synchronmotors (S. 166), leicht aus dem Tritt zu fallen und stehenzubleiben, vermeidet der synchronisierte Asynchronmotor dadurch, daß er bei Spannungs- und Frequenz-

¹ Müller, Dr.: Die Läufererregung von Asynchronmotoren. Bergmann-Mitteilung 1927, Nr. 4. Linoschiff, Dr.: Der synchronisierte Asynchronmotor als Blindstromerzeuger. Siemens-Zeitschrift 1925.

schwankungen zwar auch aus dem Synchronismus fällt, aber dann als Asynchronmotor weiterläuft. Infolge der Gleichstromerregung stellen sich in diesem Betriebszustande aber Stromschwankungen im Läufer ein, die unzulässige Strompendelungen im Ständer zur Folge haben und den Hauptschalter doch zum Auslösen bringen können. Die Vorzüge des Motors gegenüber diesem und den folgenden Nachteilen haben bisher den Motor nicht oft zur Verwendung kommen lassen. Der diesem Motor besonders zukommende Vorteil, mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi_M = 1$ oder besser noch mit Voreilung arbeiten zu können, wird infolge der sonstigen betrieblichen Nachteile nur in seltenen Fällen den Ausschlag für diese Motorbeschaffung geben. Das synchrone Kippmoment liegt hier etwa bei dem 1,1fachen des Nenndrehmomentes.

Das Anlassen erfolgt in gleicher Weise wie beim gewöhnlichen Asynchronmotor. Die in der einen Läuferphase liegende Erregermaschine bleibt zunächst unerregt. Der Motor entwickelt daher ein kräftiges Anlaufmoment. Nach dem Hochlaufen wird der Motor durch Betätigung des Reglers *N.Regl.* im Erregerkreise der Erregermaschine in den Synchronismus gedrückt. Bei kleinen Lasten bietet dieses Einspringen in den Synchronismus keine Schwierigkeiten. Ist die Maschine dabei aber voll- oder überlastet, so kann das Synchronisieren unter Umständen auf Schwierigkeiten stoßen ganz besonders dann, wenn dabei größere Massen beschleunigt werden müssen. Es muß in solchen Fällen während des Synchronisierungsvorganges außer dem Leistungsdrehmoment auch noch ein Beschleunigungsmoment zur Erhöhung der Drehzahl erzeugt werden, und zwar ist das Beschleunigungsmoment naturgemäß abhängig von der Größe der zu beschleunigenden Massen. Das Nutzdrehmoment wird dadurch wesentlich herabgesetzt, so daß der Motor nur bis zu einer gewissen Belastung, die weit unterhalb der Kippgrenze liegen kann, noch in Tritt zu bringen ist. Bei der Beurteilung der Brauchbarkeit dieser Motorgattung ist daher auf die Arbeitsweise der anzutreibenden Maschine hinsichtlich der Schwungmassen besonders zu achten und zu untersuchen, ob der Motor mit dem vorgeschriebenen Drehmoment noch synchronisiert werden kann. Das Anwendungsgebiet ist daher für den synchronisierten Asynchronmotor verhältnismäßig beschränkt. Er wird zu wählen sein, wenn fortdauernd neben der Wirkleistung auch Blindleistung für die Kompensierung anderer Motoren abzugeben ist (also Gruppenkompensierung), keine Überlastungen vorkommen und beim Anlauf keine großen Massen zu beschleunigen sind. Spannungs- und Frequenzänderungen wirken sich auf den Motor im Synchronismus in gleich betriebstechnisch unerwünschter

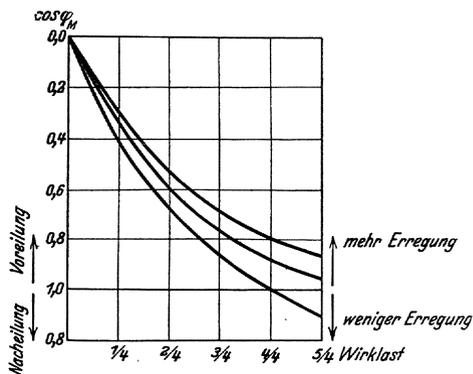


Abb. 103. Kennlinien für den Leistungsfaktorverlauf des synchronisierten Asynchronmotors bei verschiedener Erregung.

anderer Motoren abzugeben ist (also Gruppenkompensierung), keine Überlastungen vorkommen und beim Anlauf keine großen Massen zu beschleunigen sind. Spannungs- und Frequenzänderungen wirken sich auf den Motor im Synchronismus in gleich betriebstechnisch unerwünschter

Weise aus wie beim reinen Synchronmotor. Die Kennlinien für den Leistungsfaktorverlauf bei geänderter Erregung und abnehmender Belastung des Motors zeigt Abb. 103. Der Motor kann also auch bei Teillast oder Leerlauf Blindstrom selbständig abgeben und ähnelt nach dieser Richtung der fremderregten Drehstrom-Erregermaschine. Betriebstechnisch ist die Übererregung insofern besonders günstig, als die Überlastungsfähigkeit des Motors gesteigert wird und zwar bis auf einen annähernd geradlinig verlaufenden Wert von 1,7 bis 0,8 bei $\cos \varphi_M = 0,75$ voreilend.

6. Der Kondensator zur Leistungsfaktorverbesserung. Neben der Benutzung einer der bisher behandelten Formen zur Leistungsfaktorverbesserung findet in neuester Zeit auch der Starkstromkondensator immer mehr Beachtung, nachdem es gelungen ist, dieses Gerät für kleine und mittlere Leistungen verhältnismäßig betriebssicher und preiswert zu bauen. In Parallelschaltung mit dem induktiven Stromverbraucher wird durch die Kapazität des Kondensators, die einen voreilenden

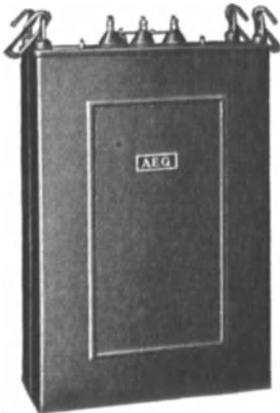


Abb. 104. Kondensatorelement für Blindstromkompensierung.

Blindstrom hervorbringt, der nachteilige Blindstrom aufgehoben.

Ein Kondensatorelement ist ein Wickelkörper, der aus abwechselnden Lagen hochwertiger Isolierpapiere und dünner Metallbänder besteht und mit einem Sonderöl getränkt wird, wodurch eine besonders hohe dielektrische Festigkeit herbeigeführt wird. Bei größeren Einheiten werden diese einzelnen Wickelkörper zu einem Rahmengebilde (Abb. 104) zusammengesetzt und mehrere derartige Rahmengebilde in einem gemeinsamen Kessel untergebracht. Zur Besichtigung oder Auswechslung kann jedes Element nach Herausheben der einzelnen Rahmen für sich ausgewechselt werden.

Diese Starkstromkondensatoren werden in Einheiten von etwa 5 bis 350 BkVA und für Anschlußspannungen von 220 bis 6000 V gebaut. Bei Einheiten mit Ölkessel soll letzterer mit Sicherheitsventil, Ölzu- und Ablaufhähnen für Reinigungszwecke und Thermometer für die Prüfung der Öltemperatur ausgerüstet sein.

Ein großer Vorteil der Kondensatoren gegenüber den anderen Kompensationsformen ist der außerordentlich geringe eigene Energieverbrauch. Die Wirkverluste der Kondensatoren liegen unter 1 vH der von dem Kondensator aufgenommenen Scheinleistung. Sie bewegen sich dementsprechend in einer Größenordnung, die für die Wirtschaftlichkeitsberechnung kaum ins Gewicht fällt. Ferner ist beachtlich die Möglichkeit des nachträglichen Einbaues der Kondensatorenbatterie in bereits vorhandene Anlagen ohne besondere Fundamente, dann die Beibehaltung der einfachen und betriebssicheren gewöhnlichen Asynchronmotoren und die Möglichkeit der Kompensierung des nachteiligen Blindstromes unmittelbar am Orte seines Entstehens. Für größere Einheiten wird allerdings die Aufstellung in besonderen qualmsicheren

Kammern wie bei den Öltransformatoren erforderlich, wodurch der Gesamtanlagepreis nicht unwesentlich erhöht wird, was zu beachten ist.

Infolge des Aufbaues besteht eine einfache Teilbarkeit und infolgedessen eine leichtere Anpassung an bestehende Verhältnisse. Man ist daher nicht gezwungen, von Anfang an die Leistung der Kondensatorbatterie unnötig groß zu wählen. Schließlich ist eine ständige Wartung und Bedienung nicht erforderlich. Die Aufstellung ist in jedem Raum, auch im Freien möglich, wenn die in unmittelbarer Nähe der Kondensatoren auftretende Temperatur nicht über $+35^{\circ}\text{C}$ liegt.

Das über die Einzel- und Gruppenkompensation bisher Gesagte gilt naturgemäß für die Verwendung von Kondensatoren in gleichem Maße. Da aber der Beschaffungspreis einer Kondensatorbatterie einschließlich der Schaltanlage höher ist als der für eine Blindleistungsmaschine gleicher Leistung, ist nur auf Grund wirtschaftlicher Berechnung festzustellen, welche Kompensationsform für jeden einzelnen Fall am zweckmäßigsten ist.

Schalttechnisch ist noch folgendes zu erwähnen:

Für Ölkondensatoren, die an Netze bis 500 V Betriebsspannung angeschlossen werden, genügen einfache Ölschalter mit zweiphasiger Überstromauslösung. Der höchst einstellbare Auslösestrom soll den zweieinhalbfachen Wert des normalen Betriebsstromes haben. Kondensatoren für mehr als 1000 V Betriebsspannung werden zweckmäßig zur Dämpfung des Einschaltstromstoßes mit Vorstufen-Ölschaltern (Schutzschaltern) geschaltet, ähnlich wie dies bei großen Motoren üblich ist. Der Widerstand der Vorstufen wird von Fall zu Fall festgelegt.

Wenn der Kondensator nicht parallel zu den Klemmen eines Transformators oder eines Motors liegt und so zugleich mit dem Transformator bzw. Motor geschaltet wird, ist dafür zu sorgen, daß der Kondensator in abgeschaltetem Zustande seine Ladung abgeben kann. Bei Spannungen bis 500 V geschieht dies am zweckmäßigsten durch geeignete Drahtwiderstände, die entweder von Hand oder besser durch Hilfskontakte, die auf der Schalterwelle sitzen, nur in ausgeschaltetem Zustande des Kondensators mit den Anschlußklemmen verbunden werden. Bei Hochspannungsölkondensatoren kann man entweder unter Öl liegende Widerstände oder aber zwei einphasige Spannungswandler in V-Schaltung zur Überbrückung nach der Abschaltung verwenden. Die Kondensatoren haben den elektrischen Nachteil, daß sie in der Parallelschaltung mit der Induktivität des Motors einen Schwingungskreis bilden, der bei plötzlicher Änderung eines vorhandenen Spannungs- und Belastungszustandes infolge von Schaltvorgängen, Kurzschlüssen, atmosphärischen Einwirkungen in Resonanz kommen und dann Erreger gefährlicher Überspannungen und Wanderwellen werden kann. Diese Gefahr läßt sich zwar durch Drosselspulen beschränken, doch werden dadurch die an sich schon hohen Anschaffungskosten noch gesteigert. Daher findet man den Kondensator für diese Zwecke bei Motoranlagen bisher nur selten.

7. Wirtschaftliche Untersuchung über die Leistungsfaktorverbesserung. Die Entscheidung über das zu benutzende Mittel zur Leistungs-

faktorverbesserung in industriellen Anlagen und ähnlichen Betrieben, so z. B. durch die kompensierten Motoren, durch Kondensatoren oder durch Synchronphasenschieber als besondere Blindleistungsmaschinen kann nur auf Grund besonderer wirtschaftlicher Untersuchungen getroffen werden. Im nachfolgenden wird hierfür ein Beispiel ausführlich behandelt.

Die Aufstellung der Wirtschaftlichkeitsberechnung ist indessen nicht immer einfach, da eine Reihe von Einzelheiten berücksichtigt werden muß, die entsprechend zu erfassen sorgfältiger Überlegung bedürfen. Weiter ist für die Bearbeitung einer solchen Frage allgemein zu beachten, ob nur größere Motoren zu kompensieren sind (Eigenkompensierung) oder der Blindleistungsverbrauch vieler kleinerer Motoren durch die größeren, getrennt aufzustellenden Motoren bzw. durch Kondensatoren oder Phasenschieber teilweise oder vollständig zu decken ist (Gruppenkompensierung).

Für Industrieanlagen mit Stromselbsterzeugung wird bei Erweiterungen oftmals der vorhandene Generator nicht mehr ausreichen, weil seine Belastung in kVA das zulässige Maß überschreitet¹, obgleich etwa die Antriebsmaschine noch Mehrleistung ohne unzulässige Überlastung hergeben könnte. Ist die Maschinenanlage z. B. für 1000 kW bei $\cos \varphi = 0,8$ nacheilend bemessen, der Generator also in der Lage, 1250 kVA abzugeben, und sind bisher durch die Motoren 600 kW bei $\cos \varphi = 0,55$ verbraucht worden, entsprechend einer Scheinleistung von rd. 1090 kVA, so stehen an elektrischer Scheinleistung noch 150 kVA zur Verfügung, während an mechanischer Leistung der Antriebsmaschine 350 kW weiter ausnutzbar wären. Muß die Motorenanlage vergrößert werden, so könnten also ohne Berücksichtigung von Verlusten usw. etwa noch 350 kW eingebaut werden, sofern der Gesamtleistungsfaktor dann auf $\cos \varphi = 0,8$ gebracht wird. Hier also setzt die Untersuchung ein, welche Motorgattung mit Selbstkompensation oder der Möglichkeit, über den Eigenbedarf noch weitere Blindleistung zu erzeugen, zu wählen ist, ob in letzterem Falle die verfügbare Blindleistung ausreicht, oder ob zu den kompensierten Motoren weiter die Aufstellung eines Kondensators oder einer Blindleistungsmaschine erforderlich wird. Die betrieblich erzielbaren Ersparnisse an Betriebsstoff wären dann den jährlichen Kapital- und Unterhaltungskosten für die Mehraufwendungen gegenüberzustellen. Müßte die Stromerzeugungsanlage vergrößert werden, so wäre die Wirtschaftlichkeitsberechnung auch auf diese auszudehnen.

Für Anschlußanlagen an Fremdstromübertragung ist der Gang der Rechnung im allgemeinen der gleiche, nur tritt hier an Stelle der Kosten der Stromerzeugung der Tarif des Überlandwerkes. Die heutigen Stromtarife fast aller Überlandwerke haben sog. $\cos \varphi$ -Bestimmungen, die sich entweder nur auf den Preis der abgenommenen Arbeitsmenge in kWh oder auf diesen und die verlangte oder zur Ver-

¹ Siehe auch IV. Band: Die Belastungsfähigkeit von Synchrongeneratoren bei verschiedenem Leistungsfaktor.

fügung gestellte Leistung in kW beziehen. Die letztere wird häufig auch nur nach kVA abgerechnet, der Leistungsfaktor dadurch von vornherein berücksichtigt.

Eine solche Tarifbestimmung für die Arbeitsmenge lautet z. B.:

Der Leistungsfaktor, mit welchem die elektrische Arbeit entnommen wird, soll 0,8 nachteilig betragen. Bei niedrigerem Leistungsfaktor erhöht sich der Arbeitspreis für die kWh in der Hauptbetriebszeit von 6 Uhr bis 20 Uhr um 5 vH bis $\cos \varphi = 0,7$, um 10 vH bis $\cos \varphi = 0,6$, um 15 vH unter $\cos \varphi = 0,6$. Bei besserem Leistungsfaktor wird eine Vergütung auf den Arbeitspreis bis $\cos \varphi = 0,9$ von 3 vH, darüber von 5 vH gewährt.

Eine andere Tarifbestimmung ist dem nachfolgenden Beispiele zugrunde gelegt.

Für die wirtschaftlichen Untersuchungen dieser Art ist wiederum zu unterscheiden, ob es sich um wenige große Motoren oder um viele kleine Motoren handelt, wie hoch die Jahresdurchschnittsbelastung und der Jahresdurchschnitts-Leistungsfaktor ist, und ob Nebenersparnisse durch verminderte Leistungs- und Transformatorverluste gewonnen werden können. Die kompensierten Asynchronmotoren können mit Ausnahme der Arbeitsweise nach Abb. 98 und 102 nur ihren eigenen Blindverbrauch kompensieren, können also nicht noch von anderen Motoren benötigte Blindleistung liefern. Anders liegen die Verhältnisse beim Synchron- und synchronisierten Asynchronmotor.

Zahlentafel 4.

	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$
Zur Erleichterung rechnerischer Untersuchungen sind in Zahlentafel 4 die den einzelnen $\cos \varphi$ -Werten entsprechenden Werte für $\sin \varphi$ und $\operatorname{tg} \varphi$ zusammengestellt.	0,99	0,141	0,143
	0,95	0,312	0,329
	0,90	0,436	0,485
	0,85	0,527	0,620
	0,80	0,600	0,750
	0,75	0,661	0,882
Ferner gilt:	0,70	0,715	1,020
	0,65	0,760	1,168
	0,60	0,800	1,330
	0,55	0,835	1,525
	0,50	0,866	1,732
	0,45	0,894	1,989
	0,40	0,915	2,280

Beispiel: Ein industrielles Werk arbeitet mit Einzelantrieb der Arbeitsmaschinen und besitzt eine große Zahl kleiner Motoren. Die Jahreshöchstleistung beträgt 100 kW bei einem Durchschnittsleistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,55$.

Der Betrieb soll durch Aufstellen von 2 neuen Motoren mit je 30 kW erweitert und insgesamt an ein Überlandwerk angeschlossen werden. Die Jahreshöchstleistung für die neuen Motoren wird voraussichtlich bei etwa 40 kW liegen, der durchschnittliche Jahresleistungsfaktor dieser Teilanlage etwa $\cos \varphi = 0,65$ betragen, sofern gewöhnliche Drehstrom-Asynchronmotoren zur Aufstellung kommen. Es soll festgestellt werden:

1. mit welchem Jahresdurchschnitts-Leistungsfaktor wird die Gesamtanlage arbeiten, sofern für die beiden neuen Motoren gewöhnliche Drehstrom-Asynchronmotoren mit Schleifringläufer gewählt werden;

2. wie ändert sich der Jahresgesamtleistungsfaktor, wenn für die beiden neuen Motoren kompensierte Drehstrommotoren nach der Bauform 4. (S. 110) zur Aufstellung kommen, die bei allen Belastungen bei $\cos \varphi = 0,9$ voreilend je 18 BkVA abgeben können;

3. wie groß muß ein Synchronphasenschieber bzw. eine Kondensatorbatterie bemessen werden, wenn unter Zugrundelegung der Gesamtjahreshöchstleistung und des nach 1. ermittelten Jahresdurchschnitts-Leistungsfaktors die Anlage mit einem $\cos \varphi = 0,9$ nacheilend arbeiten soll;

4. welche Ausführung ist die wirtschaftlichste unter Berücksichtigung des Tarifes des Überlandwerkes, das fordert: als Leistungspreis: RM. 110,— für das kVA und Jahr der halbstündigen Höchstleistung, als Arbeitspreis: RM. 0,035 (mit Kohlenklausel) für die kWh bei $\cos \varphi = 0,8$ mit einem Aufschlag für schlechteren Leistungsfaktor:

bis 0,7 0,6 vH,
darunter 1,0 vH,

mit einer Vergütung für besseren Leistungsfaktor:

bis 0,9 0,3 vH,
bis 1,0 0,5 vH.

für jedes volle Hundertstel der Abweichung.

Die Fragen 1 bis 3 lassen sich einfach und übersichtlich an Hand des sog. Leistungsdiagramms untersuchen, das in Abb. 105 dargestellt ist. Aus dem Diagramm ergibt sich:

Zu 1.

$\overline{N_{W_1}} = \overline{Oa} = 100$ kW Wirkleistung alte Anlage,

$\sphericalangle \varphi_1 =$ Phasenverschiebungswinkel alte Anlage ($\cos \varphi_1 = 0,55$),

$N_{S_1} = \overline{Oc} = 182$ kVA Scheinleistung „ „ $\left(\frac{100}{0,55}\right)$,

$N_{B_1} = \overline{ac} = 152$ BkVA Blindleistung „ „ ($N_{S_1} \cdot \sin \varphi_1 = 182 \cdot 0,835$),

$\overline{N_{W_2}} = \overline{cd} = 40$ kW Wirkleistung Erweiterung neue Anlage,

$\sphericalangle \varphi_2 =$ Phasenverschiebungswinkel „ „ „
bei Aufstellung gewöhnlicher Asynchronmotoren ($\cos \varphi_2 = 0,65$),

$N_{S_2} = \overline{ce} = 61,5$ kVA Scheinleistung neue Anlage $\left(\frac{40}{0,65}\right)$,

$N_{B_2} = \overline{de} = 46,7$ BkVA Blindleistung neue Anlage ($N_{S_2} \cdot \sin \varphi_2 = 61,5 \cdot 0,76$),

$\overline{N_{W_3}} = \overline{Ob} = 140$ kW Gesamtwirkleistung ($N_{W_1} + N_{W_2}$),

$\sphericalangle \varphi_3 =$ Gesamtphasenverschiebungswinkel

$$\left(\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{N_{B_1} + N_{B_2}}{N_{W_3}} = \frac{152 + 46,7}{140} = 1,42\right) \cos \varphi_3 = 0,58,$$

$N_{S_3} = \overline{Oe} = 242$ kVA Gesamtscheinleistung $\left(\frac{N_{W_3}}{\cos \varphi_3} = \frac{140}{0,58}\right)$,

$N_{B_3} = \overline{be} = 198,7$ BkVA Gesamtblindleistung ($N_{B_1} + N_{B_2}$).

Zu 2.

Da die beiden neuen Motoren als kompensierte Motoren angenähert über den ganzen Belastungsbereich bei $\cos \varphi = 0,9$ voreilend je 18 BkVA Blindleistung voreilend erzeugen können, wird vom Punkte d nach links eine Strecke $\overline{df} = 36$ BkVA abgetragen. Dadurch wird der Gesamtphasenverschiebungswinkel φ_3 in den Winkel φ_4 geändert. Die Gesamtscheinleistung ist nunmehr gleich der Strecke Of und die

Gesamtblindleistung gleich der Strecke \overline{bf} . Aus Abb. 105 ergibt sich:

$$N_{W_3} = \overline{Ob} = 140 \text{ kW Gesamtwirkleistung,}$$

$$\sphericalangle \varphi_4 = \text{Gesamtphasenverschiebungswinkel} \left(\text{tg } \varphi_4 = \frac{152 - 36}{140} = 0,83 \right),$$

$$\cos \varphi_4 = 0,77,$$

$$N_{S_4} = \overline{Of} = 182 \text{ kVA Gesamtscheinleistung} \left(\frac{140}{0,77} = 182 \right),$$

$$N_{B_4} = \overline{bf} = 116 \text{ BkVA Gesamtblindleistung} (N_{B_1} - 36).$$

Zu 3.

Soll durch einen Synchron-Phasenschieber die Anlage mit Erweiterung durch gewöhnliche Motoren auf einen Gesamtleistungsfaktor $\cos \varphi_5 = 0,9$ nachteilend gebracht werden, so ist zunächst der

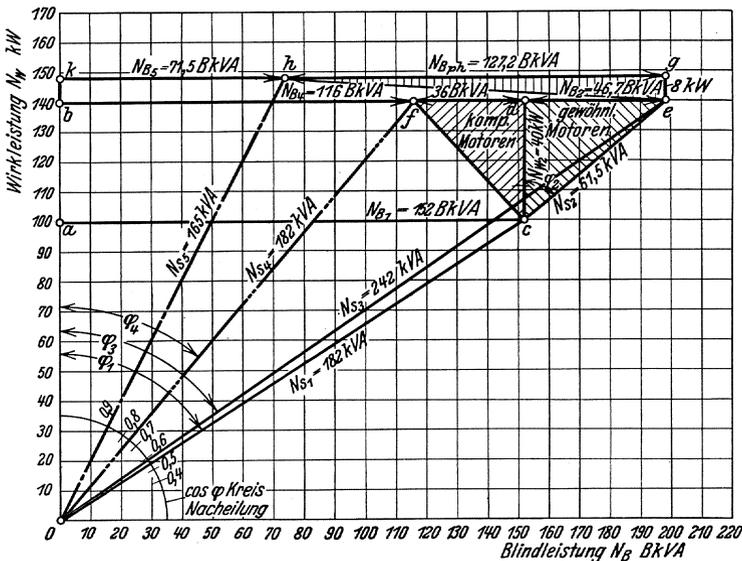


Abb. 105. Zeichnerische Ermittlung der Werk- und Blindleistungen und der Blindleistungskompensation.

Eigenverbrauch des Phasenschiebers an Wirkleistung an Punkt e anzutragen. Wird dieser Eigenverbrauch zu 8 kW angenommen, so stellt die Strecke $\overline{eg} = N_{W_{ph}} = 8 \text{ kW}$ diese Mehrleistung dar. Zieht man vom Punkte O einen Strahl zum Kreispunkte 0,9 nachteilig bis zum Schnittpunkte h mit der Strecke \overline{kg} , so gibt die Strecke \overline{gh} das Maß für die aufzuwendende Blindleistung voreilend an, die zur Verbesserung des Gesamtleistungsfaktors auf $\cos \varphi_5 = 0,9$ nachteilig aufzuwenden ist. Diese Leistung ist rechnerisch folgendermaßen zu finden:

$$N_{S_5} = \frac{N_{W_1} + N_{W_2} + N_{W_{ph}}}{\cos \varphi_5} = \frac{100 + 40 + 8}{0,9} \approx 165 \text{ kVA,}$$

$$N_{B_5} = N_{S_5} \cdot \sin \varphi_5 = 165 \cdot 0,436 = 71,5 \text{ BkVA,}$$

Blindleistung für den Phasenschieber:

$$N_{Bph} = N_{B_1} + N_{B_2} - N_{B_5} = 152 + 46,7 - 71,5 = 127,2 \text{ kVA},$$

und die Scheinleistung für diesen:

$$N_{Sph} = \sqrt{N_{Wph}^2 + N_{Bph}^2} = \sqrt{8^2 + 127,2^2} = 128 \text{ kVA}.$$

Der geschätzte Wirk-Eigenverbrauch des Phasenschiebers beträgt somit rd. 6,25 vH der Scheinleistung, was dem heute erzielbaren Werte für eine eigens zu diesem Zwecke gebaute Maschine entspricht.

Soll an Stelle des Synchron-Phasenschiebers eine Kondensator-batterie aufgestellt werden, so ändert sich das Bild insofern, als der Wirk-Eigenverbrauch einer solchen Batterie etwa nur 0,8 bis 1,0 vH der Scheinleistung beträgt, also praktisch vernachlässigbar ist. Aus der Abb. 105 folgt die Scheinleistung, wenn von dieser Vernachlässigung Gebrauch gemacht wird, dann zu:

$$\overline{Om} = N_{S_6} = \frac{N_{W_3}}{\cos \varphi_5} = \frac{140}{0,9} = 156 \text{ kVA für die Anlage.}$$

Zu 4.

Die wirtschaftlichen Untersuchungen sind in Zahlentafel 5 zusammengestellt. Dabei sind für die einzelnen Ausführungsformen die Hauptgestehungskosten vollständig berücksichtigt, also Anlasser, Schalter usw. bei den Motoren, Fundament beim Synchron-Phasenschieber, Schaltgeräte für Phasenschieber und Kondensator.

Wohl zu beachten ist noch, daß auch die Transformatoren für den Anschluß an das Überlandwerk in ihren Leistungen wesentlich unterschiedlich ausfallen, wodurch weitere Kostenunterschiede entstehen. Auf den Gewinn durch Verlustersparnisse infolge besseren Wirkungsgrades der Transformatoren und Leitungen sei nur kurz hingewiesen. Auch dieser ist bei großen Anlagen unter Umständen noch mitbestimmend für die Wahl.

Zahlentafel 5.

Nr.	Bezeichnung	2 gewöhnliche Asynchr.-Motoren	2 kompen-sierte Drehstrom-motoren	2 gewöhnl. Asynchr.-Motoren + Phasen-schieber	2 gewöhnl. Asynchron-motoren + Kondens.-Batterie
1	Anlagekosten zus. RM	5000	7000	12000	13000
2	Jahresleistung f. d. Verrechnung kVA	242	182	165	156
3	Mittl. Jahresleistungsfaktor $\cos \varphi_{\text{mittl}}$	0,58	0,77	0,90	0,90
4	Jahres-Wirkleistung kW	140	140	148	140
					Wirkverb. d. Kondens. unberücks.
5	Jahres-Leistungskosten RM	26620	20020	18150	17160
6	Jahresarbeitsmenge bei 2500 Jahresbenutzungsstunden der Höchstleistung (4) kWh	350000	350000	370000	350000
7	Jahres-Arbeitskosten RM	12250	12250	12950	12250
8	Leistungsfaktorzuschlag $\left\{ \begin{array}{l} \text{vH} \\ \text{RM} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 18,0 \\ 2205 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1,8 \\ 220 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} - \\ - \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} - \\ - \end{array} \right.$
9	Leistungsfaktorvergütung $\left\{ \begin{array}{l} \text{vH} \\ \text{RM} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} - \\ - \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} - \\ - \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 3,0 \\ 388 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 3,0 \\ 367 \end{array} \right.$

Zahlentafel 5 (Fortsetzung).

Nr.	Bezeichnung	2 gewöhnliche Asynchr.-Motoren	2 kompensierte Drehstrommotoren	2 gewöhnliche Asynchr.-Motoren + Phasenschieber	2 gewöhnliche Asynchr.-Motoren + Kondens.-Batterie
10	Gesamt-Stromkosten RM	41 075	32 490	30 712	29 043
11	Kostenunterschied $\left\{ \begin{array}{l} \text{vH} \\ \text{RM} \end{array} \right.$	1	- 20,9	25,2	29,3
12	Stromkosten für die kWh Pf.	11,7	9,25	8,29	8,33
13	Zuschlag 14 vH der Mehrbeschaffungskosten RM	—	280	980	1120
	und 2 vH Mehrunterhaltung . RM	—	40	140	160
14	Gesamt-Jahresausgabe 10 + 13 RM	41 075	32 810	31 832	30 323
15	Kostenunterschied $\left\{ \begin{array}{l} \text{vH} \\ \text{RM} \end{array} \right.$	1	20,1	22,6	26,1
16	Stromkosten für die kWh Pf.	11,7	9,35	8,63	8,64
17	Transformatorgröße kVA	250	190	170	160

Das Ergebnis ist nach Spalte 16 und 17 zu beurteilen und zeigt, daß Phasenschieber und Kondensator sich fast das Gleichgewicht in den Stromkosten halten. Es würde daher die Entscheidung schließlich mehr nach der betriebstechnischen Seite zu fällen sein und dabei auch auf die Betriebssicherheit abgestellt werden müssen. Im untersuchten Falle wird dem Kondensator der Vorzug zu geben sein.

12. Der asynchrone Einphasen-Induktionsmotor.

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

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

Eine Überlastung des Motors kann bis etwa zum 1,5fachen des Betriebsdrehmomentes stattfinden, ohne daß derselbe abfällt unter der Voraussetzung gleichbleibender Netzspannung.

Der Stromverbrauch des Motors ist:

$$I = \frac{N_n \cdot 1000}{U \cdot \cos \varphi_M \cdot \eta_M} \text{ Amp.} \tag{83}$$

13. Das Anlassen und die Regelung des asynchronen Einphasenmotors.

Hinsichtlich des Anlassens unterscheidet sich der Einphasenmotor 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 notwendig.

Um zunächst das Ständerdrehfeld hervorzurufen, ist es erforderlich, durch besondere Mittel eine zweite Phase herzustellen. Das geschieht durch eine Hilfswicklung auf dem Ständer. Der Strom in dieser Hilfswicklung wird durch Einschalten eines induktiven Widerstandes — einer Drosselspule oder einer Kapazität — um annähernd 90° gegenüber demjenigen in der Hauptwicklung in der Phase verschoben. In den meisten Fällen verwendet man die Drosselspule. Nach Beendigung des Anlassens wird die Hilfswicklung abgeschaltet, weil sie dann überflüssig ist und bei dauernder Einschaltung nur unnötigen Strom aufnehmen, also elektrische Leistung verzehren und nutzlos in Wärme umsetzen würde.

Das durch die Hilfswicklung erzeugte Drehfeld ist jedoch schwach und unvollkommen. Ein Einphasen-Induktionsmotor kann infolgedessen nicht unter Last anlaufen, sondern nur leer oder im Höchsthalle mit etwa $\frac{1}{3}$ Last. Das hängt von der Größe des Motors und der Ausführung des Läufers ab, denn auch bei diesem Motor kann der Läufer mit einer Kurzschluß- oder mit einer Schleifringwicklung versehen werden.

Bei Motoren kleiner Leistung mit Kurzschlußläufer erfolgt das Anlassen in der Regel durch einfaches Schließen des Hauptschalters, der in diesem Falle aber besonders ausgebildet ist (Anlaßschalter) und zwar mit eingebauter Drosselspule für die Hilfsphase. Dieser Anlaßschalter schaltet den Motor gewöhnlich in der Ruhestellung zweipolig vom Netze ab; 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 Fliehkraft-

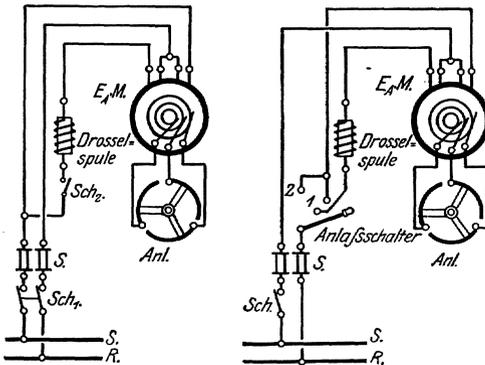


Abb. 106.

Anlassen des Einphasen-Induktionsmotors durch Hilfsschalter und Drosselspule.

Abb. 107.

kupplung ausgerüstet. Die Anlaufstromstärke erreicht hierbei etwa den 2- bis 2,5fachen Betrag der Vollaststromstärke; aus diesem Grunde werden Einphasen-Induktionsmotoren größerer Leistung (s. S. 73) nicht mehr auf diese einfache Art in Betrieb gesetzt werden dürfen.

Um den großen Stromstoß beim Anlauf zu vermeiden, verwendet man daher auch beim Einphasenmotor den Schleifringläufer mit Anlaßwider-

stand. Zwei gebräuchliche Schaltungen sind in Abb. 106 und 107 gezeichnet. Während in Abb. 106 die Hilfsphase mit Drosselspule nach

Beendigung des Anlassens durch Öffnen des Schalters Sch_2 , abgeschaltet wird, geschieht dieses in Abb. 107 durch einen Anlaßschalter besonderer Ausführung, der beim Anlassen auf Kontakt 1 und, bevor die volle Betriebsdrehzahl erreicht ist, auf Kontakt 2 umgeschaltet wird. Im Falle der Schaltung nach Abb. 106 ist noch ein besonderer zweipoliger Schalter Sch_1 , notwendig, während man bei der Schaltung nach Abb. 107 mit nur einem einpoligen Schalter auskommt, um den Motor allpolig vom Netze zu trennen.

Das Anlaufmoment $M_{a,A}$ beträgt beim Schleifringläufermotor etwa die Hälfte des Nenndrehmomentes; der Anlaufstrom steigt bis zum doppelten Werte des Vollaststromes. Beträgt $M_{a,A} = \frac{1}{3} M_a$, dann kann die Anlaufstromstärke I_A etwa auf der Höhe der Vollaststromstärke gehalten werden.

Bei Betriebsspannungen über 500 V und größeren Leistungen ist es notwendig, 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 III. Abschn.) überführt, nur noch selten Verwendung findet.

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

14. 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 Sonderantrieben 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 besonderes Bedürfnis ist, etwa die Anlagekosten durch die fortfallende dritte Stromzuführungsleitung zu verringern, was beim Bahnbetriebe in der Hauptsache zur Durchbildung des Einphasen-Kollektormotors Veranlassung war. Dazu kommt, daß der Einphasengenerator einen schlechteren Wirkungsgrad als der Dreiphasengenerator hat, 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 baulich vom Gleichstrommotor im wesentlichen nur dadurch, daß die Magnete lamelliert werden, d. h. daß letztere aus dünnen, einseitig mit Papier beklebten Blechen zusammengesetzt sind, um die Hysteresis- und Wirbelstromverluste, die bei Wechselstrom naturgemäß beträchtlich höher sind als bei Gleichstrom, herabzumindern. In dem elektrischen Aufbau und in den Betriebsverhältnissen sind dagegen wesentliche 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 Gattungen:

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

Besonders ist hervorzuheben, daß alle diese Motorgattungen im Gewichte schwerer ausfallen als Drehstrom-Asynchron- oder Gleichstrommotoren gleicher Leistung.

Da aber auch der Einphasen-Kollektormotor immer mehr für den Arbeitsmaschinenantrieb an Bedeutung gewinnt, sollen die Betriebs-eigenschaften — das Anlassen, Regeln und die Schaltungen — ebenfalls besprochen werden.

15. Der Wechselstrom-Reihenschlußmotor.

Derselbe ist sowohl in seiner Schaltung zwischen Magnetwicklung und Anker, sowie in seinen Betriebsverhältnissen hinsichtlich Drehzahl und Drehmoment dem Gleichstrom-Hauptschlußmotor sehr ähnlich. Auch hier liegt die Ständerwicklung *St.W.* (Abb. 108) in Reihe mit dem Anker *A.*; die Erregung ist also abhängig vom Strome $I \equiv I_a$, d. h. von der Belastung. Allerdings kann man einen Gleichstrom-Hauptschlußmotor, auch wenn derselbe lamellierte Magnete 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 Leistungsverluste im Anker, starkem Bürstenfeuer und einem schlechten Leistungsfaktor ($\cos \varphi_M$) liegen. Diese Nachteile hat man in befriedigender Weise dadurch überwunden, daß man z. B. die Magnete noch mit einer besonderen Kompensationswicklung *Kps.W.* versieht, die entweder in Reihe mit dem Anker (Abb. 108) liegt oder in sich kurzgeschlossen ist (Abb. 109). Im letzteren Falle tritt eine transformatorische Wirkung zwischen Anker und Kompensationswicklung ein. Auch Wendepole werden benutzt, um funkenfreien Lauf innerhalb eines großen Drehzahlbereiches zu erreichen.

Die Nennspannung für den Reihenschlußmotor ist infolge der Verbindung zwischen Ständerwicklung und Anker und mit Rücksicht auf günstigste Abmessungen nicht frei wählbar, sondern baulich

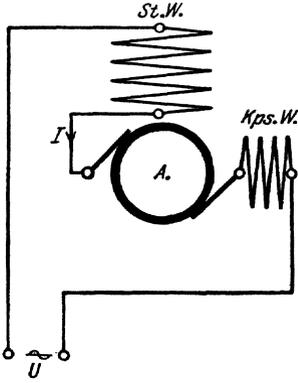


Abb. 108.

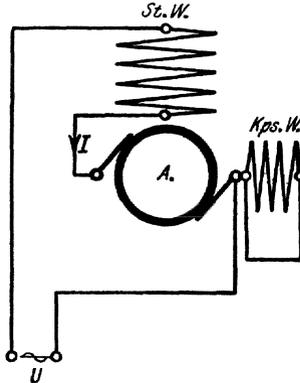


Abb. 109.

Stromlauf des Wechselstrom-Reihenschlußmotors mit Kompensationswicklung.

ziemlich eindeutig bestimmt. Sie beträgt im allgemeinen unter 110 V, so daß fast stets die Zwischenschaltung eines Transformators erforderlich wird.

In der vektoriellen Darstellung der einzelnen Größen wie Strom, Spannung, Kraftfluß usw., fällt für diesen Motor I und Φ zusammen (Abb. 110), weil Anker- und Erregerstrom in Phase miteinander sind, und das Drehmoment $M_a = \text{const } I \cdot \Phi$ hat seinen größten Wert.

Das von der Erregerwicklung erzeugte Feld ist ein Wechselfeld und erzeugt einmal in der sich drehenden Ankerwicklung eine EMK E_a ähnlich der EMK E_a eines Gleichstrommotors und ferner durch das Pulsieren des Wechselstromes im Anker noch eine EMK der Selbstinduktion E_s . Die EMK E_a ist ihrer Größe nach naturgemäß ebenfalls abhängig von der Drehzahl, und zwar ist:

$$\left. \begin{aligned} E_a &= 4,44 \cdot k \frac{p \cdot n}{60} \cdot A \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt,} \\ &= \text{const } n \cdot \Phi. \end{aligned} \right\} \quad (84)$$

Daraus folgt weiter die Drehzahl:

$$n = \text{const } \frac{E_a}{\Phi}, \quad (85)$$

also ändert sich die Drehzahl — da sowohl E_a als auch Φ abhängig von der Belastung sind — wie beim Hauptschlußmotor mit der Belastung. Andererseits folgt aus Gl. (85), wenn für $E_a = U - I(R)$ gesetzt wird, daß auch bei Spannungsänderungen sich Reihenschluß- und Hauptschlußmotoren in gleicher Weise verhalten, wenn das Drehmoment unverändert bleibt. Die Drehzahl ist in

diesem Falle verhältnismäßig der Spannungsänderung indessen mit einem stärkeren Abfall verbunden, bedingt durch den induktiven Widerstand.

Die EMK E_a ist in Phase mit I , während die EMK der Selbstinduktion E_s gegenüber E_a um 90° in der Phase verzögert ist. Die in der Ankerwicklung und den jeweils durch die Bürsten kurzgeschlossenen

Ankerspulen durch das Wechselselfeld induzierten elektromotorischen Kräfte heben sich in ihrer Wirkung gegenseitig auf, können also keinen Strom hervorrufen.

Stehen die Bürsten in der neutralen Zone, was dann der Fall ist, wenn der Motor in beiden Drehrichtungen laufen muß, so steht das von der Ankerwicklung erzeugte Feld, das selbstverständlich ebenfalls ein Wechselselfeld ist, senkrecht zum Erregerfelde. Der Einfluß des Ankerfeldes auf das Erregerfeld besteht in einer Schwächung und Verzerrung des letzteren. Um diese Wirkung nach Möglichkeit aufzuheben, erhält der Ständer die bereits erwähnte Kompensationswicklung.

Den EMK E_a und E_s müssen zwei gleich große EMK in der Ständerwicklung das Gleichgewicht halten (E_2 und E'_2), die demnach in der Phase um 180° gegen E_a und E_s verschoben sind. Die Klemmenspannung U ist die geometrische Summe von E_a und E_s und bildet mit dem Strome I den Phasenverschiebungswinkel φ_M .

Es soll nun unter Zugrundelegung der Abb. 110 mit Benutzung des von Heubach¹

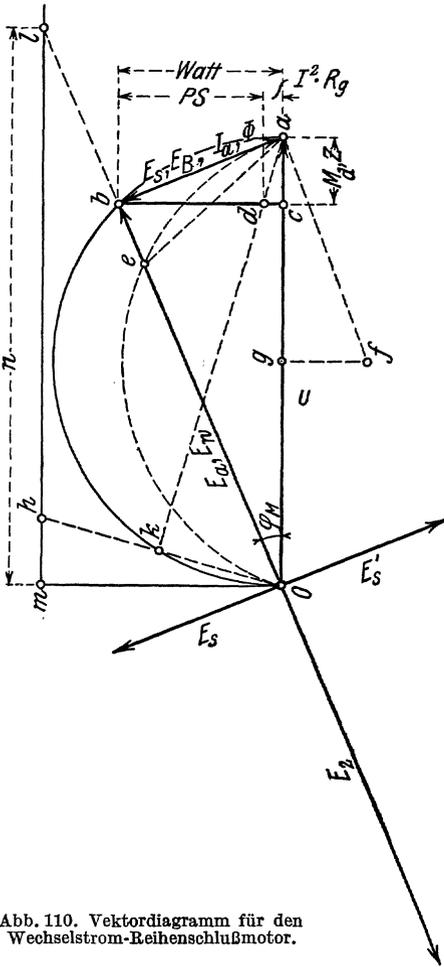


Abb. 110. Vektordiagramm für den Wechselstrom-Reihenschlußmotor.

angegebenen Verfahrens die gegenseitige Abhängigkeit von Leistung, Drehmoment und Drehzahl etwas eingehender behandelt werden.

Man zerlegt die Klemmenspannung U in ihre zwei Komponenten E_W (Wirkkomponente) und E_B (Blindkomponente), indem man über U als Durchmesser einen Kreis schlägt und E_W und den Phasenwinkel φ_M einträgt.

¹ Vgl. Heubach, J.: Der Wechselstrom-Serienmotor.

Es ist:

$$E_W = E_a = U \cdot \cos \varphi_M = \overline{Ob}, \quad (86)$$

$$E_B \equiv I \equiv \Phi = U \cdot \sin \varphi_M = \overline{ab} \quad (87)$$

(≡ verhältnisgleich).

Die EMK der Selbstinduktion ändert sich mit dem Strome I , also auch mit dem Kraftflusse Φ .

Die dem Motor zuzuführende elektrische Leistung ist:

$$N_1 = U \cdot I \cdot \cos \varphi_M = E_W \cdot I = \overline{Ob} \cdot \overline{ab}, \quad (88)$$

also gleich dem doppelten Flächeninhalte des rechtwinkligen Dreiecks Oab unter der Voraussetzung, daß die zugeführte Spannung unverändert bleibt, und es ist somit die Höhe \overline{bc} dieses Dreiecks in einem bestimmten Maßstabe gemessen gleich der Leistung N_1 .

Die vom Motor abgegebene Leistung ist:

$$\left. \begin{aligned} N_n &= U \cdot I \cdot \cos \varphi_M - I^2 (R_a + R_h), \\ &= \text{const} [E_W \cdot I - I^2 \cdot (R_a + R_h)]. \end{aligned} \right\} \quad (89)$$

Im Diagramm Abb. 110 wird N_n folgendermaßen gefunden: Da die Dreiecke Oab und bac ähnlich sind, ist:

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

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

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

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

$$\widehat{\text{tg } cad} = \frac{\overline{cd}}{\overline{ac}} \equiv \frac{I^2 (R_a + R_h)}{I^2} = R,$$

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

$$\overline{bd} \equiv N_n = \text{const} [E_W \cdot I - I^2 \cdot R].$$

Mit Benutzung der Gl. (84) ist das Drehmoment:

$$M_a = \frac{4,44 k \cdot g_m \cdot \frac{p \cdot n}{60} A}{2 \pi \cdot 9,81 \frac{n}{60} 10^8} \cdot \Phi \cdot I = \text{const } \Phi \cdot I, \quad (90)$$

also wie beim Gleichstrom-Hauptschlußmotor unmittelbar veränderlich mit Φ und I . Das Anlaufmoment ist infolgedessen gleichfalls groß. Im Diagramm ist das Drehmoment:

$$M_a \equiv \overline{ab^2} \equiv \overline{ac},$$

bzw. die Zugkraft:

$$Z \equiv \text{const } \overline{ac}.$$

Schließlich findet man die Drehzahl n aus den Gl. (85) und (87) zu:

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

Zieht man daher in einem beliebigen Abstände eine Parallele zu \overline{Oa} , dann ist:

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

oder da:

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

die Drehzahl:

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

Der Gesamtwiderstand R kann gleichfalls aus dem Diagramm gefunden werden. Zu diesem Zwecke wählt man auf der Strecke

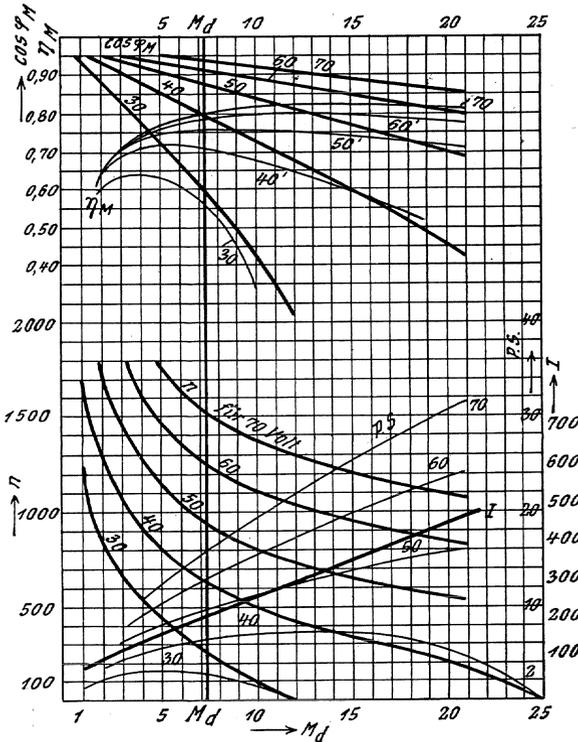


Abb. 111. Kennlinien für den Wechselstrom-Reihenschlußmotor. 20 PS; $n = 1000$; $r = 50$.

$\overline{Ob} = E_a = E_W$ einen Punkt e so, daß \overline{be} dem Spannungsabfall im Motor gleich ist. Dadurch wird E_W in zwei Teile zerlegt, und zwar in einen \overline{Oe} gleich der EMK des Ankers $\overline{E_a}$ 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:

$$\widehat{\text{tg } g a f} = \frac{\overline{g f}}{\overline{g a}} \equiv R.$$

Der Leistungsfaktor $\cos \varphi_M$ ist wie aus Abb. 110 ersichtlich abhängig von der Drehzahl n . Er wird mit abnehmender Drehzahl schlechter

und hat seinen günstigsten Wert bei der höchsten Drehzahl. Im allgemeinen ist der $\cos \varphi_M$ beim Reihenschlußmotor sehr gut; er nähert sich fast dem Werte 1.

Der Wirkungsgrad weist gegenüber gleichgroßen Gleichstrom- und Asynchronmotoren schlechtere Werte auf, weil die Bürsten- und

Eisenverluste wesentlich größer sind. Er ändert sich ferner stark mit abweichenden Drehzahlen und wird bei niedrigster Drehzahl und Überlastung sehr schlecht.

Die Frequenz, für die Reihenschlußmotoren gebaut werden können, unterliegt keinen bestimmten Bedingungen. Ändert sich die Frequenz im Betriebe, so entspricht einer Erhöhung von ν eine Drehzahlabnahme und Verschlechterung des Leistungsfaktors, wenn zugeführte Spannung und Drehmoment unverändert bleiben, und umgekehrt.

In Abb. 111 sind nun wiederum die Kennlinien zusammengestellt und zwar für Leistung, Drehzahl, Strom, Wirkungsgrad und Leistungsfaktor bei verschiedenen Spannungen. Die mit derselben Zahl (z. B. Spannung 70 V auf der n -Kennlinie) versehenen Kennlinien gehören jeweils zu einem Betriebszustande. Man kann ohne besondere Erklärung die gegenseitige Abhängigkeit, sowie den ähnlichen Verlauf dieser Schaulinien mit denjenigen des Gleichstrom-Hauptschlußmotors (Abb. 7) leicht erkennen. Die Drehzahl steigt auch hier mit abnehmendem Drehmoment. Bei Entlastung z. B. beim Abfallen des Riemens geht der Motor ebenfalls durch. Er muß daher gleichfalls mit einem Fliehkraftschalter oder dgl. versehen werden, der den Hauptausschalter gegebenenfalls zur Auslösung bringt.

Das Anwendungsgebiet ist das gleiche wie beim Hauptschlußmotor, nur liegt eine Beschränkung für die allgemeine Benutzung — abgesehen von der Stromart an sich — darin, daß infolge der kleinen Klemmenspannung auf der Unterspannungsseite des Transformators Schaltgeräte, Kabel usw. für den großen Strom bemessen sein müssen, infolgedessen die Anlagekosten wesentlich erhöhen. Bei 50 Hertz beträgt die heute ausführbare Leistung mehr als 200 kW.

16. 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 bei Wechselstrom die Möglichkeit besteht, ihn in beliebiger Weise und mit geringen Verlusten transformieren zu können, so wird heute stets das letztere für das Anlassen vorgezogen. Dazu kommt der bereits erwähnte 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 Sammelschienen 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 Abb. 112 ist die Schaltung eines auf diese Weise anzulassenden Reihenschlußmotors dargestellt.

Mit Hilfe des Anlaßtransformators kann aber der Motor nicht nur in Betrieb gesetzt, sondern durch Änderung von U [Gl. (84) und (85)] auch auf jede beliebige Drehzahl unterhalb der Betriebsdrehzahl

eingestellt werden, sofern die Abstufung des Transformators entsprechend bemessen ist. An Stelle des in Abb. 112 gezeichneten Transformators kann auch ein Spartransformator oder ein Drosselwiderstand benutzt werden, wenn die Spannung an der Hauptstromzuführung im entsprechenden Verhältnisse zur Motorspannung steht.

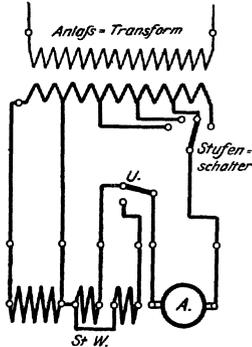


Abb. 112. Schaltung für Anlassen, Drehzahlregelung und Drehrichtungsänderung beim Wechselstrom-Reihenschlußmotor.

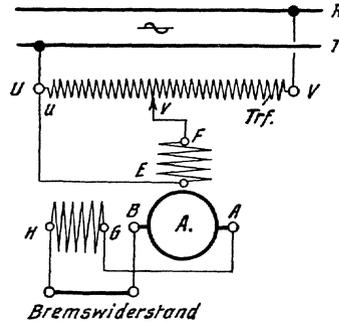


Abb. 113. Wechselstrom-Reihenschlußmotor mit Bremschaltung.

Zur Änderung der Drehrichtung erhält der Motor entweder eine zweite Wicklung, die durch einen einpoligen Umschalter U eingeschaltet wird (Abb. 112), oder es wird wie beim Gleichstrom-Hauptschlußmotor die Erregerwicklung umgeschaltet.

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 beim Gleichstrom-Hauptschlußmotor der Fall ist. Das ist ganz besonders bei Hebezeugen von Vorteil. In Abb. 113

ist auch hierfür ein Schaltbild gezeichnet und der Bremswiderstand in einfacher Form angedeutet. Im Gegensatz zum Hauptschlußmotor bleibt aber dieser Bremswiderstand unverändert, und die Regelung erfolgt nur in der Ständerwicklung.

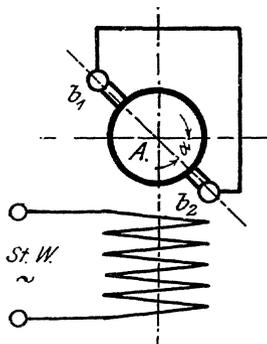


Abb. 114. Stromlauf beim Repulsionsmotor.

17. Der Repulsionsmotor.

Der Repulsionsmotor, der zuerst von Elihu Thomson 1899 angegeben worden ist, besteht aus dem Ständer und dem mit einer Gleichstromwicklung und Kollektor versehenen Läufer (Anker $A.$). Er 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. Den Stromlauf zeigt Abb. 114.

Die auf dem Kollektor schleifenden Bürsten b_1, b_2 sind miteinander verbunden, 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; die Bedienung der Bürsten ist während des Betriebes somit ohne Gefahr möglich.

Der Grundgedanke für diesen Motor beruht darauf, daß eine kurzgeschlossene, auf einer Achse befestigte Spule A . (Abb. 115) 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; die Drehbewegung hört auf. Verwendet man statt einer Spule einen aus einer ganzen Reihe solcher Spulen zusammengesetzten Anker (Abb. 116), so erreicht man eine fortdauernde Drehung des letzteren. Der Kurzschluß der Spulen wird durch die bereits erwähnten, miteinander verbundenen Bürsten erzielt.

Fließt in der Ständerwicklung der Strom I_1 , so erzeugt er das Wechselfeld Φ_1 . In dem kurzgeschlossenen Anker wird der Strom I_2 induziert, der in der durch den Bürstenkurzschluß gegebenen Achse das Feld Φ_2 zur Folge hat. Dieses Feld Φ_2 ist gegenüber Φ_1 der Ständerwicklung um nahezu 180° in der Phase verschoben (Abb. 117) und schließt mit diesem einen Winkel gleich dem Bürstenverschiebungswinkel α ein (Abb. 116). Steht der Motor still, so wird durch den in der Magnetwicklung fließenden Magnetisierungsstrom I_m das primäre Feld Φ_1 erzeugt. Wie leicht einzusehen, verhält sich der 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 I_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 $\Phi_1 \cdot \sin \alpha$ (Abb. 116, $\alpha =$ Winkel zwischen Φ_1 und Bürstenstellung), so wird $\Phi_1 \cdot \cos \alpha$ durch das von der Ankerwicklung erzeugte Feld aufgehoben, während $\Phi_1 \cdot \sin \alpha$ das eigentliche Magnetfeld bildet. Dreht sich der Anker, dann wird durch $\Phi_1 \cdot \sin \alpha$ in der Magnetwicklung eine EMK E_1 induziert, die gegenüber dem Felde und dem Strome I_1 , der phasengleich ist mit dem Felde, um 90° in der Phase nacheilt, ferner eine EMK in der Ankerwicklung E_2 . Infolge der Bewegung des Ankers

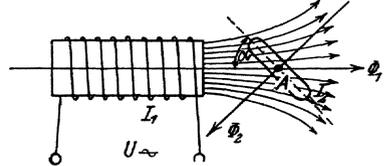


Abb. 115. Grundgedanke des Repulsionsmotors.

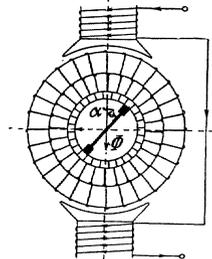


Abb. 116. Repulsionsmotor.

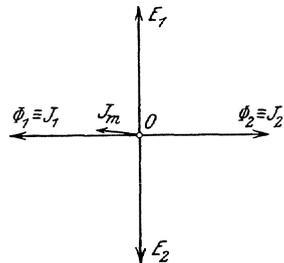


Abb. 117. Vektordiagramm des Repulsionsmotors.

erzeugte Feld aufgehoben, während $\Phi_1 \cdot \sin \alpha$ das eigentliche Magnetfeld bildet. Dreht sich der Anker, dann wird durch $\Phi_1 \cdot \sin \alpha$ in der Magnetwicklung eine EMK E_1 induziert, die gegenüber dem Felde und dem Strome I_1 , der phasengleich ist mit dem Felde, um 90° in der Phase nacheilt, 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 I_1 , und ist in Phase mit I_1 . Die EMK E_a hat einen Strom I_2 zur Folge, der mit zunehmender Drehzahl abnimmt und verhältnismäßig der Belastung ist. Dieser Ankerstrom erzeugt ein Feld in der Bürstenrichtung, das seiner Größe nach mit der Belastung des Motors übereinstimmt.

Die Gl. (84) nimmt für den Repulsionsmotor die Form an:

$$\left. \begin{aligned} E_a &= 4,44 \cdot k \frac{p \cdot n}{60} A_2 \cdot \Phi_1 \cdot \sin \alpha \cdot 10^{-8} \text{ Volt,} \\ &= \text{const } n \cdot \Phi_1 \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (91)$$

und daraus folgt die Drehzahl:

$$n = \frac{E_a}{\text{const } \Phi_1 \cdot \sin \alpha} \quad (92)$$

Da Φ_1 mit zunehmender Belastung zunimmt, fällt nach Gl. (92) die Drehzahl. Ferner ist die Drehzahl abhängig von dem Winkel α , den die Bürsten mit der Richtung des Feldes bilden. Im gewöhnlichen Betriebe läuft der Motor mit synchroner Umdrehungszahl, bei der die Läufergeschwindigkeit mit der Geschwindigkeit des Ständerfeldes übereinstimmt.

Beim Anlaufe stehen die Bürsten b_1, b_2 (Abb. 114) am weitesten aus der Polmitte entfernt. Der Strom, der den durch die Verbindung der Bürsten geschaffenen Kurzschlußstromkreis durchfließt und der, wie 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 ein Drehmoment ähnlich wie bei einem Reihenschlußmotor, wenn bei letzterem die Bürsten aus der Polmitte verschoben sind. Dieses Drehmoment ist:

$$M_d = \text{const } I_2 \cdot \Phi_1 \cdot \sin \alpha, \quad (93)$$

also ebenfalls abhängig von der Belastung. Es steigt mit abnehmender Drehzahl, weil dann I_2 zunimmt (Abb. 118). Da Ankerstrom und Feld in

Phase miteinander sind, kommt ein kräftiges Anzugsmoment zustande. Es beträgt ungefähr das 2,5fache des Nenndrehmomentes, wobei der Strom etwa auf das 2fache des Vollaststromes ansteigt. Im Höchsfalle kann $M_{d, A}$ bis zum vierfachen Werte des Betriebs-

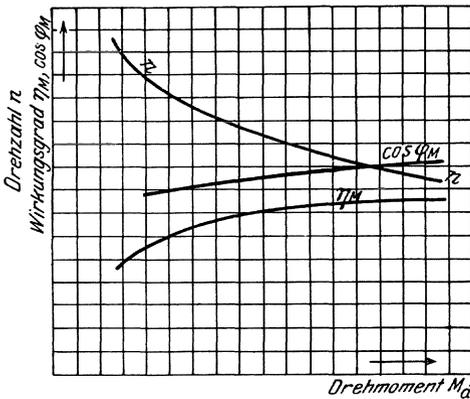


Abb. 118. Betriebskennlinien für den Repulsionsmotor.

drehmomentes gesteigert werden, wenn der dabei auftretende Stromstoß zulässig ist. Die Betriebsverhältnisse dieses Motors sind demnach folgende: Der Zusammenhang zwischen Drehzahl und Drehmoment ist ähnlich wie der beim Reihenschlußmotor, und der Verlauf der Drehzahlkennlinie gleicht ebenfalls demjenigen eines Gleichstrom-Hauptschlußmotors. Die besonders beachtenswerten Kennlinien bei fester Bürstenstellung sind in Abb. 118 zusammengestellt und geben über alles Weitere Aufschluß. Der Wirkungsgrad und auch der Leistungsfaktor werden bei unveränderter Bürstenstellung mit steigender Belastung besser. Auch dieser Motor geht bei vollständiger Entlastung durch; er muß daher mittels Fliehkraftschalters dagegen gesichert werden.

18. Die Regelung des Repulsionsmotors.

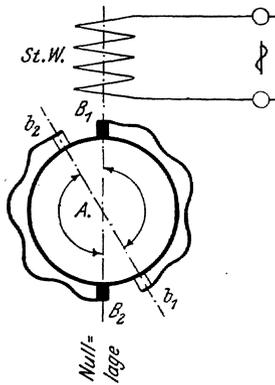
a) **Das Anlassen und die Regelung** der Drehzahl erfolgt bei diesem Motor in einfachster Weise nach Gl. (92) durch Verstellen der Bürsten. Die Drehzahl wird kleiner, je mehr man die Bürsten aus der Polmitte verschiebt, je größer also der Winkel α in Abb. 114 wird.

Das Anlassen kann außerordentlich sanft und vollkommen stoßfrei geschehen, was z. B. bei 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 vermeidbar sind. Das Verschieben der Bürsten erfolgt in der Regel durch Verstellen eines Hebels oder eines Handrades am Motor. Besondere Anlaß- und Regelgeräte 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.

Die Regelung der Drehzahl durch Bürstenverschiebung umfaßt bei gleichbleibendem Drehmomente eine Erhöhung von n um 10 vH und eine Verminderung um 50 vH gegenüber der synchronen Drehzahl. Bei einem mit n abnehmenden Momente — also bei gleichbleibender Leistung — ist der Regelbereich zumeist größer. Er liegt dann in den Grenzen zwischen 10 vH oberhalb und 75 vH 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 zugeführten Spannung 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 Bürstensatz in einen feststehenden und einen beweglichen unterteilt. Hierdurch kann eine sehr feine Einstellung einer gewünschten Drehzahl erreicht werden. Diese Schaltung ist zuerst von Deri ange-

geben worden. Die Abb. 119 zeigt das Schaltbild. Stehen die beweglichen Bürsten b_1, b_2 dicht bei den festen B_1, B_2 , dann 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 „Nulllage“ wird der Motor demnach außer Betrieb gesetzt. Je weiter die Bürsten nach der einen oder anderen Seite verschoben werden, um so größerer Strom wird in der Ankerwicklung induziert. Das Drehmoment wächst mit der Bürstenverschiebung erst langsam, dann schnell und erreicht seinen Höchstwert etwa bei einem Verschiebungswinkel von 160° , wenn eine Polteilung = 180° gesetzt wird. Den Verlauf des Drehmomentes für verschiedene Bürstenstellungen zeigt die Abb. 120,

Abb. 119. Drehzahlregelung beim Repulsionsmotor durch zwei Bürstenpaare (Derisaltung).

und in Abb. 121 sind die Kennlinien für den Wirkungsgrad η_M und den Leistungsfaktor $\cos \varphi_M$ bei verschiedenen, mit den Drehmomentkennlinien in Abb. 120 übereinstimmenden Drehzahlen gezeichnet.

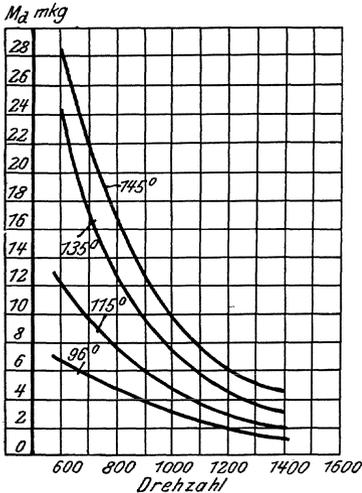


Abb. 120. Drehmoment beim Deri-Repulsionsmotor für verschiedene Bürstenstellungen.

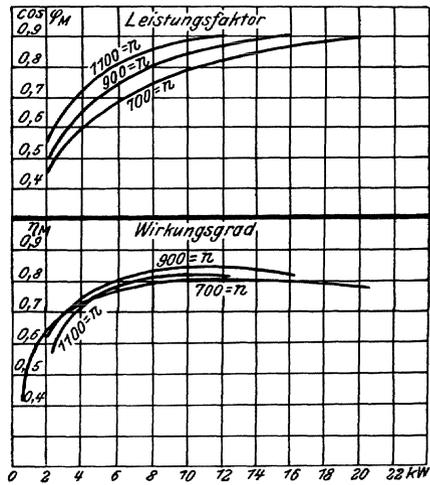


Abb. 121. Wirkungsgrad und Leistungsfaktor beim Deri-Repulsionsmotor für verschiedene Bürstenstellungen.

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

b) Der Doppel-Repulsionsmotor. Um den Repulsionsmotor auch im Anschlusse an ein Drehstromnetz benutzen zu können, ohne

daß nur eine Phase belastet und dadurch Ungleichheit in das Dreiphasennetz gebracht wird, wenden z. B. 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 (III. Abschn.) mit dem Drehstromnetze. In Abb. 122 ist das Schaltbild mit Benutzung von Transformatoren dargestellt. Wie im III. Abschnitte erläutert werden wird, kann nach der Skottschaltung ein Drehstromnetz dabei in allen Phasen gleich 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^o 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 Drehstromkollektormotor.

Das Anwendungsgebiet des Repulsionsmotors erstreckt sich auf den Antrieb von Schleuderpumpen, Lüftern, Hebezeugen, Schiebebühnen, Spinn- und Druckmaschinen und Aufzügen.

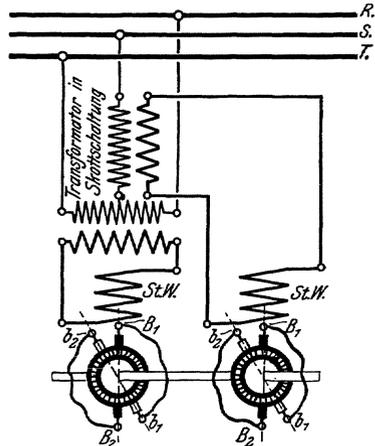


Abb. 122. Stromlauf des Doppel-Repulsionsmotors.

19. Der Repulsions-Induktionsmotor.

Die bisher besprochenen Einphasen-Kollektormotoren hatten alle einen dem Gleichstrom-Hauptschlußmotor ähnlichen Verlauf der Drehzahl bei Belastungsänderungen. Für eine ganze Reihe von Antrieben, insbesondere für Aufzüge u. dgl., wird aber die Drehzahlkennlinie des Gleichstrom-Nebenschlußmotors gefordert. Das läßt sich 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.

Der Repulsionsmotor hat bei Stillstand das größte Drehmoment; dasselbe nimmt jedoch mit zunehmender Drehzahl ab (Kennlinie b in

Abb. 123). Beim Induktionsmotor wächst dagegen das Drehmoment mit der Drehzahl von Null bis zu einem Höchstwerte, um dann beim Synchronismus rasch abzufallen (Kennlinie *a* in Abb. 123). Man erhält

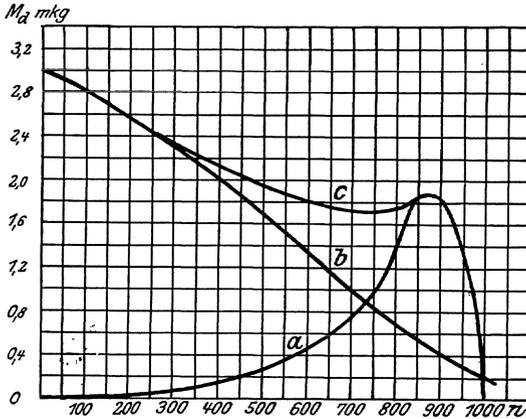


Abb. 123. Drehmomentkennlinien.
a Induktionsmotor, *b* Repulsionsmotor,
c Repulsions-Induktionsmotor.

also auf diese Weise während des Anlaufes ein sehr kräftiges Drehmoment, das etwa nach der Kennlinie *c* verläuft. Die Drehzahl bleibt nach Beendigung des Anlaufes bei allen Belastungen annähernd unverändert, wenn die Arbeitsweise als Induktionsmotor eintritt. Das Umschalten erfolgt selbsttätig durch einen Fliehkraftschalter, sobald eine etwa 3 bis 4 vH unter dem Synchronismus liegende Drehzahl erreicht ist.

20. Die Regelung des Repulsions-Induktionsmotors.

Soll der Motor angelassen werden, so muß der mit den Schleifringen verbundene Anlasser *Anl.* im Schaltbilde Abb. 124 zunächst ge-

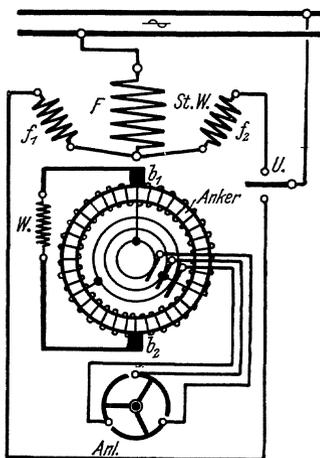


Abb. 124. Schaltbild für den Repulsions-Induktionsmotor.

öffnet sein. Der im Anker induzierte Strom I_2 fließt durch den Kommutator und die kurzgeschlossenen Bürsten b_1, b_2 . Der Anlauf erfolgt also als Repulsionsmotor. Mit steigender Drehzahl wird der Anlasser eingeschaltet und allmählich kurzgeschlossen. Dadurch wird I_2 durch die Schleifringe geleitet, und der Kommutator entlastet. Eine Funkenbildung während des Betriebes tritt nicht auf. Solange der Anlasser geöffnet ist, ist der Motor an keine feste Drehzahl gebunden, sondern er regelt sich selbsttätig nach der Drehzahlkennlinie Abb. 118 wie der Repulsionsmotor entsprechend der jeweiligen Belastung. Durch das Kurzschließen des Anlassers wird er jedoch auf eine bestimmte Drehzahl gebracht, die dann, wie gesagt, unab-

hängig von der Belastung nahezu unverändert bleibt. — Eine andere Form des Anlassens besteht darin, daß die in zwei verschiedene Teile aufgelöste Ständerwicklung durch einen Umschalter umgeschaltet

wird, während die Bürsten feststehen und um einen bestimmten Winkel dauernd gegen die neutrale Zone verschoben sind. Da bei dieser allerdings einfachen Anlaßweise ein starker Stromstoß auftritt, der erst allmählich zurückgeht, wird sie nur für Leistungen bis etwa 6 kW von den Elektrizitätswerken zugelassen.

Die Umkehrung der Drehrichtung kann auch bei diesem Motor durch Änderung der gegenseitigen Stellung des Feldes und der Bürsten erfolgen. Diese Form 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 (Abb. 124), 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.

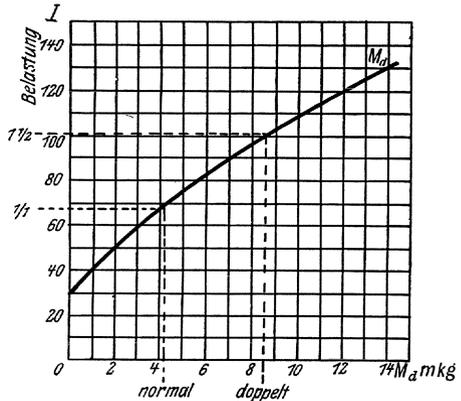


Abb. 125. Anlaufstromstärke des Repulsions-Induktionsmotors.

Wenn nur ein bestimmtes kleineres als das höchste Drehmoment zum Anfahren ausreicht, dann verwendet man zur Verminderung des Stromstoßes beim Anlassen einen Widerstand R_v zwischen den Kollektorbürsten. Mit Hilfe dieses Widerstandes kann die Zugkraft geregelt bzw. so eingestellt werden, daß der Motor seine Belastung bei möglichst geringem

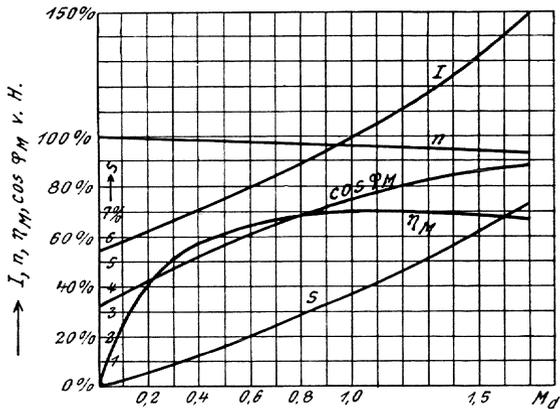


Abb. 126. Betriebskennlinien für den Repulsions-Induktionsmotor.

Stromverbrauche durchzieht. In Abb. 125 ist die Anlaufstromstärke in Abhängigkeit vom Drehmomente dargestellt. Man sieht, daß der Motor bereits das doppelte Drehmoment entwickelt bei einem Strome, der etwa die 1,5fache Höhe des Vollaststromes erreicht. Man kann also solche Motoren auch an Beleuchtungsnetze anschließen, ohne befürchten zu müssen, daß das Anlassen unangenehme Spannungsschwankungen im Netze verursacht.

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 Abb. 126 zeigt wiederum die vollständigen Betriebskennlinien.

21. Der Drehstrom-Kollektormotor im allgemeinen.

Die vielen Regelungsarten des Drehstrom-Asynchronmotors weisen darauf hin, daß man immer mehr bestrebt ist, diesen Motor auch in seiner möglichst verlustlosen Regelung den Gleichstrommotoren gleichwertig zu gestalten und damit allen Wünschen des Betriebes völlig gerecht zu werden. 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 Baustoff, sondern auch im funkenfreien Arbeiten zu beherrschen. Aus diesem Grunde führen sich die Kommutatormotoren auch mehr und mehr ein, da ihr Hauptvorzug der verlustlosen Regelung der Drehzahl immer stärker an Bedeutung gewinnt.

Es gibt auch für diesen Kollektormotor zwei Ausführungsformen, eine solche mit der Arbeitsweise eines Gleichstrom-Hauptschlußmotors und eine zweite mit der des Nebenschlußmotors.

Im allgemeinen besteht ein Drehstrom-Kommutatormotor aus dem Ständer eines gewöhnlichen Asynchronmotors und einem dem Gleichstrommotor ähnlichen Anker, der mit einem Kollektor versehen ist. Zum Unterschiede vom Induktionsmotor wird dem Ständer und dem Anker Spannung zugeführt. Infolgedessen ist die Frequenz der Läufer-Spannung unabhängig von der Drehzahl des Ankers stets gleich der Frequenz des Netzes. Je nach der Verbindung zwischen Ständer und Anker wird dem Motor eine der genannten Eigenschaften für den Verlauf der Drehzahl und des Drehmomentes gegeben.

22. Der Drehstrom-Kollektormotor mit Hauptschlußeigenschaft (Reihenschlußmotor) und seine Regelung.

Wie beim Gleichstrom-Hauptschlußmotor liegen Ständer- und Läuferwicklung in Reihe, und zwar wird der letzteren der Strom über Bürsten und Kollektor zugeleitet. Da der Kollektor aus leicht erklärlichen Gründen nicht für jede Spannung zu bauen ist, hängt die Spannung, mit der der Motor an sich betrieben werden kann, von der möglichen Kollektorspannung ab. Letztere muß verhältnismäßig niedrig gewählt werden. Infolgedessen muß man einen Transformator verwenden, wenn ein Netz mit geringer Spannung nicht zur Verfügung

steht. Dieser Transformator wird in zweierlei Form mit dem Motor zusammengeschaltet. Entweder er liegt vor dem Ständer und transformiert dann die Motorspannung insgesamt (Vordertransformator) oder zwischen Ständer und Läufer und setzt dadurch nur die Läuferspannung herab (Zwischentransformator). In Abb. 127 und 128 sind diese beiden Schaltungen gezeichnet. Für Netzspannungen bis 500 V wird der Vordertransformator nicht verwendet. Darüber hinaus empfiehlt es sich nicht, den Ständer zu wickeln. Der dann notwendige Transformator ist für die volle Leistung des Motors zu bemessen. Der Zwischentransformator wird überall dort verwendet, wo die Netzspannung unter 500 V liegt. Die Leistung für diesen hängt von dem gewünschten Drehzahl-Regelbereich ab. Sie wird um so kleiner, je kleiner der Regelbereich des Motors ist. Auch in der Ausführung als Spartransformator kann dieser Zwischentransformator gewählt werden.

Hinsichtlich der Bürstenausrüstung des Motors wird wiederum zwischen zwei Bauformen unterschieden, und zwar der einen mit einfachem Bürstensatze, der dann zur Regelung benutzt wird, und der zweiten mit doppeitem Bürstensatze, von dem nur der eine beweglich ist. Hierauf wird weiter unten noch näher eingegangen werden.

Die Wirkungsweise dieses Motors beruht auf dem Zusammenarbeiten der Ständer- und Läuferdrehfelder. Beide am Umfange sinusförmig verteilt laufen mit einer durch die Polzahl der Maschine und durch die Frequenz des zugeführten Stromes gegebenen Drehzahl synchron im Raume um. Ihre relative Lage zueinander ist, wenn der Einfluß des Zwischentransformators unberücksichtigt bleibt, durch die Lage der Bürsten bestimmt. Sind die beiden Amperewindungsachsen des Ständers bzw. des Läufers gleichsinnig, so ist das Drehmoment und die Stromaufnahme am geringsten. Diese Stellung ist die Null- oder Anfahrtstellung. Werden die Bürsten aus der Anfahrtstellung verschoben, so entsteht ein Drehmoment, dessen Richtung dadurch gegeben ist, daß es die Bürsten in die Anfahrtstellung zurückzuziehen sucht. Dem Läufer wird dann eine Spannung aufgedrückt, die nach Größe und Phase abhängig ist vom Bürstenverschiebungswinkel. Der

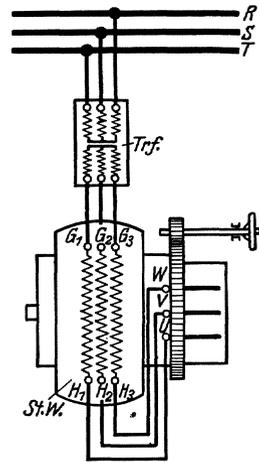


Abb. 127. Stromlauf des Drehstrom-Reihenschlußmotors mit einfachem Bürstensatz (Transformator vor der Ständerwicklung).

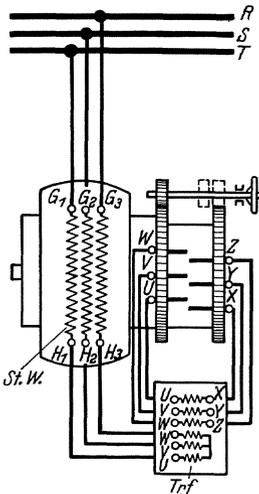


Abb. 128. Stromlauf des Drehstrom-Reihenschlußmotors mit doppeltem Bürstensatz (Transformator im Läuferstromkreise).

Motor läuft infolgedessen je nach dem Sinne der Bürstenverschiebung über- oder untersynchron. Die Abhängigkeit des Anfahrmomentes

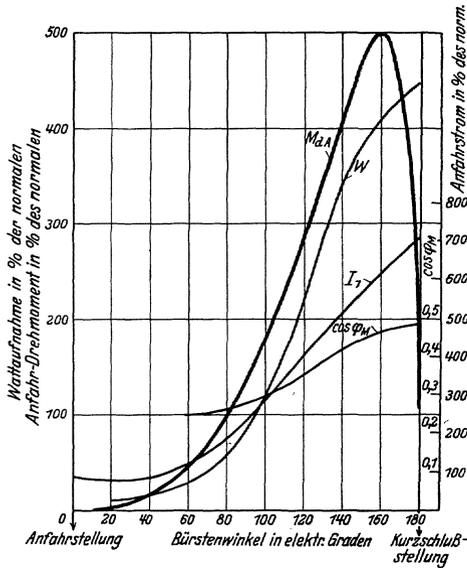


Abb. 129. Betriebskennlinien eines Drehstrom-Reihenschlußmotors mit einfachem Bürstensatz und Zwischentransformator in Abhängigkeit vom Bürstenwinkel.

von der Bürstenstellung ist in Abb. 129 gezeichnet. Das Drehmoment nimmt zunächst langsam zu, erreicht dann einen Höchstwert, fällt jedoch hinter $\alpha = 160^\circ$ el. rasch ab, um in der Stellung, in der die Stromamperewindungen einander entgegenwirken, wieder auf Null herabzusinken. Diese Stellung bezeichnet man als Kurzschlußstellung; sie darf wegen der hier auftretenden hohen Stromaufnahme im Betrieb nicht erreicht werden. Es wird daher die Stellung für größtes Drehmoment mechanisch an der Bürstenbrücke entsprechend festgelegt.

Die Drehmomentverhältnisse sind von der Drehzahl unabhängig; die Drehzahl bestimmt lediglich das Spannungsverhältnis am Ständer bzw. Läufer. Ist das aufgedrückte Drehfeld mit der durch die Bürstenverschiebung gegebenen Drehrichtung

gleichsinnig, so nimmt die Spannung am Läufer entsprechend der Verminderung der relativen Bewegung ab, erreicht in der Nähe vom Synchronismus den niedrigsten Wert und steigt von da ab wieder an. Die Ständerspannung bleibt im wesentlichen unverändert.

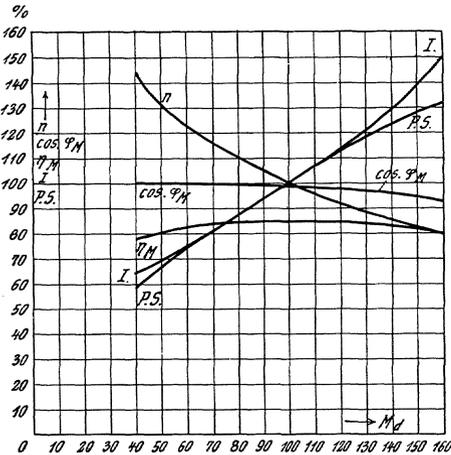


Abb. 130. Betriebskennlinien für den Drehstrom-Kollektormotor mit Hauptschlußeigenschaft.

Da Ständer und Läufer in Reihe geschaltet sind, beteiligt sich der letztere ebenfalls an der Magnetisierung; hierdurch wird erreicht, daß der Leistungsfaktor des Motors insbesondere bei den oberen Drehzahlen wesentlich bessere Werte erreicht als bei gewöhnlichen Drehstrom-Induktionsmotoren, bei denen der Ständer allein die Magnetisierung übernimmt. — Werden die Bürsten aus der Anfahrtstellung nach der entgegengesetzten

bei denen der Ständer allein die Magnetisierung übernimmt. — Werden die Bürsten aus der Anfahrtstellung nach der entgegengesetzten

Seite verschoben, so kehrt der Motor seine Drehrichtung um. Mit Rücksicht auf die Kommutierung muß dann das Drehfeld durch Vertauschen zweier Netzanschlüsse mit der Drehrichtung gleichsinnig gemacht werden.

Wie bereits gesagt, wird der Motor durch Verstellen der Bürsten angelassen. Er entwickelt ein sehr kräftiges Anzugsmoment und hat dabei eine verhältnismäßig geringe Anlaufstromstärke. Selbst bei Netzspannungsschwankungen läßt sich ein erforderliches Anzugsmoment durch Bürstenverschiebung immer erreichen. Beim doppelten Anlaufmoment erreicht der Anlaufstrom etwa den 1,5- bis 2fachen Wert des

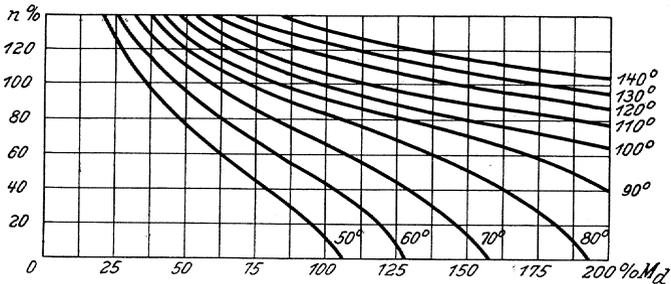


Abb. 131. Drehzahl über Drehmoment bei verschiedenen Bürstenstellungen beim Drehstrom-Reihenschlußmotor.

Nennstromes, was für die Bemessung der Sicherungen bzw. des Schalters zu beachten ist.

Die sonstigen Betriebseigenschaften dieses Motors unterscheiden sich bei festgestellten Bürsten nicht wesentlich von denjenigen des Gleich-

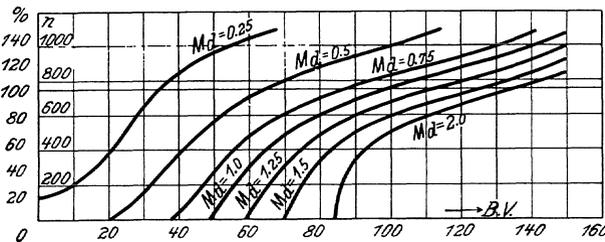


Abb. 132. Drehzahl bei verschiedenem Drehmoment und verschiedener Bürstenstellung beim Drehstrom-Reihenschlußmotor.

strom-Hauptschlußmotors, was aus den Betriebskennlinien Abb. 130 ohne weiteres zu ersehen ist. Wesentlich unterschiedlich dagegen ist die Drehzahlregelung bei diesem Motor dadurch, daß jeder Bürstenstellung eine andere Kennlinie „Drehzahl über Drehmoment“ zugeordnet ist. Abb. 131 zeigt den Verlauf der Drehzahl über dem Drehmoment und Abb. 132 den Verlauf der Drehzahl in Abhängigkeit von der Bürstenverschiebung in elektrischen Graden gemessen. Man kann willkürlich von einer zur anderen Drehzahlkennlinie übergehen und somit nach den Antriebsverhältnissen

bei jeder Belastung jede beliebige Drehzahl einstellen. Bei Entlastung hat auch dieser Motor das Bestreben, „durchzugehen“. Er muß daher mit einem Fliehkraftschalter versehen werden. Ist ein Zwischentransformator vorhanden, so läßt sich durch entsprechende Ausführung desselben die Leerlaufdrehzahl derart begrenzen, daß der Fliehkraftschalter entbehrlich wird.

Die Ausführung des Motors mit einfachem oder doppeltem Bürstensatz gestattet folgende Regelbereiche:

bei gleichbleibendem Drehmoment	}	einfacher Bürstensatz	130 bis 5 vH
		doppelter Bürstensatz	130 „ 5 „
bei quadratisch mit der Drehzahl abnehmendem Drehmoment	}	einfacher Bürstensatz	130 bis 5 vH
		doppelter Bürstensatz	130 „ 5 „

Der doppelte Bürstensatz wird in der Mehrzahl der Fälle, insbesondere aber dann gewählt werden, wenn der Kraftbedarf der anzutreibenden Maschine nicht sicher bekannt ist, sehr schwierige Anfahrbedingungen vorliegen, ferner sanftes Anfahren und sicheres Beherrschen des unteren Drehzahlbereiches verlangt werden.

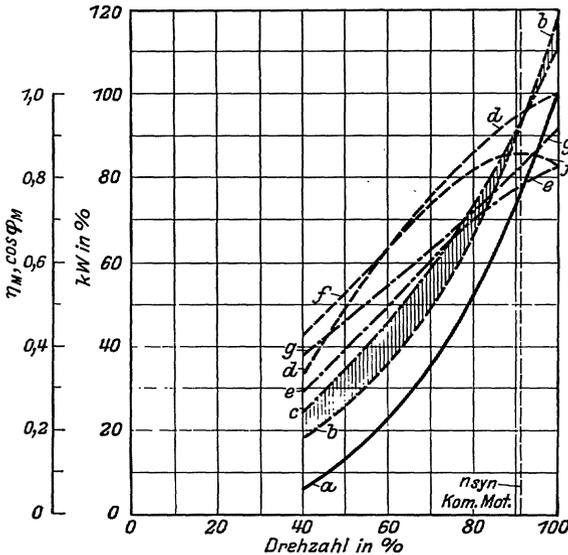


Abb. 133. Vergleich der Betriebskennlinien eines geregelten Drehstrom-Reihenschlußmotors zu einem Drehstrom-Asynchronmotor mit Widerstandsregelung.
a Antriebsleistung. *b* Leistungsaufnahme des D.R.-Motors.
c Leistungsaufnahme des Asynchronmotors. *d* Leistungsfaktor des D.R.-Motors. *e* Leistungsfaktor des Asynchronmotors.
f Wirkungsgrad des D.R.-Motors. *g* Wirkungsgrad des Asynchronmotors.

zunächst schwach belastete Motoren, deren Ständerwicklung in Dreieck geschaltet ist. Hier treten dieselben Erscheinungen hinsichtlich besserem Leistungsfaktor und Wirkungsgrad auf, wie für den gewöhnlichen Drehstrom-Asynchronmotor nach Abb. 68. Der Magnetisierungsstrom und die Verluste werden bei geringerer Spannung kleiner.

Der Wirkungsgrad eines Drehstrom-Reihenschlußmotors ist bei unverändertem Drehmoment über einen großen Drehzahlbereich annähernd unverändert gut, allerdings bei den obersten Drehzahlen etwa 3 bis 5 vH

insbesondere aber dann gewählt werden, wenn der Kraftbedarf der anzutreibenden Maschine nicht sicher bekannt ist, sehr schwierige Anfahrbedingungen vorliegen, ferner sanftes Anfahren und sicheres Beherrschen des unteren Drehzahlbereiches verlangt werden.

Eine zweite Art der Drehzahlregelung kann durch Änderung der zugeführten Spannung vorgenommen werden, und zwar entweder durch einen Regeltransformator mit Stufenschalter oder in einfacheren Fällen durch Stern-Dreieckschaltung. Die erste Form ist weniger gebräuchlich, die zweite findet häufiger Anwendung insbesondere für

schlechter als beim Asynchronmotor. Schon bei geringer Abweichung von der Höchstdrehzahl wird er dagegen wesentlich besser als bei letzterem. Der Leistungsfaktor beträgt bei Synchronismus etwa 0,95. Um sowohl nach dieser Richtung als auch hinsichtlich des Ständerstromes bei Regelung über den Synchronismus die günstigsten Verhältnisse zu erhalten, müssen dem Entwurfsingenieur alle Einzelheiten des Antriebes bekannt sein, damit er die günstigste synchrone Drehzahl wählen kann.

In Abb. 133 sind die Kennlinien für Leistung, Leistungsfaktor und Wirkungsgrad über der Drehzahl für einen Drehstrom-Reihenschlußmotor und einen durch Läuferwiderstand geregelten Asynchronmotor zusammengestellt, aus denen das bessere wirtschaftliche Verhalten des büstengeregelten Kommutatormotors klar hervorgeht. Die schraffierte Fläche stellt die Leistungersparnis dar.

Wird ein Drehstrom-Reihenschlußmotor durch eine äußere Kraft (wie sie z. B. bei Kran- und Förderanlagen beim Bremsen auftritt) entgegen der durch die Bürsten gegebenen Motordrehrichtung angetrieben, dann wird die Maschine zum Generator, d. h. sie liefert Energie ans Netz zurück. Hierbei treten jedoch leicht niedrigerperiodige Wechselströme auf, die ein heftiges Bürstenfeuer und starke Erwärmungen verursachen. Durch Einschalten eines passenden Dämpfungswiderstandes kann diese störende Begleiterscheinung beseitigt werden.

Der Drehstrom-Reihenschlußmotor ist infolge seiner Ausführung mit Kommutator teurer als der gewöhnliche Drehstrom-Induktionsmotor. Er sollte daher nur dort verwendet werden, wo wirtschaftliche und technische Gründe für ihn sprechen. Ausreichende tägliche Betriebszeit, häufiges Abweichen von der synchronen Drehzahl durch ausgiebige Anwendung seiner Regelfähigkeit sind notwendige Voraussetzungen für die Wirtschaftlichkeit des Motors. Infolge seiner Reihenschlußeigenschaften eignet er sich nur für solche Antriebe, welche ein annähernd gleichbleibendes Drehmoment besitzen. Er scheidet überall dort aus, wo bei starken Drehmomentschwankungen eine gleichbleibende Drehzahl verlangt wird. Ferner wird seine Drehzahl wie bei jedem Reihenschlußmotor von Netzspannungsschwankungen stark beeinflußt; es ist daher darauf zu achten, daß die zugeführte Spannung möglichst unverändert bleibt. In kleinen und mittleren Eigenanlagen, die stark belastet arbeiten und durch die Betriebseigenart mit Spannungsschwankungen zu rechnen haben, ist dieser Motor daher für Antriebe besonders empfindlicher Art nicht geeignet. Bei Anlagen, die Fremdstrom aus Großkraftwerken beziehen, die also häufige Spannungsschwankungen nicht aufweisen, kann, wenn die bereits erläuterten wirtschaftlichen Bedingungen erfüllt sind, diese Motorgattung wohl benutzt werden.

23. Der Drehstrom-Kollektormotor mit Nebenschlußeigenschaft (Nebenschlußmotor) und seine Regelung.

Soll der regelbare Motor Nebenschlußmotor-Eigenschaft besitzen, z. B. zum Antriebe von Werkzeugmaschinen, Papiermaschinen und ähnlichen, so ist auch diese Arbeitsweise durch folgende Schaltung des

Drehstrom-Kommutatormotors zu erreichen, die zuerst von Winter und Eichberg angegeben worden ist und in dieser Art von der AEG hergestellt wird¹.

Nach Abb. 134 wird der Netzstrom einer Hauptwicklung *a* des Ständers zugeführt. Im Ständer befindet sich eine zweite Wicklung (Hilfswicklung *b*) in den gleichen Nuten wie die Hauptwicklung, elek-

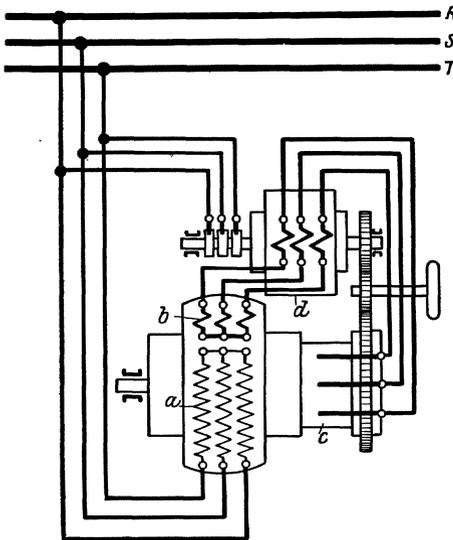


Abb. 134. Schaltbild des Drehstrom-Nebenschluß-Kollektormotors (AEG).

trisch indessen von dieser getrennt. Der der Hilfswicklung entnommene, auf niedrige Spannung transformierte Strom wird über einen Drehtransformator den Kommutatorbürsten und von diesen dem Läufer zugeleitet. Die Läufer-Spannung setzt sich aus zwei Teilspannungen zusammen, deren gegenseitige Phasenlage mittels des Drehtransformators einstellbar ist. Sie kann daher stufenlos zwischen einem größten und kleinsten Werte geändert werden, und hierdurch erfolgt die Regelung der Drehzahl, wobei der Ständerkraftfluß ungeändert bleibt. Ist die dem Anker zugeführte Spannung Null, so läuft der Motor etwa mit der synchronen Drehzahl genau wie

ein Asynchronmotor. Mit der Steigerung der Spannung steigt die Abweichung vom Synchronismus. Wirkt die dem Läufer aufgedrückte Spannung der vom Ständerfelder induzierten entgegen, so wird die Drehzahl untersynchron, im entgegengesetzten Falle übersynchron. Werden die aufgedrückte und die induzierte Spannung gegeneinander in der Phase verschoben, so kann der Leistungsfaktor verbessert werden.

Der Läufer des Drehtransformators und die Bürstenbrücke sind durch Zahnräder miteinander in geeigneter Form verbunden. Mittels eines Handrades kann die Drehzahl beliebig innerhalb eines vorgesehenen Regelbereiches eingestellt werden. Der Regelbereich liegt zwischen ± 50 vH der synchronen Drehzahl.

In Abb. 135 ist der Verlauf des Leistungsfaktors und des Wirkungsgrades innerhalb des Regelbereiches gezeichnet. Die Änderung der Drehzahl mit der Belastung entspricht etwa derjenigen gewöhnlicher Gleichstrom-Nebenschlußmotoren. Der Drehrichtungswechsel muß bei diesem Motor durch Vertauschen von zwei Netzleitungen wie beim Asynchronmotor herbeigeführt werden.

¹ Rosenthal, Dr.-Ing. H.: Stufenlos regelbare Drehstrom-Nebenschlußmotoren mit Ständerspeisung. AEG Mitt. 1929, H. 5, S. 327.

Gegenüber der AEG-Schaltung des Drehstrom-Nebenschlußmotors, bei der der Ständer am Netz liegt, wird beim S.S.W.-Motor der Läufer über Schleifringe vom Netzstrom durchflossen und der Ständer mit Hilfe des Kommutators auf eine im Läufer unterge-

brachte Hilfswicklung geschaltet. Dadurch wird der Drehtransformator entbehrlich. Hinsichtlich der Betriebseigenschaften unterscheidet sich der S.S.W.-Motor grundsätzlich nicht vom AEG-Motor. Es kann daher davon abgesehen werden, auch auf diese Bauart noch näher einzugehen.

Netzspannungsschwankungen beeinflussen die Arbeitsweise des Motors in ähnlicher Weise wie beim gewöhnlichen Induktionsmotor und zwar hinsichtlich Schlüpfung und Kippmoment, Schwankungen der Netzfrequenz ebenfalls, da die Drehzahl ungefähr verhältnismäßig der Netzfrequenz ist. Der Leistungsfaktor ist von der Belastung und der Drehzahl stark abhängig, erreicht aber bei den oberen Drehzahlen gute Werte.

Zur Beurteilung des Drehstrom-Nebenschlußmotors im Betriebe gilt, daß dieser Motor das gleiche Verhältnis wie der Gleichstrom-Nebenschlußmotor zeigt, also dort zu wählen ist, wo letzterer die betriebstechnisch beste Antriebsart darstellt (Unabhängigkeit der einmal eingestellten Drehzahl vom Drehmoment). Ist diese Unabhängigkeit der Belastung von der Drehzahl nicht ausdrücklich erforderlich, so ist besser der billigere Drehstrom-Reihenschlußmotor anzuwenden.

In wirtschaftlicher Hinsicht muß naturgemäß der Mehrpreis des Drehstrom-Nebenschlußmotors wiederum durch die Betriebsersparnisse bei häufigem Regeln und längerer Betriebszeit auf einer von der synchronen abweichenden Drehzahl gegenüber anderen Regelungsarten ausgeglichen werden.

24. Die Schalt-, Sicherungs- und Meßgeräte.

Ganz allgemein für Spannungen bis 500 V gilt hinsichtlich der Wahl der Schalt-, Sicherungs- und Meßgeräte das im 8. Abschnitte für die Gleichstrommotoren Behandelte auch für die Ein- und Mehrphasenmotoren mit folgenden Ergänzungen.

Die Wertigkeit der Schmelzsicherungen in der Reihe der Sicherungsgeräte ist für Drehstrommotoren noch weiter herabzusetzen. Es ist eine häufig beobachtete Erscheinung, daß im Störungsfalle die

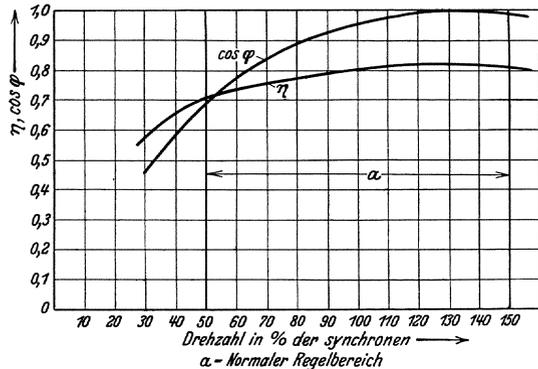


Abb. 135. Leistungsfaktor und Wirkungsgrad des Drehstrom-Nebenschluß-Kollektormotors mit Ständerspierung.

Sicherungen nicht gleichzeitig in allen drei Phasen ansprechen, sondern nur in einer Phase. Der Motor wird dann nicht vom Netz getrennt, sondern läuft als Einphasenmotor weiter und wird stark gefährdet bzw. nach kurzer Zeit zerstört werden, sofern die Bedienung diesen Gefährzustand nicht sofort bemerkt, da die Stromaufnahme im einphasigen Betrieb nicht so groß sein kann, daß der Grenzwert vom 1,6fachen des Nennstromes überschritten wird und damit die anderen Schmelzsicherungen zum Ansprechen gebracht werden, wohl aber genügt, um die Wicklungen über die zulässige Zeit hinaus unzulässig hoch zu erwärmen. Es ist daher zu empfehlen, abgesehen bei Motoren sehr kleiner Leistung die Selbstschalter viel häufiger anzuwenden und die Schmelzsicherungen zu vermeiden. Alles für die Selbstschalter auf S. 46 Gesagte gilt sinngemäß auch für die zwei- und dreipoligen Wechselstromschalter.

Über die Sicherung von Kurzschlußläufermotoren für Anlauf und Betrieb sowohl beim unmittelbaren Einschalten als auch bei der Stern-Dreieckschaltung ist auf S. 76 eingehender gesprochen worden.

Dem besonderen Vorteile, die Wechselstrommotoren größerer Leistung unmittelbar mit Hochspannung zu betreiben, ist auch in der Auswahl der Schalt- und Sicherungsgeräte Rechnung zu tragen. Für Spannungen über 500 V werden daher nicht mehr die einfachen Luftschalter (Hebelschalter mit offenen Kontakten) und Sicherungen bzw. die bisher beschriebenen Selbstschalter benutzt, sondern es treten an deren Stelle selbsttätig arbeitende Ölschalter. Bei diesen erfolgt das Schließen und Öffnen der Kontakte unter Öl. Sie liegen daher in einem vollständig mit besonders beschaffenem Öl gefüllten Ölkessel. Der Antrieb ist außerhalb dieses Kessels angeordnet.

Bei Leistungen über 100 kW und Spannungen über 3000 V treten elektrische Erscheinungen beim Ein- und Ausschalten eines Motorstromkreises auf, die insbesondere in den Entwicklungen von Überspannungen liegen, d. h. Spannungen, die um ein Mehrfaches höher sind als die Betriebsspannung. Diese Überspannungen können unter Umständen für den Motor oder auch für die Zuleitungen (Kabel, Isolatoren, Transformatoren, Schalter) gefährlich werden und Durchschläge oder Verletzungen der Wicklungsisolierung zur Folge haben. Es müssen daher im Motorstromkreise besondere Schutzgeräte vorgesehen bzw. die Leitungsanlagen (Kabelisolierung) so ausgeführt sein, daß die Überspannungen bei Schaltvorgängen entweder soweit irgendmöglich vermieden oder wenigstens auf ein ungefährliches Maß herabgedrückt werden.

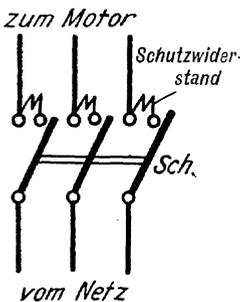


Abb. 136. Grundständige Ausführung eines Schutzschalters.

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 Schalterstromkreis einschaltet

(Abb. 136). Der Schalter wird zu diesem Zwecke derart ausgebildet, daß die Schalttraverse zunächst über Vorkontakte gleitet, zwischen denen und den Hauptkontakten diese Schutzwiderstände liegen, und dann erst den eigentlichen Stromschluß über die Hauptkontakte herbeiführt. Die ganze Schaltbewegung tritt beim Bedienen des Schalters nicht in die Erscheinung. Umschaltungen werden nicht vorgenommen. Das Vor- und Abschalten der Widerstände geschieht zwangsläufig beim Ein- und Ausschalten. Man nennt solche Schalter „Vorkontakt- oder Schutzschalter“.

Für die Selbstschalter 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 Transformator oder an den Sammelschienen der Anlage der Nullpunkt geerdet, dann müssen Relais stets in allen drei Phasen vorhanden sein.

Auch das auf S. 48 über die Spannungsauslöser¹ Gesagte ist für die Wechselstrommotoren in gleicher Weise gültig. Dabei ist an die selbsttätige Kurzschluß- und Bürstenabheborrichtung (S. 70) zu erinnern.

Werden die Motoren einer Anlage an das Netz eines Überlandwerkes angeschlossen, so ist darauf zu achten, daß die an den Motorklemmen mögliche Kurzschlußleistung², die im Störfalle das Überlandwerk liefert, von dem gewählten Sicherungsgerät ohne Gefahr für die Umgebung und seine eigene bauliche Ausbildung abgeschaltet werden kann und dieses dann auch weiter sofort erneut betriebs- also schaltbereit ist. Die rechnerische Feststellung der möglichen Kurzschlußleistung ist im IV. Bande behandelt. Erfolgt die Stromlieferung aus Großkraftwerken oder aus einem von mehreren Kraftquellen gespeisten Netze, so erhält die Frage der Kurzschlußleistung außerordentliche Bedeutung, weil letztere sich dann in Werten von vielen 100000 kVA bewegen kann und die Sicherungsgeräte in einfacher Bauweise den Kurzschlußkräften nicht mehr gewachsen sein können. Zerstörungen, Gefährdungen schwerster Art, bei Ölschaltern Explosionen und Ölbrände sind häufiger vorgekommen, weil der Prüfung der Kurzschlußleistungsfrage nicht die ihr zukommende Bedeutung beigemessen wurde.

Die Elektrizitätsfirmen widmen daher ihre ganze Aufmerksamkeit auch der Durchbildung der Sicherungsgeräte aller Art, vornehmlich natürlich der Ölschalter, um allen aus dem Betriebe gestellten Bedingungen zu entsprechen. Welche Schutzmittel z. B. für ältere Anlagen, die von der Eigenerzeugung zum Fremdstrombezug übergehen, zu wählen sind, bedarf ebenfalls sorgfältigster Prüfung durch den entwerfenden Ingenieur. Es sollen hier nur angedeutet werden die kurz-

¹ Sommer, D. K.: Müssen Drehstrommotoren bei Spannungsabsenkungen im speisenden Netz selbsttätig abgeschaltet werden? Elektrizitätswirtschaft 1929. Nr. 488.

² Knopfmacher, W.: Kurzschlußsicherheit von Industrieanlagen. AEG.-Mitt. 1928, Heft 11 u. 12.

schlußsicheren Schalter und die Strombegrenzungsdrosselspulen, ferner die Erhöhung der Kurzschlußspannung der Transformatorwicklungen.

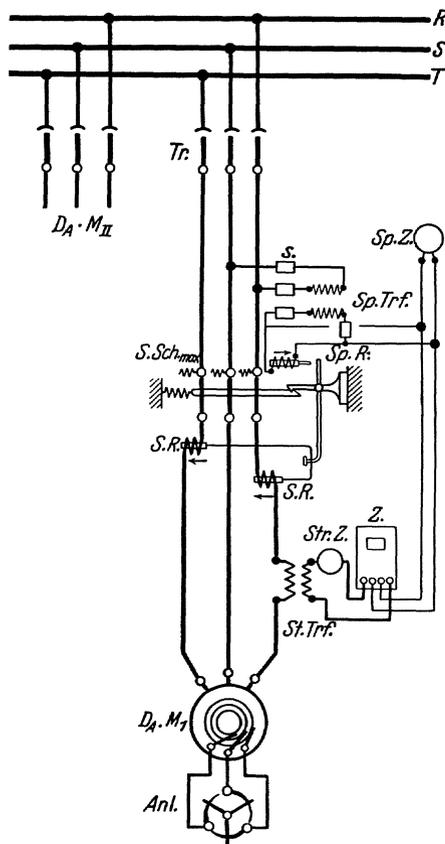


Abb. 137. Vollständiges Schaltbild für eine Anlage mit Drehstrom-Asynchronmotoren für Spannungen über 500 V.

Da naturgemäß nicht jeder kleine Motor geschützt werden kann, wird sich der Einbau von Schutzmitteln immer nur auf zusammengefaßte Stromversorgungsgebiete der Gesamtanlage zu erstrecken haben.

In Abb. 137 ist schließlich das vollständige Schaltbild für eine Hochspannungsmotoranlage gezeichnet. Sind wie in Abb. 137 mehrere Motoren an eine Hauptsammelschiene angeschlossen, dann sind bei Spannungen über 500 V zweckmäßig Trennmesser *Tr.* in jeden Motorstromkreis zu legen, um dadurch einen ganzen Motorstromkreis bei Untersuchung vollständig spannungslos machen zu können, ohne den anderen Betrieb zu stören. An Meßgeräten sind vorhanden: Spannungs- und Stromzeiger, die an Meßwandler 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 Sammelschiene unter

Spannung steht. Bei Fremdstrombezug wäre der Schalter *S.Sch_max* noch mit einem Spannungsauslöser zu versehen.

Zweiter 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 Einzelanlagen große Stromerzeugungswerke 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 Dampfturbinen- und Verbrennungsmotorenbetrieb gute Wasserhältnisse, billigste und bequeme Zuführung von Kohlen und anderem Betriebsstoff, leichte und bequeme Beschaffung von Ersatzstoffen bei größeren Instandsetzungsarbeiten 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 abgegebene Kilowattstunde (kWh) 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 Gebrauchsgebiete an einer solchen Stelle gebaut werden kann, an der die obengenannten günstigen Bedingungen erfüllt sind. Spannungen bis 100000 V 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 200000 V heraufzugehen. Infolgedessen ist heute jede Entfernung zwischen dem Kraftwerke und der Abnahmestelle überbrückbar, ohne daß die Menge des Baustoffes 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 elektrischen Kraft-

übertragung 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, Aushilfsmaschinen 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 Ausnutzungswert der Gesamtanlage. Es ist ohne große rechnerische Begründung leicht einzusehen, daß die gleiche elektrische Leistung von etwa 100 000 kW 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 Aushilfen 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 zusammengefaßten Stromerzeugung, die ausführlicher im III. u. IV. 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 Aushilfe zu verwenden und ihren Strom von derartigen großen Überlandkraftwerken 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, trotzdem aber oftmals 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 den beiden Anlagen eine gegenseitige Aushilfe und Unterstützung bei 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 Leistungen gewählt werden und dann doch eine Herabsetzung auf die Gebrauchsspannung von 220 oder 440, im Höchsfalle 500 V erfolgen müßte. Neben diesem Nachteil in der Spannung sind aber noch weitere ebenso ins Gewicht fallende vorhanden und zwar: der große Leistungsverlust, die starken Querschnitte für die Übertragungsleitungen, also der große Aufwand von teurem Baustoff bei großen Leistungen und die beschränkte Ausdehnungsfähigkeit in der Stromverteilung. Alles dieses zwingt notgedrungen dazu, den durch die einfachen Transformatoren auf jede gewünschte Spannungshöhe zu bringenden Drehstrom zu benutzen und denselben dann durch Umformer in Gleichstrom der verlangten Gebrauchsspannung umzuformen. Der Wirkungsgrad einer solchen Kraftübertragung muß naturgemäß günstiger sein als derjenige mit Gleichstrom alleine, 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 Umformieranlagen statt der unmittelbaren 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 entwerfende 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, Geräte, Schaltanlage, Leitungen einschließlich Montage, Anfuhr und Bauausführung) und des Gesamtwirkungsgrades bei Vollast und Teilbelastungen; ferner sind festzustellen: die jährlichen Ausgaben für Verzinsung, Tilgung und Abschreibung, für Gehälter und Löhne, die Kosten für die Beschaffung der Betriebsstoffe 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 Leistung zu ermitteln. Durch den Vergleich dieser Kosten bei verschiedenen Ausführungen — z. B. unmittelbare Gleichstromübertragung, Drehstrom-Hochspannungsanlage mit Kabel oder Freileitung — ergibt sich dann die zweckmäßigste Form, die aber noch auf die möglichst vollständige Erfüllung der auf S. 151 genannten allgemeinen Bedingungen zu prüfen ist.

Auch für große industrielle Unternehmungen, die eigene Gleichstromanlagen besitzen, wird bei größeren Erweiterungen der moto-

rischen Anlagen zum Betriebe von Arbeitsmaschinen, Transmissionen usw. sorgfältigst durch Rechnung festzustellen sein, ob neue Gleichstromgeneratoren oder Drehstrommaschinen mit oder ohne Umformer aufzustellen sind. Das letztere richtet sich nach den für den Antrieb der Arbeitsmaschinen zu wählenden Motoren (Gleichstrom-Drehstrom, dauernde oder vorübergehende Regelung der Drehzahl, Anzugsmoment 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 Unterstützung 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 Raumbanspruchung 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 (VDE) die Umformer je nach ihrer mechanischen Ausführung in zwei besondere Klassen eingeteilt¹, und zwar:

a) als Motorgenerator ist eine Doppelmaschine zu bezeichnen bestehend in der unmittelbaren mechanischen Kupplung 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 Einteilung 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.

Neben der Maschinenumformung ist in den letzten Jahren ein Gerät in die Praxis eingeführt, das ebenfalls Ein- und Mehrphasenstrom in Gleichstrom umformt nicht aber durch umlaufende Maschinen, sondern ähnlich einem Transformator ruhend ist. Es ist das der sog. „Gleichrichter“. Dieses Gerät ist bereits so weit durchgebildet und langjährig erprobt, daß es gegenüber der Maschinenumformung sehr bedeutsam in Wettbewerb tritt.

Zu diesen Umformern der Stromart kommt noch eine weitere Gattung hinzu, deren Aufgabe es ist, die Frequenz eines Netzes in eine abweichende eines zweiten Netzes umzuwandeln. In Amerika sind diese

¹ Regeln für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen R.E.M. des VDE.

„Frequenzumformer“ häufig anzutreffen, weil dort Kraftübertragungsanlagen vorhanden sind, die entweder Strom mit 25 und weniger Herz erzeugen, fortleiten und erst in den Gebrauchsgebieten auf höhere Frequenz (40 bis 60) bringen, oder die diese Frequenz in solche mit 16 bis 25 Herz für Bahnzwecke und große industrielle Motoren umformen. Die Vorteile geringer Frequenz liegen bei Leitungsanlagen und Generatoren in geringeren Verlusten, bei Motoren in kleineren Drehzahlen. Für letztere ist das aus den im I. Abschnitte gegebenen Grundgleichungen für die Wechselstrommotoren leicht zu ersehen. Für erstere geben die Ausführungen im II. Bande die erforderlichen Aufschlüsse. Es würde zu weit führen, hierauf näher einzugehen. In Deutschland ist bisher der Frequenzumformer nur vereinzelt zu finden. Mit der fortschreitenden Elektrisierung der Staatsbahnen und der großen Ausnutzung der Wasserkräfte, der weiter fortschreitenden Großzusammenfassung der Elektrizitätserzeugung und -verteilung wird und muß auch der Frequenzumformer bei uns mehr zur Anwendung kommen.

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 voneinander 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 fabrikmäßig vorhandenen Modelle für die verlangten Leistungen zulassen. Bekanntlich fallen die elektrischen Maschinen mit wachsender Drehzahl 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 häufigen und plötzlichen starken und stoßweise auftretenden Überlastungen ausgesetzt ist. Die

Stromstöße werden durch den in solchen Fällen auf der Riemenscheibe 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 Stromerzeugungsanlage im Vergleich zur Leistung des Umformers klein ist und gleichzeitig Strom für Beleuchtungszwecke liefert. Zur Vermeidung von Schwankungen im Lichte sind dann unter Umständen selbsttätige Spannungsregler, Schwungmassen u. dgl. für die Maschinen im Kraftwerke oder im Umformerwerke einzubauen. Andererseits hat die Riemenverbindung aber die Nachteile, daß der Gesamtwirkungsgrad des ganzen Maschinensatzes infolge des Gleitens des Riemens auf den Scheiben und des damit verbundenen Arbeits- und Geschwindigkeitsverlustes, sowie durch die Steifigkeit des Übertragungsmittels namentlich bei Neuanlagen schlechter wird als bei unmittelbarer Kupplung. Dieser Verlust beträgt:

bei neuen Riemen	etwa 2 vH
„ 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) etwa 5 m, für breitere etwa 10 m betragen. Die Frage der Platzbeschaffung ist aber gerade für Umformerwerke oftmals besonders schwierig (z. B. in Städten). Es muß daher vor der endgültigen Entwurfsbearbeitung 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 Seilantrieb².

Die Wahl der Drehzahlen der beiden Maschinen ist wie bereits gesagt von der Geschwindigkeit des Übertragungsmittels abhängig, die betriebstechnisch günstig in den Grenzen von etwa 3 m/sec bis höchstens 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.

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.

² Über die Berechnung der Riemen-, Seil- und Kettenantriebe siehe Hütte Teil II.

Der Riemenantrieb kommt ferner nur für Maschinen kleinerer Leistung etwa bis 100 kW zur Anwendung, weil darüber hinaus die Riemen und Seile sehr kostspielig sind (Doppelriemen, große Anzahl parallel arbeitender Seile) und besonders starke Maschinenfundamente 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 zweilagriger Maschinen,
2. in Dreilager-Ausführung,
3. in Zweilager-Ausführung.

Die Kupplung zweier zweilagriger Maschinen (Abb. 138) bietet den Vorteil, daß zwei Maschinen gewöhnlicher Bauart, aber naturgemäß gleicher Drehzahlen ohne besondere bauliche 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). Besser wählt man eine besondere sog. elastische Kupplung und kann durch diese dann ebenfalls bis zu einem gewissen Grade Dämpfung von Stößen, die auf den Generator kommen, für den Motor erreichen.

Dem genannten Vorteile der Benutzung gewöhnlicher Maschinenmodelle stehen Nachteile gegenüber, die einmal in den vier Lagern liegen, wodurch ein vierfacher Reibungsverlust vorhanden ist, der naturgemäß wiederum den Gesamtwirkungsgrad des Maschinensatzes 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 in 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.

Sind die Stromerzeugungskosten im eigenen Betriebe hoch z. B. bei Dampfmaschinenbetrieb mit ungünstigen Kohlenbeschaffungsverhältnissen, oder soll der Umformer an eine fremde Kraftübertragungsanlage (Überlandkraftwerke oder dgl.) angeschlossen werden, dann muß

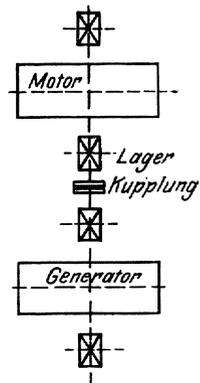


Abb. 138. Vierlagerbauform.

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.

Die Dreilager-Ausführung kann entweder in der Weise getroffen werden, daß jede Maschine ihre eigene Welle mit Kupplungsflansch erhält und diese verschraubt werden (Abb. 139), oder daß man eine

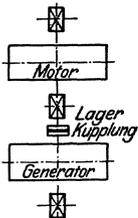


Abb. 139. Dreilagerbauform mit Kupplung

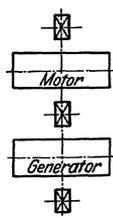


Abb. 140.

Dreilagerbauform

ohne Kupplung.

durchgehende Welle (Abb. 140) benutzt. Letzteres wird aus Gründen der Herstellung seltener ausgeführt und ist auch im Betriebe bei Instandsetzungen 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 ganz vorzüglich sein, da anderenfalls Betriebsstörungen durch unzulässige Lagererwärmung nicht zu vermeiden sind. Diesen Übelständen ist die Kupplung der beiden Wellen, die

natürlich dann nur die Form einer starren Flanschkupplung haben darf, weil eine elastische Kupplung stets zwischen zwei Lagern liegen muß, nicht unterworfen. Die drei Lager müssen in beiden Fällen, um Lageränderungen 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.

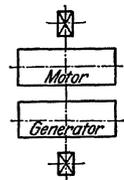


Abb. 141. Zweilagerbauform.

Bei der Zweilager-Ausführung (Abb. 141) 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 der Maschinensatz 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 Maschinensatzes auch dann noch wenigstens teilweise zu ermöglichen, wenn eine Gleichstrommaschine unbrauchbar wird, sind die Gleichstromgeneratoren zu beiden Seiten des Motors anzuordnen und mit getrennten Flanschwellen zu versehen (Abb. 142), damit die schadhafte Maschine leicht und schnell abgekuppelt werden

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 Maschinensatzes auch dann noch wenigstens teilweise zu ermöglichen, wenn eine Gleichstrommaschine unbrauchbar wird, sind die Gleichstromgeneratoren zu beiden Seiten des Motors anzuordnen und mit getrennten Flanschwellen zu versehen (Abb. 142), damit die schadhafte 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 das oben bei der Dreilagerausführung Gesagte ebenfalls.

In elektrischer Hinsicht haben die Motorgeneratoren¹ 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. Für die Gleichstrom-Wechselstrom-Motorengeneratoren 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 sind im IV. Bande ausführlicher besprochen, in dessen ist hier soviel von denselben erwähnt, als zur Beurteilung der Umformer an sich und zur Entwurfsbearbeitung notwendig ist.

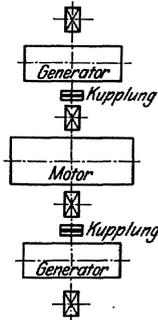


Abb. 142. Doppelmaschinensatz.

27. Der Synchron-Motorgenerator.

a) Der **Drehstrom-Synchronmotor** ist nichts anderes als ein Synchrongenerator, dem elektrische Leistung zugeführt wird, und der dann an seiner Welle mechanische Leistung abgibt. Der Aufbau der Maschine muß als bekannt vorausgesetzt werden. Die Synchronmaschine hat für die Erregung eine besondere Gleichstromquelle nötig (angebaute Erregermaschine oder vorhandenes Gleichstromnetz gleichbleibender Spannung)². Synchronmaschine kurzweg heißt die Maschine, weil sie

¹ Entwicklung der Umformer in den Vereinigten Staaten. ETZ 1921, H. 46, S. 1328.

² Die Erregung des Synchronmotors wird gespeist entweder von einem angebauten Gleichstromgenerator (Eigenerregung), wie sie in Tafel I, Abb. I und II gezeichnet ist, oder von einer mit dem Motor nicht in mechanischer Verbindung stehenden also vollkommen unabhängigen Gleichstromquelle (Fremderregung). Als letztere kommen in Frage: ein besonderer Erregermaschinensatz z. B. bestehend aus Asynchronmotor und Gleichstrom-Nebenschlußgenerator, oder ein vorhandenes Gleichstromnetz (Tafel I, Abb. III).

Die angebaute Erregermaschine wird entweder mit einer Nebenschlußwicklung oder mit einer Doppelschlußwicklung versehen. Im ersteren Falle erfolgt die Regelung der Erregung des Synchronmotors durch Änderung der Erregung der Erregermaschine mittels eines Nebenschlußreglers. Die Geräte 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 auch im Wir-

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 mit $\cos \varphi = 1$ arbeiten und darüber hinaus auch voreilenden Blindstrom in das Netz zurückliefern kann; er ar-

kungsgrade ungünstiger ist die Doppelschluß-Erregermaschine und die Schaltung des Erregerstromkreises nach Tafel I, Abb. I. 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. Die Benutzung einer mit Doppelschlußwicklung versehenen Erregermaschine ist heute fast vollständig verlassen worden, weil in dem dann erforderlichen Hauptstromregler unnötig Energie nutzlos vernichtet wird. Man benutzt, sofern die Spannungsregelung durch die Regelung der Erregung der Nebenschlußerregermaschine nicht ausreicht, noch eine zweite kleine Hilferregermaschine. Für Synchronmotoren wird zumeist die einfache Nebenschlußerregermaschine ausreichen.

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 selbsttätig arbeitende Regler vorhanden sind. In derartigen Betrieben ist die Doppelschluß-Erregermaschine der reinen Nebenschlußmaschine gegebenenfalls vorzuziehen, weil bei dieser Ausführung die Erregerspannung leichter in geringen Grenzen ohne besondere Nachstellung des Reglers unverändert gehalten werden kann.

Ist dagegen mit großen Belastungsstößen oder mit Spannungsschwankungen im Drehstromnetze zu rechnen, dann empfiehlt sich vorteilhafter die Verwendung eines besonderen unabhängigen Erreger-Maschinensatzes oder der Anschluß der Magnetwicklung des Synchronmotors an ein vorhandenes Gleichstromnetz, das dann allerdings gleichbleibende Spannung haben muß (Tafel I, Abb. I).

Sind nur ein oder zwei Motorgeneratoren aufgestellt, 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 Motorengeneratoren übertragen. Auch in einem großen Umformerwerke mit z. B. fünf und mehr Umformern gibt man lieber jedem Maschinensatz seine eigene Erregermaschine, wenn der Betrieb nicht nach Obigem die unabhängige Fremderregung fordert. Die Anlagekosten sind zwar etwas höher, als wenn für mehrere Umformer ein Erreger-Maschinensatz vorgesehen wird, insbesondere dann, wenn die Gleichstromgeneratoren der Motorgeneratoren niedrige Drehzahlen aufweisen, weil in diesem 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.

Der besondere Erreger-Maschinensatz mit Asynchronmotor ist dagegen insofern für viele, selbstverständlich nur größere Umformerwerke die günstigere Anordnung, weil der Erreger-Maschinensatz gleichbleibende Spannung liefert und das Stillsetzen eines großen teuren Maschinensatzes infolge einer Störung an der kleinen Erregermaschine bei unmittelbarem Zusammenbau fortfällt. Außerdem ist die Wartung und Bedienung des einen großen Satzes mit seinem Ersatz, der selbstverständlich vorhanden sein muß, einfacher und billiger als diejenige z. B. von fünf kleinen Einzelmaschinen.

Weiteres über die Erregermaschinen wird im IV. Bande bei den Synchrongeneratoren erwähnt werden.

beitet dann gewissermaßen als Kapazität, 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 bedeutende Blindströme von den Stromerzeugern fordern, kann ein Synchronmotor allein oder wie hier, wenn er zum Antriebe eines Gleichstromgenerators dient, wesentliche Vorteile bieten. Wird von ihm diese Blindstromerzeugung verlangt, dann muß er größer als für den Antrieb des Gleichstromgenerators erforderlich bemessen werden und zwar aus folgender Überlegung:

Bezeichnet:

- I_W den Wirkstrom (Nutz- oder Arbeitsstrom) in A,
- I_B den Blindstrom in A,
- I den Gesamtstrom in A,
- N_W die Wirkleistung in kW,
- N_B die Blindleistung in kVA,
- N_S die Scheinleistung in kVA,

so ist nach Abb. 143:

$$I = \sqrt{I_W^2 + I_B^2} \quad (93)$$

$$\left. \begin{aligned} I_W &= I \cdot \cos \varphi, \\ I_B &= I \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (94)$$

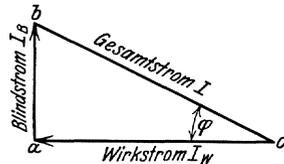


Abb. 143. Wechselstrom-Diagramm.

$$N_W = U \cdot I_W \cdot 10^{-3} = U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3} = N_S \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3} \text{ kW},$$

$$N_B = U \cdot I_B \cdot 10^{-3} = U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot 10^{-3} = N_S \sin \varphi \cdot 10^{-3} \text{ kVA}$$

$$N_S = \sqrt{N_W^2 + N_B^2} \text{ kVA}.$$

Für den mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ arbeitenden Synchronmotor geht die Gl. (93) über in die Form:

$$I = \sqrt{I^2 \cdot \cos^2 \varphi + I^2 \cdot \sin^2 \varphi} = \sqrt{I^2 \cdot 1 + I^2 \cdot 0} = I, \quad (95)$$

also es verschwindet der Blindstrom, und der dem Motor zugeführte Strom wird vollständig ausgenutzt. Soll nun ein bestimmter zusätzlicher Blindstrom I'_B ins Netz geliefert werden, dann ist der Motor für den Strom:

$$I' = \sqrt{I^2 + I_B'^2} \quad (96)$$

zu bemessen.

Hat ein Drehstrom-Synchronmotor zum Antriebe eines Gleichstromgenerators z. B. $N_n = 1000$ kW abzugeben, so errechnet sich bei einer Spannung von 3000 V und bei $\cos \varphi = 1$ die dann reine Wirkstromstärke des Motors (Strecke $\bar{c}\bar{a}$ in Abb. 143) zu:

$$I = \frac{N_n \cdot 1000}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi_M} = \frac{1000 \cdot 1000}{3000 \cdot 1,73 \cdot 1} \approx 192 \text{ A}.$$

Soll von demselben noch ein Blindstrom $I_B = 100$ A abgegeben werden, dann ist die Gesamtstromstärke des Motors (Strecke $c\bar{b}$ in Abb. 143):

$$I = \sqrt{192^2 + 100^2} = 216 \text{ A}$$

und der Motor für eine Scheinleistung zu bemessen von:

$$N'_s = \frac{216 \cdot \sqrt{3} \cdot 3000}{1000 \cdot 0,95 (\eta_{M_s})} = 1180 \text{ kVA.}$$

Infolge einer solchen teilweisen oder vollständigen Beseitigung der in einem Netze vorhandenen Blindströme wird der Leistungsfaktor der ganzen Kraftübertragung verbessert, der Strom in den Generatoren, Transformatoren und Leitungen verringert. Dadurch ist es möglich, entweder eine bereits bestehende Anlage besser auszunützen oder bei einer Neuanlage unter Umständen ganz erheblich an Kosten zu sparen (S. 162). Die Steigerung der Ausnutzungsfähigkeit einer vorhandenen Anlage ist dann von ganz besonderem Werte, wenn eine Erweiterung der Gebäude nicht mehr durchführbar ist. Auch auf die Verbesserung der Spannungsregelung durch die Beseitigung des Blindstromes sei hier hingewiesen. Bei Umformerneuanlagen bedarf es daher einer eingehenden Rechnung, um festzustellen, um welchen Betrag es sich bei der Ersparnis handelt gegenüber den Kosten, die durch die Aufstellung, Unterhaltung und Bedienung eines größer bemessenen Synchronmotors entstehen (Zahlentafel 5).

Der Einfluß der Blindleistung auf die Verluste V geht aus Gl. (97) hervor:

$$V = R \cdot I^2 = R [I_W^2 + I_B^2]. \quad (97)$$

Die Zahlentafel 6 zeigt für verschiedene Werte des Leistungsfaktors Blindstrom- und Gesamtverluste zu den unvermeidbaren Wirkstromverlusten, die = 1 gesetzt sind. Z. B. bei $\cos \varphi = 0,6$ tritt nahezu der dreifache Verlust auf gegenüber demjenigen, den der Wirkstrom verursachen würde, wenn er allein vorhanden wäre.

Zahlentafel 6.

Leistungs- faktor $\cos \varphi$	Wirkstrom- verluste $R \cdot I_W^2$	Blindstrom- verluste $R \cdot I_B^2$	Gesamt- verlust $R \cdot I^2$
1	1	0	1,00
0,9	1	0,24	1,24
0,8	1	0,56	1,56
0,7	1	1,04	2,04
0,6	1	1,78	2,78
0,5	1	3,00	4,00
0,4	1	5,25	6,25

Andere Gelegenheiten bieten sich oft auch darin, daß an Stelle eines Drehstrom-Asynchronmotors ohne Phasenschieber zum Antriebe von Bergwerkslüftern und -pumpen oder anderen Maschinen, 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

keine dieser günstigen Betriebsbedingungen gegeben, so wird man unter Umständen den Synchronmotor leerlaufen lassen, ihn also lediglich zur Blindstromdeckung benutzen, und man kann auch dann noch reichliche Vorteile, gute Verzinsung des Anlagekapitals usw. erzielen.

Ist das Netz der Kraftübertragungsanlage sehr ausgedehnt und weit verzweigt, dann hat man gegebenenfalls mehrere Synchronmotoren aufzustellen und sie auf solche Plätze zu verteilen, an denen ein besonders schlechter Leistungsfaktor vorhanden ist.

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 Überlandkraftwerken, anzutreffen ist — und wünscht man den $\cos \varphi$ auf 1 zu bringen, so war z. B. bei 1000 kW und 5000 V:

bei $\cos \varphi = 0,6$ die Stromstärke:

$$I = \frac{N_n \cdot 1000}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi} = \frac{1000 \cdot 1000}{5000 \cdot 1,73 \cdot 0,6} = 193 \text{ A},$$

und sie geht bei $\cos \varphi = 1$ zurück auf:

$$I = \frac{1000 \cdot 1000}{5000 \cdot 1,73 \cdot 1} = 116 \text{ A}.$$

Also beträgt die Stromstärke, ohne daß sich die Leistung oder die Spannung geändert hat, nunmehr nur rund 60 vH der bisherigen. Sie verringert sich demnach prozentual um $(1 - \cos \varphi) \cdot 100$ vH. 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 vH günstigeren Wirkungsgrad besitzen 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 Leitungsbaustoff ist folgendes zu bemerken: Bezeichnet q den Querschnitt der Leitungen in mm^2 , l die einfache Länge in km, U_2 die Spannung und N_{n_2} die abzugebende Nutzleistung in kW bei der Spannung U_2 an der Verbrauchsstelle, ρ den spezifischen Widerstand des Leitungsbaustoffes ($\rho = 0,0175$ für Kupfer) und p den Leistungsverlust in Prozenten der Leistung N_{n_2} , so ist für Drehstrom:

$$q = \frac{N_{n_2} \cdot l \cdot 10^8}{U_2^2 \cdot p \cdot \cos^2 \varphi_2} \rho,$$

für Einphasenstrom:

$$q = \frac{N_{n_2} \cdot 2l \cdot 10^8}{U_2^2 \cdot p \cdot \cos^2 \varphi_2} \rho.$$

Liegen p und U_2 fest, dann ist der Querschnitt und damit die Menge des Leitungsbaustoffes nur abhängig von dem Werte $\frac{1}{\cos^2 \varphi_2}$.

Bei $\cos \varphi_2 = 0,6$ wird demnach in einer Drehstromanlage die Baustoffmenge für Leitungen 2,8mal größer als bei $\cos \varphi = 1$. Dasselbe

gilt für den Verlust in den Leitungen, wenn die Menge des Baustoffes nicht geändert werden soll, und zwar beträgt derselbe (wie nach Zahlen-
tafel 6 bereits erörtert) bei $\cos \varphi = 0,6$ rund 2,8mal mehr als bei
 $\cos \varphi = 1$.

Soll nun eine Netzbelastung von N_1 kW bei einem $\cos \varphi_1$ auf einen
besseren Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$ gebracht und hierzu der Synchron-
motor eines Motorgenerators benutzt werden, der mit N_2 kW bei
 $\cos \varphi = 1$ durch die Gleichstrommaschine bereits belastet ist, so ist
der Synchronmotor für eine scheinbare Leistung zu bemessen von:

$$N'_{SM} = \sqrt{N_x^2 + N_2^2}. \quad (98)$$

N_x gibt die noch unbekannte Leistung an, die notwendig ist, um
die verlangte Blindleistung zu erzeugen. Nach einer Umrechnung¹ findet
man:

$$\begin{aligned} N_x &= N_1 \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - (N_1 - N_2) \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \\ &= N_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - (N_1 - N_2) \operatorname{tg} \varphi_2. \end{aligned} \quad (99)$$

Der Leistungsfaktor des Synchronmotors ist dann:

$$\frac{N_2}{\sqrt{N_x^2 + N_2^2}}. \quad (100)$$

In Deutschland haben übererregte Synchronmotoren für Blind-
stromerzeugung neuerdings vielfach Anwendung gefunden.

Diesem recht bedeutenden Vorteile des Synchronmotors,
den Leistungsfaktor der Kraftübertragung zu verbessern,
stehen aber auch Nachteile gegenüber, die teilweise in der
umständlichen Inbetriebsetzung und teilweise in der Ar-
beitsweise des Motors liegen.

Um die Inbetriebsetzung eines Drehstrom-Synchronmotors zu
erläutern, sei folgendes vorausgeschickt. Wird die Wicklung einer Mehr-
phasenmaschine von einem Strome durchflossen, so wird von dem
Strome ein Drehfeld erzeugt, dessen Drehzahl relativ zum Anker ge-
geben ist aus der Gleichung $n = \frac{60 \cdot \nu}{p}$. Steht die vom Wechselstrom
durchflossene Wicklung still, und bringt man den Anker auf irgendeine
Weise auf die Drehzahl des Drehfeldes, so wird derselbe mitlaufen.
Die sich in der Armaturwicklung ausbildenden Pole und die durch Gleich-
strom erregten Pole des Magnetrades ziehen einander an, sofern sie un-
gleichnamig 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 tangentiale Kräfte auf, durch die das Magnetrad mit-
genommen wird, weil die Pole stets bestrebt sind, zueinander dieselbe
Lage einzunehmen. Ein gleichbleibendes Drehmoment kann infolge-
dessen nur entstehen, wenn das Magnetrad mit derselben Geschwindig-

¹ Siehe auch die zeichnerische Darstellung Abb. 105.

keit 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. Wird vom Anker mechanische Leistung abgegeben, so verschiebt sich die Lage der Pole im Sinne einer Nacheilung.

In Abb 144 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° Voreilung als Generator. In den anderen Lagen ist der Gang unstabil.

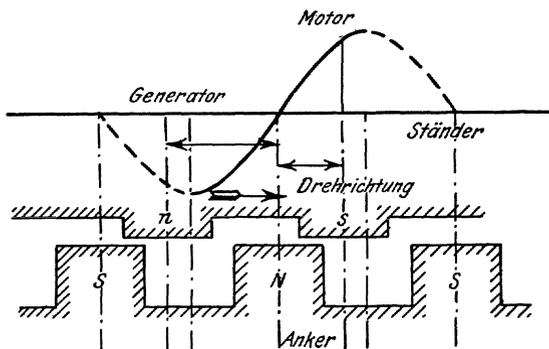


Abb. 144. Bildliche Darstellung der Arbeitsweise einer Synchronmaschine.

Aus diesen kurzen Betrachtungen geht hervor, daß ein Synchron-

motor nicht wie ein Gleichstrom- oder Drehstrom-Asynchronmotor von selbst anläuft, sondern es muß das Magnetrad durch besondere Hilfsmittel erst auf die synchrone Drehzahl gebracht werden. Ferner muß der Motor, bevor er auf das Netz geschaltet werden darf, in Synchronismus mit diesem liegen.

Dieser Nachteil des Synchronmotors in der Schwierigkeit des Anlaufes und der Synchronisierung tritt wesentlich in die Erscheinung, wenn der Synchronmotor zum Antriebe von Arbeitsmaschinen dienen soll. Aus den folgenden Erläuterungen über die verschiedenen Anlaßformen ist zu ersehen, daß selbst bei der heute wohl am häufigsten benutzten durch Selbstanlauf das Anlaufmoment so gering ist, daß es für den Arbeitsmaschinenantrieb zumeist nicht ausreicht, Sonderfälle natürlich ausgenommen. Für die Benutzung des Synchronmotors zum Antriebe eines Gleichstromgenerators also für Umformerzwecke wird dieser Nachteil dann nicht ins Gewicht fallen, wenn der Umformer leer anlaufen kann. Das ist aber immer möglich, selbst wenn nach Störungen, die die Ursache für das Herausfallen des Synchron-Motorgenerators gewesen sind, dieser wieder auf das Netz zugeschaltet werden muß, sofern die Gleichstromseite unter großer Last steht. Die Unabhängigkeit der Gleichstrommaschine elektrisch von der Drehstromseite gibt hier die Möglichkeit, den Betrieb unter derart erschwerten Lastverhältnissen wieder aufzunehmen, indem der Motorgenerator eingeschaltet und dann die Gleichstromseite allmählich unter Spannung

gesetzt wird. Der Synchron-Motorgenerator ist nach dieser Richtung dem Einankerumformer gegenüber im Vorteil.

Aus dem elektrischen Aufbau der Synchronmaschine folgt weiter, daß sie gegen Spannungs- und Frequenzschwankungen im Drehstromnetze empfindlich ist. Treten solche über ein bestimmtes Maß auf, so kann der Synchronismus zwischen Maschine und Netz gestört werden. Der Synchronmotor fällt dann, wie man sagt, aus dem Tritt und muß sofort vom Netz getrennt werden. Soll daher ein Synchron-Motorgenerator an ein großes Überlandnetz angeschlossen werden, so ist hier zur Vorsicht zu raten, sofern mit häufigen und starken Spannungsschwankungen und je nach der Größe der Strom liefernden Kraftwerke auch mit Frequenzschwankungen zu rechnen ist. Da der Einankerumformer ein ähnliches Verhalten zeigt, sei auf das auf S. 198 Gesagte besonders hingewiesen, das hier zur Ergänzung herangezogen werden muß.

Auch die Überlastungsfähigkeit des Synchronmotors ist beschränkt. Das synchrone Kippmoment beträgt etwa das 1,7fache des Nenndrehmomentes. Der Asynchronmotor ist hierin dem Synchronmotor überlegen.

Auf eine weitere Eigenart des Synchronmotors ist schließlich noch besonders aufmerksam zu machen, die namentlich für den Betriebsingenieur von Bedeutung ist. Tritt im stromliefernden Drehstromnetze ein Kurzschluß ein, so wirkt der Synchronmotor als Generator und erhöht den Gesamtkurzschlußstrom d. h. sowohl den Stoß- als auch den Dauerkurzschlußstrom. Letzterer erreicht je nach der Bauart des Synchronmotors den 2- bis 3fachen Wert des Vollaststromes. Bei der Prüfung der möglichen Kurzschlußströme innerhalb eines Netzes sind daher auch alle Synchronmotoren mit zu berücksichtigen. Weiteres ist im IV. Bande ausführlich behandelt.

Diese kurze Kennzeichnung der Betriebseigenarten des Synchronmotors läßt ersehen, daß der Synchron-Motorgenerator nicht immer die geeignetste Umformergattung ist. Zu entscheiden nach dieser Richtung hat lediglich der Betrieb der Gesamtanlage.

Auch wirtschaftlich, d. h. hier hinsichtlich des Wirkungsgrades bei Voll- und besonders bei Teilbelastung, ist der Motorgenerator den anderen Umformergattungen gegenüber im Nachteil (Abb. 192).

Auf alle diese Verhältnisse wird zusammengefaßt für alle Umformungsarten auf S. 251 nochmals zurückgekommen.

b) **Das Anlassen.** Da der Synchronmotor und damit der Motorgenerator als solcher nicht ohne weiteres zum Anlauf gebracht werden kann, sind eine Anzahl von Anlaßeinrichtungen durchgebildet worden, für deren Auswahl wiederum der Gesamtbetrieb eines Netzes oder einer Anlage in der Hauptsache bestimmend ist. Das bezieht sich im wesentlichen auf den zuzulassenden Stromstoß beim Einschalten des Motorgenerators auf das Netz und die Häufigkeit des Anlassens. Da Umformer zumeist nur selten angelassen werden, vielmehr über lange Betriebszeiten am Netz bleiben, scheidet die Frage des oftmaligen Anlassens aus. Bedeutungsvoller dagegen ist der Stromstoß beim Anlassen

des Motorgenerators, dessen zulässige Höhe sich im allgemeinen danach zu richten haben wird, wie sie zur Leistung des stromliefernden Kraftwerkes bzw. zur Gesamtbelastung des Netzes, dem Spannungsabfall in der Zuleitung und der dadurch bedingten Spannungsabsenkung für andere Stromverbraucher liegt. Es müssen nach dieser Richtung gegebenenfalls genaue rechnerische Feststellungen gemacht werden, bevor die Auswahl getroffen wird.

Die am häufigsten benutzten Anlaßverfahren sind:

1. der Selbstanlauf;
2. die angebaute Erregermaschine als Anwurfsmotor;
3. der Gleichstromgenerator als Anwurfsmotor;
4. Benutzung eines besonderen Asynchronmotors zum Anwerfen.

Die Stromabgabe auf der Gleichstromseite ist daher unter Umständen abhängig vom Anlaßverfahren und für die einzelnen Inbetriebsetzungsformen verschieden.

1. Der selbstanlaufende Synchronmotor. Diese Art der Inbetriebsetzung des Synchron-Motorgenerators wird heute bei weitem bevorzugt, weil sie am einfachsten ist, und bei geübter Bedienung das schnellste Hochfahren und Zuschalten auf das Drehstromnetz ermöglicht. Von den verschiedenen Ausführungsformen in der Durchbildung des Synchronmotors, die sich auch nach den Anforderungen richten, die für den Anlauf gestellt werden, soll nur die einfachste kurz behandelt werden. Das Magnetrad wird neben der Erregerwicklung mit einer Kurzschlußwicklung (Dämpferwicklung) versehen ähnlich dem Läufer eines Drehstrom-Kurzschlußankermotors. Zu diesem Zwecke werden lamellierte Pole verwendet, und die Polschuhe erhalten Nuten, in denen die besondere Dämpferwicklung 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 vermeidbar, wenn man den Polbogen mindestens 75 bis 80 vH der Polteilung wählt.

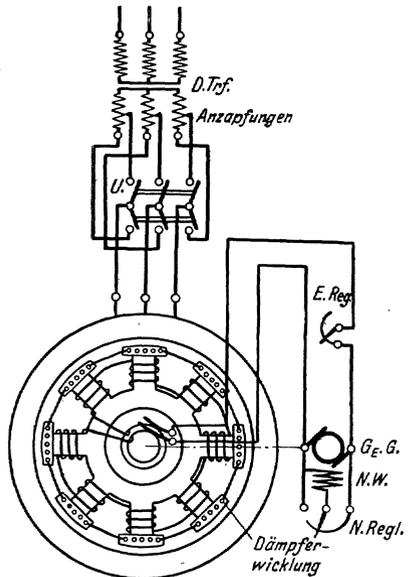


Abb. 145. Schaltbild des Synchronmotors für Selbstanlauf.

Das Schaltbild ist in Abb. 145 dargestellt. Das Anlassen erfolgt, um die Höhe der Anlaßstromstöße zu verringern, wie beim Asynchron-Kurzschlußläufermotor durch Anlegen der Ständerwicklung an eine verminderte Spannung entweder über einen Anlaßtransformator oder über

die entsprechend unterteilte Niederspannungswicklung eines vorhandenen Leistungstransformators, sofern dieser nur für den Motorgenerator bestimmt ist. Je nach Größe des Synchronmotors werden ein oder zwei Anlaßstufen vorgesehen. Dadurch wird der Anlaßstrom herabgesetzt, der dann zwischen dem 1,5- bis 2fachen des Vollaststromes beträgt. Dieser Anlaßstrom ist zudem vorwiegend Blindstrom ($\cos \varphi$ etwa bis 0,2 nacheilend). Durch das im Anker erzeugte Drehfeld werden in der Magnet- und in der Dämpferwicklung Wechselströme induziert. Das Anlaufdrehmoment beträgt etwa 30 vH des Nenndrehmomentes. Zur Vermeidung der beim Anlauf in der Magnetwicklung auftretenden hohen transformatorischen Spannungen ist die Magnetwicklung entweder über die Erregermaschine oder über den Hauptstromregler, falls ein solcher eingebaut ist, kurzzuschließen.

Der Motorgenerator kann auf diese Weise in den Synchronismus laufen und bedarf daher keiner besonderen Synchronisierung. Ist der Synchronismus erreicht, dann wird durch den Umschalter U . auf volle Netzspannung umgeschaltet und der Motorgenerator ist zur Gleichstromerzeugung vorbereitet¹.

Nachteilig ist bei dieser Art des Anlassens, daß die Magnete beim Erreichen des Synchronismus nicht immer ihre richtige Polarität besitzen. Um diese richtige Polarität der Ankerklemmen sicherzustellen, werden die Magnete bei Eigenerrregung während des Anlaufes, bei Fremderregung kurz vor dem Synchronismus schwach erregt (Vorerregung).

2. 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, für diese und zur Erregung des Synchronmotors zur Verfügung steht. Naturgemäß muß die Erregermaschine mit dem Motorgenerator mechanisch verbunden sein. 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 genügend große Akkumulatorenbatterie vorhanden ist.

In Tafel I Abb. I ist das vollständige Schaltbild einer solchen Anordnung dargestellt für eine Anlage mit Akkumulatorenbatterie, Zusatzmaschine für die Ladung und Einfachzellenschalter². 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 Doppelschlußwicklung versehen ist, schließt der Umschalter die Hauptschlußwicklung kurz, und die Erregermaschine arbeitet während des

¹ Böhme, Dr.-Ing. O.: Das Intrittwerfen asynchronanlaufender Synchronmotoren durch Einschaltung der Gleichstromerregung, ETZ 1923, H. 47/48, S. 1034; ferner ETZ 1922, S. 429 und BBC-Mitt. 1922, S. 243.

² Die besondere Erläuterung der Schaltbilder der Tafel I erfolgt auf S. 174 u. f.

Anwerfens nur mit der Nebenschlußwicklung. Mit Hilfe des Anlanners *Anl.* wird die Erregermaschine als Motor in Gang gesetzt. Durch den Erregerregler *E.Reg.* wird der Synchronmotor allmählich auf Spannung gebracht, und die Drehzahl des Maschinensatzes mittels des Nebenschlußreglers der Erregermaschine *N.Reg.* so eingeregelt, daß der Synchronmotor synchron mit dem Netze läuft. Mit Hilfe der in Tafel I eingetragenen Strom- und Spannungsmesser auf den Gleichstromseiten kann man den ordnungsmäßigen Gang des Anlassens leicht und sicher überwachen.

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.

Die Anwurfsleistung, die die Erregermaschine als Motor zu entwickeln hat, ergibt sich aus der Leerlaufsleistung 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 Zahl der Meßgeräte muß sehr reichlich sein, und die Inbetriebsetzung des ganzen Maschinensatzes erfordert besondere Aufmerksamkeit und Geschick. Über das Synchronisieren wird auf S. 175 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 abzufallen bestrebt ist. Nun kann der Gleichstromgenerator *G.G.* erregt werden; dadurch wird der Motor gezwungen, Strom vom Netze aufzunehmen, also mechanische Leistung zu entwickeln.

3. Der Gleichstromgenerator als Anwurfsmotor. Diese Form für das Anlassen benützt den sonst im Betriebe stromliefernden Gleichstromgenerator für die Zeit der Inbetriebsetzung des Maschinensatzes als Motor. Sie findet ebenfalls dann Anwendung, wenn Gleichstrom in der Umformeranlage bereits vorhanden ist. Im Gegensatz zur Form 2. 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 Umformerwerken städtischer Gleichstrom-Elektrizitätswerke, in ausgedehnten Fabriken mit teilweiser Gleichstromversorgung und ähnlichen Betrieben, die für Erweiterungszwecke 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 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.

In Tafel I Abb. II ist das Schaltbild für eine solche Anlage gezeichnet. Es ist bei demselben angenommen worden, daß zwei Gleichstromgeneratoren bereits vorhanden sind, und der Motorgenerator an ein Drehstromnetz von 3000 V anzuschließen ist. Der Motor soll mit dieser Spannung unmittelbar betrieben werden können. Die Gleichstrommaschine *G.G.* erhält ähnlich wie die Erregermaschine in Abb. 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 2. 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. Der Nebenschlußregler *N.Reg.* des Generators *G.G.* des Motorgenerators darf hier nicht mit einem Kurzschlußkontakte versehen sein, 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.

4. Der Anwurf durch einen besonderen Asynchronmotor. Der vierte Fall ist schließlich der, daß kein Gleichstrom vorhanden ist, Tafel I Abb. III. 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 vH von der synchronen nach unten abweicht, kann der Synchronmotor auf diese Art nicht ohne weiteres auf volle synchrone Drehzahl 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 im Netz andere im Betriebe befindliche Synchronmotoren oder Einankerumformer stören bzw. zum „Außertrittfallen“ bringen kann. Die Elektrizitätswerke schreiben in-

folgedessen bei derartigen Anschlußanlagen die höchstzulässigen Stromstöße vor, um einem solchen Übelstande sicher vorzubeugen. Man ist dann gezwungen, um gewöhnliche 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 Drehzahl 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 den im I. Abschnitte angeführten Gründen 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 oder 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 bedeutend kleiner ausfällt. Neben diesen Regelmöglichkeiten kann auch die „Grob synchronisierung“ angewendet werden, die auf S. 195 beschrieben ist und hier nur kurz erwähnt sein soll.

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 aussetzenden Betrieb gewählt werden; er wird infolgedessen kleiner und billiger.

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, um den Gesamtwirkungsgrad des Motorgenerators nicht durch die für den leerlaufenden Anwurfsmotor abzugebende Leistung zu verschlechtern.

e) **Der Gleichstromgenerator.** Da die Wechselstrom- und die Gleichstromseite elektrisch voneinander unabhängig sind, ist der Gleichstromgenerator in seiner Ausführung frei wählbar. Auch betrieblich ist diese Unabhängigkeit von Bedeutung, einmal weil der Synchronmotor stets mit gleichbleibender Drehzahl läuft, die Spannungsregelung auf der Gleichstromseite somit auf Drehzahlschwankungen des Antriebsmotors nicht Rücksicht zu nehmen braucht, und weiter Spannungsschwankungen im Drehstromnetze auf die Gleichstromspannung nicht übertragen werden. Hierin ist der Motorgenerator dem Einankerumformer, dem Kaskadenumformer und auch dem Gleichrichter gegenüber überlegen. Von besonderer Bedeutung ist diese Spannungsunabhängigkeit für die Spannungsregelung auf der Gleichstromseite, die demnach wie bereits gesagt auf drehstromseitige Spannungsschwankungen nicht Rücksicht zu nehmen braucht und in ihrem Regelbereich aus diesem Grunde kleiner ausfällt. Hat der Gleichstromgenerator Nebenschlußwicklung, also bei unverstelltem

Regler mit der Belastung abfallenden Spannungsverlauf, so hat, wenn andere Vorschriften nicht gemacht werden, die Spannungsregelung nur diesen Abfallbereich zu berücksichtigen. Die zweckmäßigsten Grenzen für die Spannungsregelung sind hier nicht schwer zu ermitteln und können lediglich noch eine Spannungserhöhung umfassen, die mit zunehmender Belastung gewünscht wird, um den in den Verteilungsanlagen auftretenden Spannungsverlust zu decken.

Eine gewisse selbsttätige Spannungsregelung wird dem Gleichstromgenerator durch Aufbringen einer Hauptschlußwicklung zur Nebenschlußwicklung gegeben. Der Generator erhält also Doppelschlußwicklung. Das für den Gleichstrom-Doppelschlußmotor Gesagte gilt in umgekehrter Form dann für diesen Generator. Da aber Doppelschlußgeneratoren im Parallelbetriebe untereinander, mit anderen Umformern und auch mit Gleichrichtern Schwierigkeiten zeigen, ist vorher zu untersuchen, ob für einen neu aufzustellenden Motorgenerator die Gleichstrommaschine mit Doppelschlußwicklung ausgerüstet werden darf.

Allgemein ist für die Gleichstrommaschine noch darauf aufmerksam zu machen, daß sie in ihrer Größe nach der höchsten Dauerstromstärke und der höchsten geforderten Spannung — auch unter Berücksichtigung der Regelgrenzen — zu bemessen ist.

Schließlich gestattet die Unabhängigkeit der Gleichstrom- und Wechselstromseite ein umgekehrtes Arbeiten als Gleichstrom-Drehstromumformer ohne jedes betriebliches Bedenken. Nur ist dann auf die drehstromseitige Spannungsregelung zu achten und ein etwa vorhandener Transformator mit entsprechenden Spannungsstufen auszurüsten. Dieser Vorzug wird von keinem anderen Umformer in gleich guter Weise erreicht. Er kann unter Umständen den Ausschlag geben für die Wahl des Synchron-Motorgenerators in allen solchen Fällen, in denen das wechselseitige Arbeiten z. B. von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung ist (gegenseitige Aushilfe, Ausnutzung eines mit Wasserturbinen ausgerüsteten Gleichstromwerkes während der Nacht im Drehstromnetz und ähnliches).

28. Der asynchrone Motorgenerator.

Der asynchrone Motorgenerator wird in einfachster Weise durch die Kupplung zweier gewöhnlicher Maschinen — eines asynchronen Motors mit einem Gleichstromgenerator — hergestellt. Für die mechanische Ausführung des Maschinensatzes ist das zu Anfang dieses Abschnittes Gesagte zu berücksichtigen.

Die weiter unten gekennzeichneten betrieblichen Vorzüge dieses Motorgenerators im allgemeinen konnten seine Verwendung in größerem Umfange jedoch bisher nicht rechtfertigen, weil der Nachteil der Blindstromaufnahme durch den Asynchronmotor wirtschaftlich oftmals als ausschlaggebend angesehen werden mußte. Erst mit der Einführung der im I. Abschnitte behandelten Erregermaschinen hat auch der asynchrone Motorgenerator an Bedeutung zugenommen, da

dann nicht nur der Blindstromverbrauch fortfällt, sondern je nach der Schaltung wie beim Synchronmotor noch zusätzlicher Blindstrom in das speisende Netz geliefert werden kann. Das hat auch bewirkt, daß der Synchron-Motorgenerator heute gegenüber dieser Umformer-gattung zurücktritt.

Das Anlassen eines solchen Motorgenerators macht keine Schwierigkeiten und erfordert keine besondere Vorsicht. Es erfolgt entweder durch Stern-Dreieckschalter, durch Anlaßtransformator oder durch Läuferanlasser je nach den Bedingungen für den Anlaßstromstoß und der Größe des Umformers. Die Zeit für das Anlassen und Zuschalten eines solchen Umformers ist wesentlich kürzer als beim Synchron-Motorgenerator, Einanker- und Kaskadenumformer. Die Schalt- und Meßgeräte sind an Zahl geringer, das Parallelschalten fällt fort. In Tafel II ist ein Schaltbild für derartige Motorgeneratoren gezeichnet. Es ist zu empfehlen, die Darstellungen der Tafel II mit der Tafel I zu vergleichen. Man wird daraus ein recht lehrreiches 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 mit einem Anlaufstrom etwa gleich 30 bis 50 vH des Vollaststromes, Fortfall der besonderen Erregung und des Parallelschaltens, billigerer Preis und geringere Raumbeanspruchung. Ferner ist er dort vorteilhaft, wo es sich darum handelt, großen Stromstößen durch die Anwendung von Schwungmassen, Schlupfreglern usw. zu begegnen. Hierin 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 infolge von Ausgleichströmen wird der Asynchronmotor nicht gestört.

Die geringe Empfindlichkeit bei stark schwankender Primärspannung (Netzspannung) ist noch besonders hervorzuheben. Hinsichtlich eines plötzlichen Kurzschlusses ist der Asynchronmotor dem Synchronmotor gegenüber wesentlich überlegen. Der Stoßkurzschlußstrom klingt rasch ab und wird nach wenigen Perioden also innerhalb des Bruchteiles einer Sekunde Null, da der Dauerkurzschlußstrom des Asynchronmotors Null ist. Bei der Ermittlung des Netz-Dauerkurzschlußstromes bleiben daher Motorgeneratoren mit Asynchronmotoren unberücksichtigt. Angaben über Gewicht, Raumabmessungen, Wirkungsgrade usw. finden sich in Zahlentafel 14. Die Nachteile liegen: in dem schlechteren Gesamtwirkungsgrade, im Verbrauch von Blindstrom aus dem Netze, also Verschlechterung des Leistungsfaktors, sofern keine Erregermaschine benutzt wird. Auch die Stromaufnahme ist gegebenenfalls größer z. B.:

für einen 1000 kW, 3000 V Drehstrom-Synchronmotor bei $\cos \varphi = 1$:

$$I_{s.M.} = \frac{N_n \cdot 1000}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \eta_M} = \frac{1000 \cdot 1000}{3000 \cdot 1,73 \cdot 0,95} = 204 \text{ A,}$$

und für einen gleich großen Asynchronmotor:

$$I_{A.M.} = \frac{N_n \cdot 1000}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \eta_M \cdot \cos \varphi_M} = \frac{1000 \cdot 1000}{3000 \cdot 1,73 \cdot 0,92 \cdot 0,90} = 234 \text{ A},$$

also ist $I_{A.M.}$ etwa 15 vH größer, was bei einer umfangreicheren Anlage wirtschaftlich nicht mehr außer acht gelassen werden darf.

Für den **Gleichstromgenerator** ist Besonderes nicht anzuführen. Lediglich für die Spannungsregelung auf der Gleichstromseite ist darauf aufmerksam zu machen, daß der Asynchronmotor mit der Belastung in der Drehzahl abfällt und der Gleichstromgenerator infolgedessen auch in seiner Spannung. Also muß eine größere Nachregelung vorgenommen werden.

Für den Parallelbetrieb eines Asynchron-Motorgenerators mit einem anderen Umformer ist die Änderung der Belastungskennlinien infolge des drehstromseitigen Drehzahlabfalles mit ansteigender Belastung zu berücksichtigen, damit eine etwa vorgeschriebene Belastungsverteilung auf mehrere Maschinen tatsächlich auch erreichbar ist.

29. Die Schalt- und Meßgeräte.

Schon bei der Behandlung der einzelnen Inbetriebsetzungs- und Regelungsformen und der Synchronisierung sind verschiedentlich die Schalt- und Meßgeräte 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 Hebelschaltern, in Hochspannungsanlagen von selbsttätigen Ölschaltern, Trennschaltern usw. im I. Abschnitte gesagt worden ist. Um indessen die Schaltbilder der Tafel I und Tafel II mit den eingezeichneten Geräten vollständiger zu verstehen, soll noch eine ausführlichere Erklärung derselben gegeben werden.

a) **Der Synchron-Motorgenerator.** (Tafel I Abb. I.) Es handele sich um nur einen Motorgenerator. Erweiterungen in der Gleichstromanlage seien ausgeschlossen. Die zur Verfügung stehende Drehstromspannung soll dem Synchronmotor als Niederspannung unmittelbar zugeführt werden. Die Schaltgeräte an der Schalttafel sind nicht gezeichnet. Der dreipolige Höchststrom-Hauptschalter Sch_{\max} stellt nach der Synchronisierung die Verbindung des Synchronmotors mit dem Netz her. 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 Abb. 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 Einrichtungen hierfür vorzusehen sind, sofern die Grobsynchronisierung nicht zulässig ist.

Um einen Synchronmotor ohne Stromstoß 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, übereinstimmende Frequenz und schließlich Phasengleichheit mit dem Netze.

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 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 zu kennzeichnen. Zur Prüfung bedient man sich am einfachsten 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 kurzgeschlossen. Die Folge davon ist, wenn die Sicherungsvorrichtungen im Kraftwerke oder im Umformerstromkreise nicht sofort den Strom unterbrechen, eine Beschädigung nicht nur des Synchronmotors, sondern auch der Stromerzeuger und somit große Betriebsstörungen.

Die zweite Grundbedingung, daß die Spannungen an den Netzsammelschienen und am Synchronmotor gleich 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 Einregeln des Synchronmotors auf die Netzspannung geschieht mit Hilfe des Erregerreglers *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 Formen, von denen hier nur die einfachste und am häufigsten verwendete kurz erläutert werden soll. Es dienen dazu zwei oder drei Spannungszeiger und bei besonders reichlich mit Meßgeräten ausgestatteten Anlagen noch ein

¹ Ein Drehfeldrichtungsanzeiger ist ein kleines Meßgerät, das nach dem Drehfeldgrundsatz gebaut ist und eine Magnetnadel trägt, die sich je nach dem Anschluß der Phasen links oder rechts dreht.

Doppelfrequenzmesser, die in Niederspannungsanlagen bis 250 V nach Tafel I Abb. I unmittelbar und in Hochspannungsanlagen nach Tafel I Abb. II und III unter Benutzung von Meßwandler (Spannungswandler *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 Meßwandler gestatten infolge der geringen Höhe von Spannung bzw. Strom sekundär das getrennte Anbringen derselben und der Meßgeräte, 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 Meßwandler und Gerät sind dann nur schwache Leitungen einfachster Art zu wählen, deren Querschnitt nach der Eichung der Meßgeräte zu bestimmen ist.

Haben Netz und Maschine gleiche Spannung und übereinstimmende Phase bei gleicher Frequenz, dann sind — im allgemeineren Fall bei Verwendung von Meßwandlern — die Spannungen dieser am Netz- und Maschinenspannungszeiger einander gleich und in gleicher Phase. In einem Augenblicke werden sie, da sie (vgl. Schaltbilder der Tafel I) gegeneinander geschaltet sind, die durch einen Pfeil angedeutete Richtung haben, sich also gegenseitig aufheben. Der mittlere Spannungszeiger — 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 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 Meßgerät 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 Meßwandler 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 Phasen-

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 ist im IV. Bande ausführlicher eingegangen.

zeiger nicht in Ruhe, bzw. die Lampen brennen abwechselnd heller und dunkler. Der Doppelfrequenzmesser¹ gestattet, unmittelbar zu erkennen, wie stark die Frequenzen von Netz und Maschine voneinander abweichen; er gibt in diesem Falle dem Schalttafelwärter an, ob er die Drehzahl des Synchronmotors zu erhöhen oder herabzusetzen hat.

Damit man ferner, auch wenn der Umformer nicht läuft, jederzeit feststellen kann, ob die Spannung drehstromseitig vorhanden ist, ist der Netzspannungszeiger vor dem Hauptschalter abzweigend. Werden die Spannungszeiger nicht mehr benutzt, so sind sie durch den Spannungszeiger-Umschalter *Sp.U.* abzuschalten.

Zur Inbetriebsetzung dieses Motorgenerators soll die Erregermaschine $G_E.G.$ verwendet und der Gleichstrom von der Akkumulatortablette 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. 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 abzweigend, 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 in jedem Pol einen selbsttätig wirkenden Schalter Sch_{max} , der bei Überlastung anspricht. Ist eine Batterie vorhanden, so ist die Gleichstromseite des Motorgenerators noch durch einen Rückstromschalter zu sichern, der im Schaltbilde nicht berücksichtigt ist.

Tafel I Abb. II. Diesem Schaltbilde liegt die Annahme zugrunde, daß der Synchronmotor mit Hochspannung unmittelbar betrieben wird. Demzufolge müssen die Meßgeräte wie Spannungs-, Strom- und Leistungszeiger an Meßwandler (*Str.Trf.* und *Sp.Trf.*) angeschlossen werden. Diese letzteren sind so bemessen, daß von ihnen gleichzeitig mehrere Meßgeräte gespeist werden können. Zur Abtrennung in stromlosem Zustande vom Netz sind vor dem Hauptschalter noch drei einpolige Trennschalter *Tr.* vorhanden.

An Stelle des einpoligen Spannungszeiger-Umschalters für den Gleichstromgenerator der Abb. I sind hier zweipolige Umschalter benutzt, um nach jeder Richtung unabhängig zu sein.

¹ Über Frequenzmesser siehe IV. Band. Die Meßgeräte.

Der Erregerstromkreis des Synchronmotors liegt ohne Sicherungen fest an den Gleichstrom-Sammelschienen. Der doppelpolige Schalter *Sch.* könnte fortfallen, weil der Erregerregler nach dem Stillsetzen des Maschinensatzes die Erregerwicklung kurzschließt, sie also dadurch vom Netze abschaltet. Er dient hier nur dazu, im Bedarfsfalle auch den Erregerregler abzutrennen. 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 Strom aufnehmen und, weil die Kühlung durch das laufende Magnetrad fehlt, allmählich zerstört werden würde. Dieser Schalter ist aber ebenfalls ganz besonders vor unrichtiger Betätigung zu sichern.

Tafel I Abb. III. Bei diesem Schaltbilde ist besonders darauf hinzuweisen, daß der Stromkreis für den Anwurfsmotor zu hohe Spannung hat, und infolgedessen ein Transformator zwischengeschaltet werden muß. Um nun die Schaltgeräte für diesen untergeordneten Teil des Motorgenerators auf das geringste Maß zu beschränken, ist nur ein selbsttätiger Schalter vor dem Transformator eingebaut, der nach der Anlaufzeit ausgeschaltet wird und damit auch den Transformator stillsetzt, also unnötige Leistungsverluste durch den leerlaufenden Transformator vermieden werden. Um auch den Ölschalter und den Transformator des Motors ohne weitere Betriebsstörung des Umformers untersuchen zu können, sind wiederum die Trennmesser *Tr.* vorgesehen.

b) Der asynchrone Motorgenerator. In **Tafel II** ist das vollständige Schaltbild der elektrischen Anlage für ein großes industrielles Unternehmen abgebildet, das ebenfalls ausführlicher besprochen werden soll.

Der elektrische Strom wird aus einem großen Überland-Kraftwerke bezogen. Er steht aus einer Ringleitung als Drehstrom mit einer Spannung von 30000 V zur Verfügung, wird dem Umformerwerk auf dem Fabrikgrundstücke von zwei Seiten zugeführt und je durch einen Transformator auf 3600 Volt herabtransformiert. In der Maschinenhalle sind zur Zeit vier Umformergruppen aufgestellt. Der fertige Ausbau soll fünf Einheiten umfassen, was im Schaltbild dadurch berücksichtigt ist, daß alle fünf Maschinensätze 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 V Spannung und 3000 A liefert. Über die Schaltung der Zuführungsleitungen wird im III. Abschnitt ausführlich gesprochen. Aus diesem Grunde soll hier von einer Erörterung dieses Anlagenteiles abgesehen werden.

An die Hauptsammelschienen sind die asynchronen Motorgeneratoren unter Zwischenschaltung von Trennschaltern *Tr.* und je eines selbsttätigen Höchststromschalters *Sch._{max}* angeschlossen. Die Relais *R.* dieser Schalter sind als unabhängige Höchststrom-Zeitrelais ausgebildet, die bewirken, daß der Schalter erst dann zur Auslösung kommt, wenn der Strom während einer bestimmten, einstellbaren Zeitdauer eine gewisse Höchstgrenze überschreitet. Mit Rücksicht auf die verhältnis-

mäßig hohe Spannung sind diese Relais an Meßwandler 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 Meßwandlern versehen.

Die Gleichstromgeneratoren erhalten ebenfalls je einen Stromzeiger *Str.Z.*, der hier der großen Stromstärken wegen an einen geeichten Nebenschluß *N.str.* angeschlossen ist. Dadurch wird die umständliche und kostspielige Heranführung der Gleichstromkabel oder Kupferschienen aus dem Schalttraume 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 Schalter eingebaut, *Sch.max* um zu verhindern, daß Überlastungen die Maschinen gefährden, *Sch.min* um bei starkem Spannungsrückgange oder Ausbleiben der Drehstromspannung die Generatoren selbsttätig abzuschalten.

Von den Gleichstrom-Hauptsammelschienen zweigen die einzelnen Stromkreise für die Beleuchtung, für die elektrochemischen Einrichtungen 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 Betriebsführung je ein schreibender 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 Gleichstromaushilfe für Beleuchtungszwecke, im Falle der Drehstrom einmal vollständig ausbleiben sollte; 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 nicht sämtliche 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 in den Arbeits-

räumen verteilt stehen und durch unkundige Leute bedient werden müssen, schließlich auch der geringeren Leistungen wegen muß die Spannung von 3600 V mittels eines Transformators weiter herabgesetzt werden, und zwar sind hier als Unterspannung 220 V gewählt. Hoch- und niederspannungsseitig sind Schmelzsicherung für diesen Transformator sowie einfache Schalter vorhanden. Strom- und Spannungszeiger auf der 220-V-Seite, die ohne Meßwandler benutzbar sind, geben über das Arbeiten des Transformators Aufschluß.

Die Drehstrommotoren erhalten wegen der geringen Spannung einfache Sicherungen und Hebelschalter 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-Sammelshienen unter Spannung stehen, ist noch ein Haupt-Spannungszeiger vorgesehen, der naturgemäß wiederum an einen Meßwandler angeschlossen ist.

E. Der Einankerumformer.

30. Der Einankerumformer im allgemeinen.

Unter diesem Umformer ist eine Maschine zu verstehen, die, wie schon der Name sagt, nur mit einem Anker ausgerüstet ist.

Versieht man den Anker einer Gleichstrommaschine mit einer un-aufgeschnittenen Gleichstromwicklung, zapft diese Wicklung z. B. an

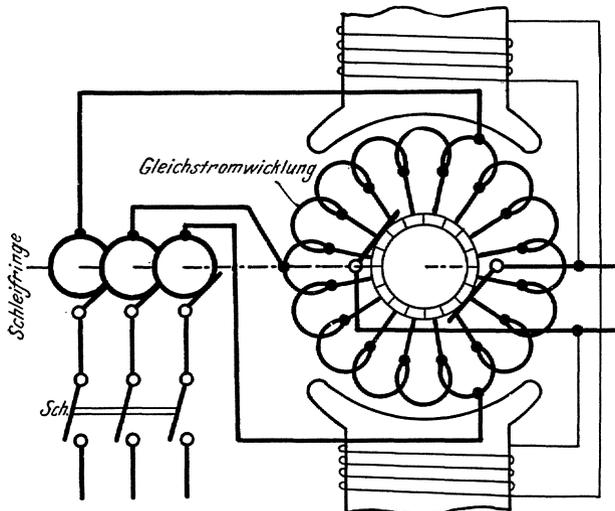


Abb. 146. Schaltbild des Einankerumformers.

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. Verfäht 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

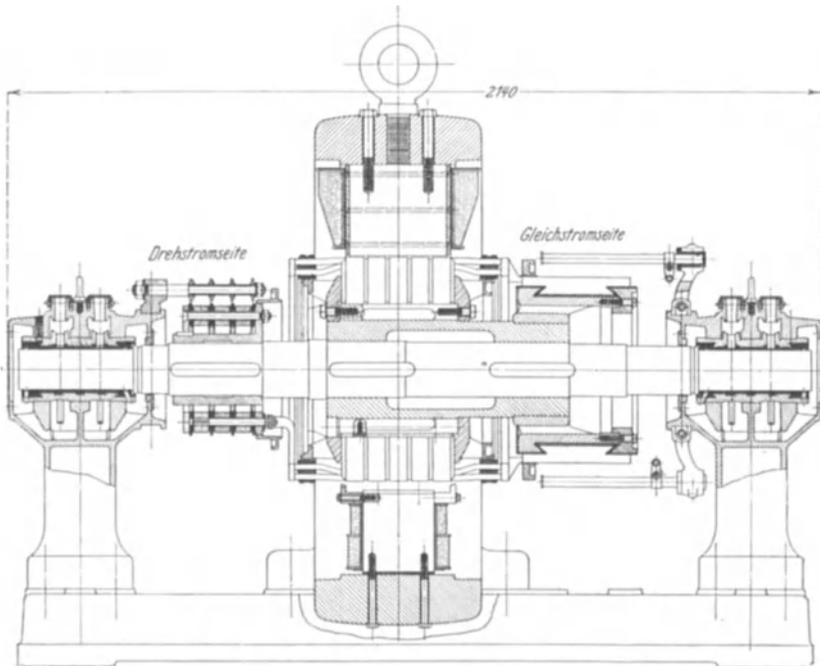


Abb. 147. Schnitt durch einen Einankerumformer.

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 Abb. 146 ist der Stromlauf der Maschine und in Abb. 147 ein solcher Umformer im Schnitt gezeichnet.

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 nach den Angaben in der Einleitung zu diesem Abschnitte stark dafür bestimmend sein wird, sich eines solchen Einankerumformers

zu bedienen. Dazu kommen noch die später besprochenen weiteren Vorzüge. Allerdings muß auch hier ganz besonders darauf aufmerksam gemacht werden, daß die Bedingungen elektrischer und betrieblicher Art, unter denen der Einankerumformer zu arbeiten hat, heute bei der Auswahl unbedingt in den Vordergrund gestellt werden müssen.

Aus dem Schaltbilde der Maschine Abb. 146 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 Abhängigkeitsverhältnisse zueinander stehen müssen, weil nur eine Erregung und eine Ankerwicklung vorhanden sind. Ohne auf besondere theoretische Erörterungen¹ einzugehen, ergibt sich dieses Spannungsverhältnis, wenn mit U_w die Wechselstromspannung, mit U_G die Gleichstromspannung und mit u das Übersetzungsverhältnis beider bezeichnet wird:

$$u = \frac{U_w}{U_G}, \quad U_w = u \cdot U_G, \quad (101)$$

bzw. für die verschiedenen praktisch vorkommenden Fälle berechnet bei Leerlauf und $\cos \varphi = 1$:

Zahlentafel 7.

$$\begin{aligned} U_w &= 0,72 \cdot U_G && \text{bei Einphasenstrom} \\ U_w &= 0,62 \cdot U_G && \text{bei Drehstrom} \\ U_w &= 0,354 \cdot U_G && \text{bei Sechspannenstrom} \end{aligned}$$

unter der Voraussetzung sinusförmigen Verlaufes der Wechselstromspannungskennlinie. Der Spannungsabfall im Umformer zwischen Leerlauf und Vollast beträgt einschl. Transformator etwa 4 bis 6 vH. Die Gleichstromspannung ist also stets größer als die Wechselstromspannung. Wenn man demnach Drehstrom in Gleichstrom von 220 V umformen will, so muß die Drehstromspannung $0,62 \cdot 220 = 136$ V betragen. Da aber Drehstrom sowohl in der einen wie in der anderen Richtung der Umformung mit dieser niedrigen und genau einzuhaltenen Spannung in der Mehrzahl der Fälle nicht vorteilhaft ist, muß auf der Drehstromseite ein Transformator eingeschaltet werden.

Der dem Anker über die Schleifringe zugeführte Ein- oder Mehrphasenstrom (die Wirkkomponente) — 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 verbleibende 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

¹ Siehe Arnold, E.: Die Wechselstromtechnik Bd. 3 u. 4.

Wechselstromes ist, weil dann die Kupferverluste im Anker verringert werden. 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 nicht zu ändern, denn die Auflösung der Verkettung wird nur auf der Unterspannungsseite des Transformators vorgenommen.

Auch die Verhältnisse zwischen zugeführtem und abgenommenem Strome stehen in einer bestimmten Abhängigkeit, und zwar ist bei Vollast und $\cos \varphi = 1$ nach Zahlentafel 8:

Zahlentafel 8.

$$\begin{aligned} I_W &= 1,41 \cdot I_G && \text{bei dem Einphasenumformer} \\ I_W &= 0,94 \cdot I_G && \text{,, ,, Dreiphasenumformer} \\ I_W &= 0,47 \cdot I_G && \text{,, ,, Sechspfasenumformer} \end{aligned}$$

Diese Werte stellen indessen nur die dem entnommenen Gleichstromen entsprechenden Komponenten des Wechselstromes dar; sie erhöhen sich durch den Leerlaufstrom des Umformers, und ferner 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 Zahlentafel 9.

Zahlentafel 9.

Reine Gleichstromleistung	$= N_G$
Leistung als Einphasenumformer	$0,85 \cdot N_G$
„ „ Dreiphasenumformer	$1,34 \cdot N_G$
„ „ Sechspfasenumformer	$1,96 \cdot N_G$

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. Weicht der Leistungsfaktor vom Werte 1 ab, so steigen die Ankerverluste sehr rasch an, weil der Stromausgleich im Anker ungünstiger wird. Das ist beim Vergleich mit anderen Umformergattungen zu beachten. Daher soll der Betrieb des Einankerumformers möglichst stets mit $\cos \varphi = 1$ erfolgen.

Die Drehzahl der Maschine ist durch Netzfrequenz und Polzahl wie beim Synchronmotor als „synchron“ bestimmt, wie überhaupt die besonderen elektrischen Eigenschaften der Synchronmaschine auch für den Einankerumformer gelten.

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 Leistungsverluste noch weiter herabzumindern und dadurch den Wirkungsgrad zu erhöhen, ist heute selbstverständlich. Zur Erzielung eines funkenfreien Laufes werden Wendepole benutzt, die es gleichzeitig ermöglichen, den Einankerumformer für verhältnismäßig hohe Drehzahlen zu bauen. Handelt es sich ferner um hohe Gleichstromspannungen (über 1000 V), so kann der Anker mit zwei Wicklungen und zwei hintereinander geschalteten Kommutatoren versehen werden, oder es werden zwei Umformer für je die halbe Spannung hintereinander geschaltet.

Der Gesamtwirkungsgrad eines Einankerumformers ist 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 mechanische und dann zurück in elektrische Energie wie beim Motorgenerator also vermieden ist, und, wie bereits gesagt, die Verluste kleiner ausfallen als beim Motorgenerator. Es ist daher für die Wahl zwischen diesen beiden Umformern allein 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 Zahlentafeln 10, 11 und 14 sind die Wirkungsgrade, Gewichte und Abmessungen für synchrone und asynchrone Motorgeneratoren und Einankerumformer zusammengestellt; sie lassen die Vorzüge des Einankerumformers in den zum Vergleiche stehenden Punkten deutlich erkennen.

Auf die elektrischen Verhältnisse hat schließlich die Frequenz des Stromes besonderen Einfluß insofern, als der Wirkungsgrad bei kleiner Frequenz steigt. Aus der Zahlentafel 11 ist dieses ohne weiteres

Zahlentafel 10.

Wirkungsgradvergleich für Motorgenerator und Einankerumformer.

Motorgenerator bestehend aus: Drehstrom-Synchronmotor, 3000 V, Frequenz 50, Gleichstrom-Nebenschluß- generator, 300 kW, 220 V, Drehzahl 500 i. d. Min., Zweilagerbau	Drehstrom-Gleichstrom-Einanker- umformer mit Transformator, Sechs- phasenschaltung, Drehstrom, 3000 134 V, Frequenz 50, Gleichstrom, 300 kW, 220 V, Drehzahl 500 i. d. Min.
--	---

Wirkungsgrade in vH

Be- lastung	η_M	η_G	η_V	Be- lastung	η_{Tf}	η_{EV}	η_V
1/4	86,0	84,5	72,67	1/4	95,4	87,0	82,99
1/2	92,5	89,0	82,31	1/2	96,8	92,2	89,25
3/4	94,0	91,5	86,01	3/4	97,3	93,5	90,98
4/4	94,5	92,5	87,41	4/4	97,53	94,0	91,68

η_M Wirkungsgrad des Motors,
 η_G „ „ Generators,
 η_{Tf} „ „ Transformators,
 η_{EV} „ „ Einankerumformers,
 η_V „ „ der gesamten Umformung.

ersichtlich. Dem höheren Wirkungsgrade bei niedriger Frequenz steht der Nachteil gegenüber, daß die Abmessungen und damit das Gewicht der Maschine ungünstiger ausfallen (Zahlentafel 11).

Zahlentafel 11¹.

Wirkungsgrade, Gewichte und Bodenflächen von 25 und 60 Perioden Drehstrom-Gleichstromumformern mit einem Spannungsbereiche von 240 bis 300 V bei einer mittleren Gleichstromspannung von 275 V.

Leistung in kW	Belastung	Bei 25 Perioden ²			Bei 60 Perioden ²		
		I. Synchronmotor unmittelbar gekuppelt mit Gleichstrom-generator	II. Asynchronmotor unmittelbar gekuppelt mit Gleichstrom-generator	III. Einankerumformer	I. Synchronmotor unmittelbar gekuppelt mit Gleichstrom-generator	II. Asynchronmotor unmittelbar gekuppelt mit Gleichstrom-generator	III. Einankerumformer
Wirkungsgrade in vH (vH)							
300	4/4	84	+ 2,4	+ 6,5	86,75	- 1,4	+ 2,2
	3/4	82,25	+ 2,1	+ 7,6	85	- 2,0	+ 2,1
	1/2	77	+ 4,0	+ 12,3	81,75	- 2,7	+ 1,0
500	4/4	85,5	+ 2,3	+ 6,1	87,75	- 8,5	+ 1,4
	3/4	83,75	+ 2,1	+ 7,7	86	- 1,1	+ 1,2
	1/2	79,5	+ 3,8	+ 11,0	83	- 2,7	+ 0
1000	4/4	87,5	+ 0,3	+ 4,8	87,75	- 0,3	—
	3/4	86	+ 0,6	+ 5,2	86	- 0,6	—
	1/4	82,25	+ 1,7	+ 9,4	83	- 0,8	—
2000	4/4	88,25	+ 0,6	+ 4,5	88,5	- 0,3	—
	3/4	86,75	+ 0,3	+ 5,7	86,5	- 0,3	—
	1/2	82,75	+ 2,4	+ 9,3	83	- 0,3	—
Gewichte in kg (vH)							
300	—	22700	- 2,0	- 36,0	21800	- 2,0	—
500	—	31000	- 4,4	- 30,0	29600	- 4,6	- 16,7
1000	—	44500	- 6,1	- 5,0	41800	- 3,3	- 15,4
2000	—	98000	- 7,0	- 2,3	96400	- 1,4	—
Bodenflächen in m ² (vH)							
300	—	7,44		+ 13,7	6,23		—
500	—	1,35	wie	+ 8,3	10,23	wie	+ 43,0
1000	—	12,65	bei I	+ 25,0	13,03	bei I	+ 36,0
2000	—	41,00		+ 8,4	40,46		—

¹ Siehe auch Zahlentafel 14.

² Für I und II Gesamtwirkungsgrad von Motor und Gleichstromgenerator mit Wendepolen. Bei Synchronmotorgeneratoren ist ein Motor gewählt, der mit 80 vH Phasenvoreilung betrieben werden kann, um 60 vH seiner Leistung für die Phasenregelung verwenden zu können. In die Polschuhe der mit 125 V erregten Felder ist zum leichteren Anlassen und zur Dämpfung eine Dämpfer-Kupferstabwicklung eingefügt. Die Asynchronmotoren haben Schleifringläufer ohne Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung. Für III Gesamtwirkungsgrad von Drehstromtransformator und Umformer einschließlich Verlusten in den Verbindungskabeln zwischen beiden.

31. Die Erregung und die Spannungsregelung.

a) Die Erregung. Für die folgenden Betrachtungen soll wegen des leichteren Verständnisses davon ausgegangen werden, daß der Einankerumformer als Drehstrom-Gleichstrom-Umformer arbeitet, weil diese Form am häufigsten anzutreffen ist. Eine sinngemäße Übertragung der Verhältnisse auf die anderen Arbeitsmöglichkeiten des Umformers wird dann nicht schwer sein.

Der Kraftfluß Φ der Magnete ist, wie das Schaltbild Abb. 146 erkennen läßt, für die beiden im Anker des Umformers induzierten EMKE gemeinsam und gleich. Der Strom für die Erregung wird der Gleichstromseite entnommen; 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:

$$U_G = \frac{U_W}{u}$$

oder:

$$U_W = u \cdot U_G.$$

Hieraus sieht man, daß die Gleichstromspannung, da $u = \text{const}$, abhängig ist von der Drehstromspannung und nicht durch 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; es soll vielmehr nur darauf hingewiesen werden, daß durch Änderung der Erregung lediglich die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung auf der Wechselstromseite beeinflußt werden kann, weil der Blindstrom, 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), bei starker Erregung eilt er der Spannung vor (Phasenvoreilung). Es gibt infolgedessen eine bestimmte Erregung, bei welcher Phasengleichheit besteht, der Leistungsfaktor also $\cos \varphi = 1$ ist. Der Einankerumformer gestattet somit gleich dem Synchronmotor eine Regelung der Phasenverschiebung. Er kann auch zur Phasenreglung für das ganze Drehstromnetz, d. h. zur Lieferung von Blindstrom benutzt werden, indessen mit einer Einschränkung, auf die noch besonders hingewiesen werden wird (S. 201).

Die Erregung ist im Betriebe an den Umformer grundsätzlich unmittelbar anzuschließen, damit sie beim Ansprechen der Gleichstrom-Überstromsicherung (Selbstschalter oder Sicherungen) nicht unterbrochen wird. Eine Abweichung hiervon tritt beim gleichstromseitigen Anlassen des Umformers ein, worauf auf S. 195 näher eingegangen wird.

b) Die Spannungsregelung mittels Drosselspulen und Streutransformatoren. Da Wechselstrom- und Gleichstromspannung in einem bestimmten festen Verhältnisse zueinander stehen, ist bei unveränderlicher Wechselstromspannung eine Regelung der Gleichstrom-

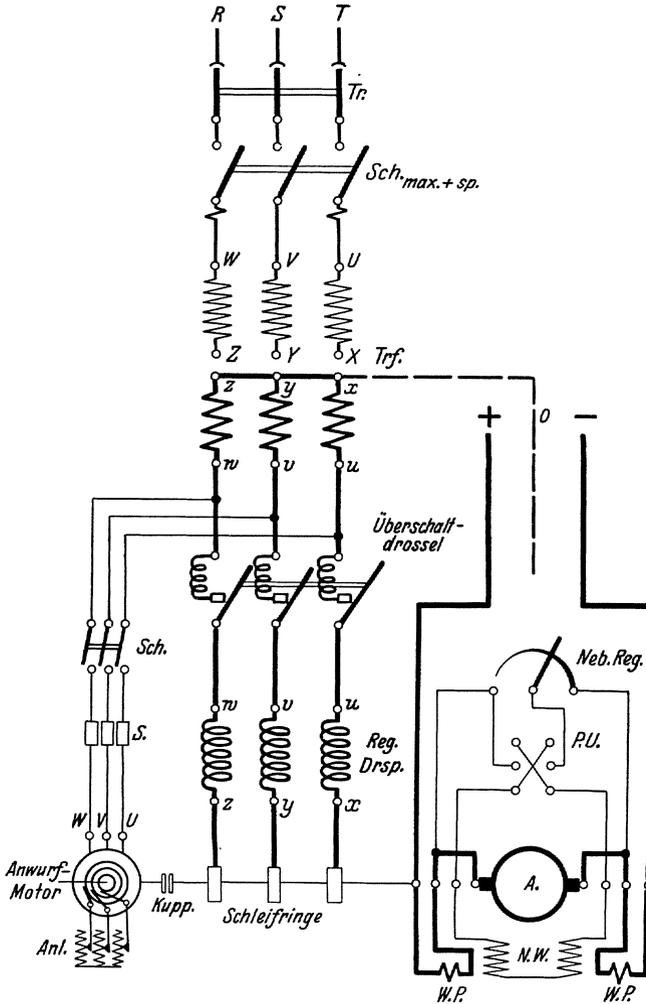


Abb. 148. Einankerumformer mit Drosselspulen-Spannungsregelung und Anlassen durch gleichpoligen Anwurfmotor, Einschalten über Überschalt-drosselspule.

spannung nicht ohne weiteres möglich. Hierin liegt ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen Einankerumformer und Motorgenerator, denn der Hauptvorteil des letzteren besteht darin, daß die Spannung der Gleichstromseite vollständig unabhängig von derjenigen der Wechselstromseite ist, und auch unab-

hängig von der Belastung in gleicher Weise gleichstromseitig wie bei jedem gewöhnlichen Generator und in weiten Grenzen geregelt werden kann.

Um die Spannung z. B. auf der Gleichstromseite des Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformers ändern zu können, muß man sich daher besonderer Hilfsmittel und zwar entweder auf der Wechselstrom- oder auf der Gleichstromseite bedienen.

Schaltet man zwischen die Unterspannungsklemmen des Transformators und die Schleifringe Drosselspulen *Reg.Drsp.* Abb. 148, so kann durch diese Anordnung schon eine für viele Fälle ausreichende

Regelfähigkeit erzielt werden. Das beruht auf folgender Erscheinung:

Die Spannung an den Schleifringen des Einankerumformers ist die Resultante aus der gleichbleibenden Spannung an den Unterspannungsklemmen des Transformators E_2 und dem Spannungsabfall in der Drosselspule e_{Dsp} (Abb. 149). Der phasenvoreilende Strom hat eine Spannungserhöhung und der phasennacheilende Strom eine Spannungserniedrigung durch die Drosselspule zur Folge und zwar, weil die Spannung derselben in Übereinstimmung steht mit dem den Schleifringen zugeführten Strome und, wie als bekannt vorausgesetzt werden muß, annähernd senkrecht auf dem Stromvektor steht. Ist der

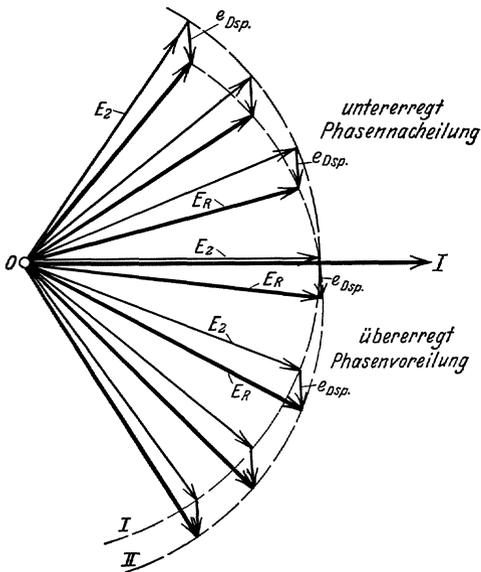


Abb. 149. Spannungsverhältnisse bei Drosselspulenregelung.

Strom in Phase mit der Netzspannung bzw. der Unterspannung des Transformators, tritt also keine Phasenverschiebung auf, so 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 Strome und 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 Spannung kann in einfacher Weise durch Änderung der Erregung, also durch Verstellen des Nebenschlußreglers hervorgerufen werden. Je nachdem man die Erregung verstärkt oder schwächt, wirkt man auf die Phasenstellung zwischen dem den Schleifringen zugeführten Strome und der Transformator-

spannung ein; man kann dadurch ein Vor- bzw. Nacheilen erzielen, d. h. also die den Schleifringen zugeführte Spannung und infolgedessen auch die Gleichstromspannung trotz unveränderter Netzspannung auf der Drehstromseite in gewissen Grenzen ändern. Aus Abb. 149 ist zu ersehen, daß bei einer gegebenen Transformatorspannung E_2 und einem durch Größe der Drosselspule und Belastungszustand des Umformers gegebenen Drosselspulen-Spannungsabfall e_{Dsp} eine bestimmte Schleifringspannung E_R nur bei einem ganz bestimmten Phasenwinkel erreicht werden kann. Daraus folgt, daß eine unabhängige Einstellung von Spannung und Leistungsfaktor bei der Drosselspulenregelung nicht möglich ist. Die Regelung der Spannung auf der Gleichstromseite ist auf diese Weise bis zu etwa ± 10 vH möglich. Darüber hinauszugehen, hat sich nicht als praktisch und wirtschaftlich 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. Zumeist wird sie derart berechnet, daß bei Vollast und höchster Gleichstromspannung der Leistungsfaktor auf der Primärseite des Transformators etwa $= 1$ ist. Der Umformer arbeitet dann übererregt mit Phasenvoreilung und deckt gleichzeitig den Blindstromverbrauch des Transformators selbst und der Drosselspule. Bei Teillast muß dann allerdings mit nacheilendem Leistungsfaktor gerechnet werden. Dem Auslegen der Maschine und Drosselspule sind daher möglichst genaue Daten für die Betriebsführung zugrunde zu legen.

Versieht man die Magnete des Umformers für diese Spannungsänderung noch mit einer besonderen Hauptschlußwicklung, so kann man dem Einankerumformer damit die Eigenschaften einer kompondierten oder auch einer überkompondierten Gleichstrommaschine (Doppelschlußmaschine) geben, was für manche Zwecke z. B. für den Bahnbetrieb oder in anderen Betrieben, in denen plötzliche stoßweise Überlastungen auftreten, von großer Bedeutung ist. Auch ein einwandfreier Parallelbetrieb mit einer Pufferbatterie läßt sich erzielen.

Eine ähnliche Wirkung wie durch die Drosselspule erreicht man durch stark streuende Transformatoren. Die Regelungsgrenze liegt hier ungefähr bei ± 3 vH. Diese Ausführung kann unter Umständen recht beachtliche preisliche Vorteile bieten.

Diese beiden Arten der Spannungsregelung haben allerdings den großen Nachteil, daß sie bei kleiner Spannung mit Benutzung von Blindstrom vor sich gehen, die neben der Erhöhung der Verluste im Umformeranker und der Verschlechterung des Leistungsfaktors des Netzes auch auf das Pendeln der Maschine einen ungünstigen Einfluß hat. Sie sind zudem nur bis zu mittleren Leistungen anwendbar. Auf die geringere Belastungsfähigkeit des Umformers sei nochmals besonders hingewiesen.

c) Die Spannungsregelung durch Änderung der Transformatorunter-
spannung. Soll die Gleichstrom-Spannungsänderung in noch weiteren
als den mittels Drosselspulen oder Streutransformatoren erreichbaren
Grenzen möglich sein, dann muß man dazu übergehen, die Dreh-
stromspannung auf der Sekundärseite des Transformators
zu ändern. Das kann einmal in der Weise geschehen, daß man die
Unterspannungsseite des Transformators stufenweise un-
terteilt (Abb. 150), oder man schaltet zwischen Transformator und

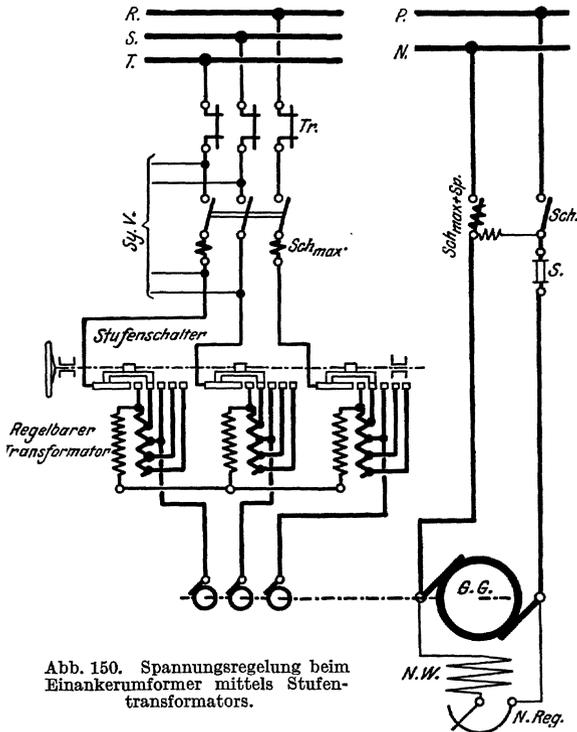


Abb. 150. Spannungsregelung beim Einankerumformer mittels Stufen-
transformators.

Schleifringe einen dreh-
baren Zusatztrans-
formator (Drehtrans-
formator Abb. 151).

Das Zu- bzw. Ab-
schalten der einzelnen
Windungsstufen des
Stufentransformators
erfolgt mit Hilfe eines
Stufen- oder Windungs-
schalters, ähnlich wie er
auf S. 82 bei dem An-
laßtransformator für
einen asynchronen Dreh-
strommotor beschrieben
worden ist¹. Mit diesem
Stufenschalter kann die
dem Umformer zuge-
führte Spannung nur in
größeren Stufen und
sprungweise geändert
werden, und das über-
trägt sich naturgemäß
auch auf die Gleich-
stromspannung. Sind
die Abstufungen bzw.
die Spannungssprünge

auf der Gleichstromseite zu grob, dann ist eine feinere Regelung
noch dadurch möglich, daß man wiederum Drosselspulen benutzt und
dann die Erregung ändert.

Wenn auch diese Regelart die Benutzung von Blindstrom
vermeidet, sofern die Drosselspulen in Fortfall kommen, so hat sie
aber andere Nachteile darin, daß die Spannungsänderung
nicht schnell erfolgen kann, wenn nicht noch ein beson-
derer, durch Relais gesteuerter motorischer Antrieb des
Stufenschalters vorhanden ist. Weiter wird die Gefahr der
Betriebsstörung durch das Pendeln in gleicher Weise er-
höht wie bei der Verwendung von Drosselspulen.

¹ Über diesen Stufenschalter in Verbindung mit dem Transformator siehe
auch S. 385 u. f.

Soll die Spannungsregelung gleichmäßig möglich sein, dann tritt an Stelle des Stufentransformators ohne oder mit Drosselspulen vorteilhafter ein Drehtransformator. Über den Aufbau und die Arbeitsweise eines solchen Transformators ist im III. Abschnitte (S. 392) alles Wissenswerte gesagt. Ein Schaltbild ist der Vollständigkeit wegen in Abb. 151 gezeichnet. Mit Hilfe eines solchen Drehtransformators ist eine sehr feinstufige Spannungsänderung bis zu etwa ± 25 vH

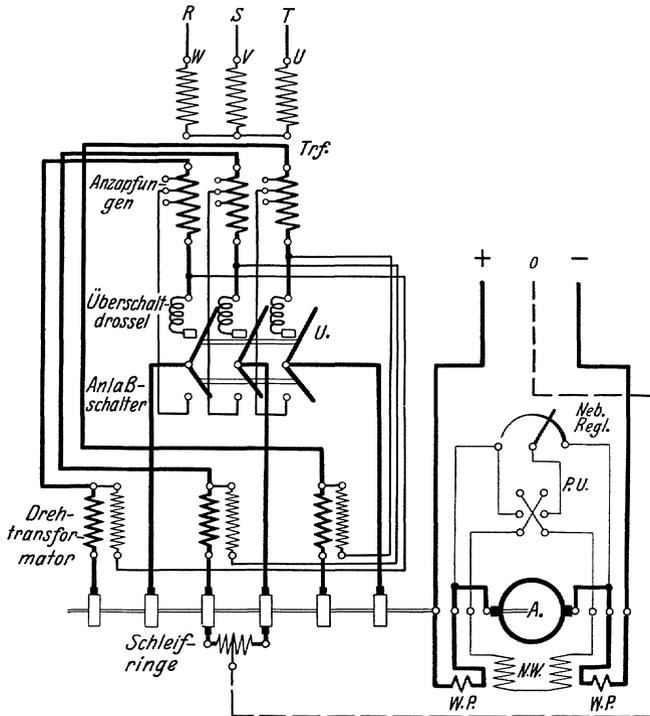


Abb. 151. Einankerumformer mit Drehtransformator-Spannungsregelung, asynchronem Anlauf und Einschalten über Überschalt-drosselspule.

um einen Mittelwert erzielbar. Im Gegensatz zur Drosselspulenregelung sind bei dieser Form Spannung und Leistungsfaktor unabhängig voneinander durch Verstellen des Drehtransformators bzw. des Nebenschlußreglers einstellbar.

Andere Spannungsregelrichtungen, wie z. B. durch besondere Zusatzmaschinen, haben sich nicht eingeführt und sollen daher nicht weiter behandelt werden.

32. 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. Da dieser Umformer ganz allgemein zur Umwandlung von vorhandenem Wechselstrom in Gleichstrom für die Wechselstromseite die Gleichstromerregung nötig hat, besitzt er vollständig die Eigenschaften eines Synchronmotors. Er muß nicht nur — abgesehen von besonderen Schaltungen — 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.

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 Anlaßformen, verfährt vielmehr nach der bereits auf S. 167 geschilderten einfachsten Weise, indem man den Umformer von der Drehstromseite mit Hilfe des auf der Unterspannungsseite unterteilten Transformators und eines einfachen Umschalters anläßt. Auch in Deutschland hat man sich mehr und mehr zu dieser Anlaßform entschlossen; sie soll infolgedessen in Erweiterung des auf S. 167 Gesagten etwas eingehender besprochen werden.

Der Umformer läuft als asynchrone Maschine an, indem die Dämpferwicklung die Aufgabe des Käfigankers bei einem Kurzschlußläufermotor übernimmt. Der Anlauf erfolgt selbsttätig, sobald die Drehstromseite Spannung erhält. Das besondere Synchronisieren wird nicht mehr vorgenommen, der Umformer springt vielmehr von selbst mit einem Stromstoß in den Synchronismus. Dieser Stromstoß beträgt bei $\frac{1}{3}$ Drehstromspannung etwa das 1,0 bis 2fache des Vollaststromes. In Abb. 152 a ist ein Schaltbild gezeichnet. Der Transformator erhält zumeist nur eine, höchstens zwei Anlaßstufen, und zwar ungefähr bei $\frac{1}{3}$ bzw. $\frac{1}{4}$ der Betriebsspannung. In Abb. 152 hat er nur eine Stufe bei 25 vH der Betriebsspannung. Dabei wird bei Fremderregung von vornherein der Vollast-Erregerstrom bei $\cos \varphi = 1$ eingestellt, bei Selbsterregung der Magnetregler auf die Stellung gebracht, die er bei normalem Lauf und $\cos \varphi = 1$ einnimmt. Da es sich in der Regel um Spannungen drehstromseitig von höchstens 300 bis 400 Volt handelt, wird als Anlasser ein besonders durchgebildeter dreipoliger Hebelumschalter U . benutzt. Der Anlasser bleibt auf dieser Stufe stehen, bis der Umformer die synchrone Drehzahl erreicht hat. Dann erfolgt das Umschalten auf die volle Transformatorspannung. Es treten dabei unter Umständen aber recht erhebliche Spannungen an den Schenkelwicklungen auf, und auch der Stromstoß beim Anlassen ist recht bedeutend. Der Anlaufstrom kann, wie bereits gesagt, auf den ein- bis zweifachen Wert der Vollast-

stromstärke anwachsen, und da derselbe nur Blindstrom ist (Leistungsfaktor etwa 0,2 oder darunter), so kann der durch ihn hervorgerufene Spannungsabfall im Netze andere Synchronmotoren oder Einankerumformer zum Außertrittfall bringen.

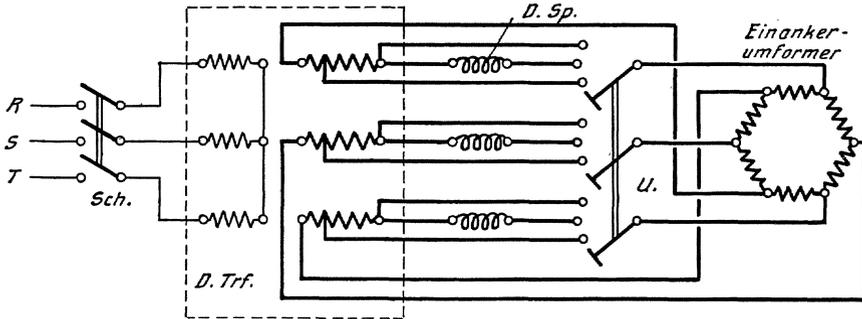


Abb. 152a. Schaltbild für den Selbstanlauf des Einankerumformers.

Brown, Boveri & Cie. schalten daher während des Umschaltens eine kleine Drosselspule *D.Sp.* ein (Abb. 152a). Die günstige Wirkung

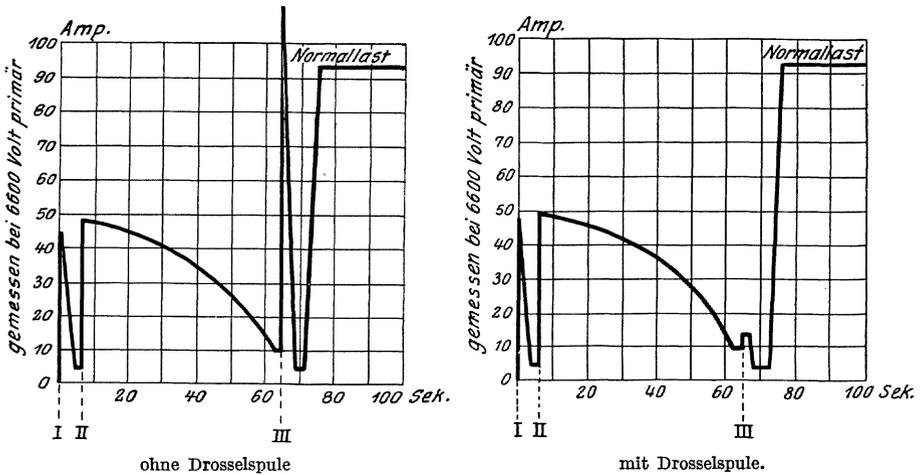


Abb. 152b. Kennlinien für den Selbstanlauf des Einankerumformers.

dieser Dämpfungsdrosselspule ist aus dem Vergleich der Schaulinien in Abb. 152b ersichtlich.

Die Schaulinien wurden an einem 1000 kVA Einankerumformer von 750 Umdrehungen aufgenommen. Die Messungen erfolgten auf der Hochspannungsseite des Transformators und zwar das erstemal ohne, das zweitemal mit Vorschaltung einer Drosselspule.

In Punkt *I* wird der Hauptschalter *Sch.* geschlossen und damit der Transformator *D.Trf.* eingeschaltet. In Punkt *II* wird der Umschalter *U.* auf die Anlaufstellung gebracht. Nach 20 bis 60 Sekunden, je nach

der Größe und Drehzahl des Einankerumformers, ist derselbe auf synchroner Drehzahl angelangt. Er wird nun im Punkt *III* umgeschaltet, wobei zuerst die Drosselspule *D.Sp.* und dann die volle Transformatorwicklung eingeschaltet wird. In der Betriebsstellung selbst ist die Drosselspule kurzgeschlossen. Wie aus Abb. 152 b ersichtlich, geht die Umschaltung von der Anlauf- auf die volle Transformatorspannung fast stromlos vor sich. Die Polarität wird bereits auf der Anlaufstellung, nachdem der Umformer die volle Drehzahl erreicht

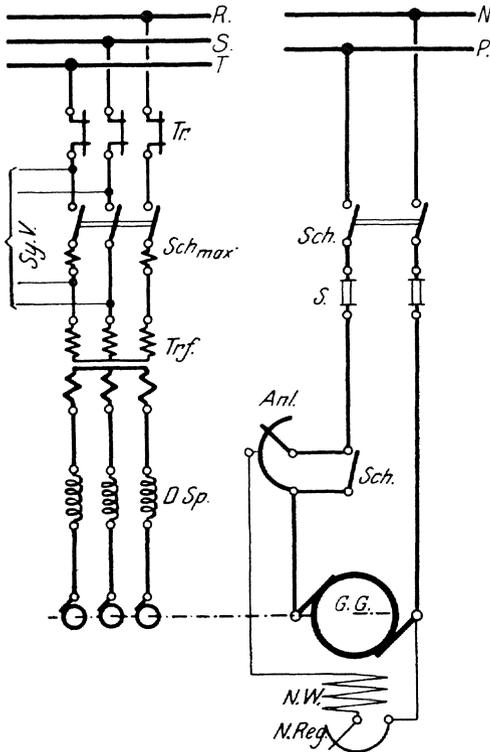


Abb. 153. Anlassen des Einankerumformers von der Gleichstromseite, besonderes Synchronisieren.

Gleichstromseite des Umformers Strom und läßt ihn als Gleichstrommotor laufen. Es muß infolgedessen auf der Gleichstromseite noch ein Anlasser *Anl.* eingebaut werden, der nach Beendigung der Anlaufzeit durch den Schalter *Sch.* Abb. 153 kurzgeschlossen wird. Der Anlaufstrom beträgt in den ersten Sekunden etwa 20 bis 25 vH des Vollaststromes. Werden beim Anwerfen die Schleifringe des Einankerumformers nicht abgeschaltet, weil der Transformator nur hochspannungsseitig vom Netz abtrennbar ist, dann fließt im Augenblicke des Einschaltens Gleichstrom durch den Transformator, der auch über den Anlasser geht. Infolgedessen ist der Anlasser reichlicher als der Anlaßleistung

hat, geprüft. Ist die Polarität nicht richtig, so wird der Hauptschalter *Sch.* ausgeschaltet und nach ein bis zwei Sekunden wieder eingeschaltet. Das Umpolarisieren erfolgt auf diese Weise schnell und sicher. Der Umschalter ist ohne Rücksicht auf den Anlaufstrom nur für den Betriebsstrom zu bemessen. Dieses Anlaßverfahren kann für Umformer bis 6000 A Gleichstrom benutzt werden.

Ist ein spannungsführendes Gleichstromnetz vorhanden z. B. in einer Anlage mit Akkumulatortabletten, oder arbeitet der Umformer mit anderen Umformern bzw. mit vorhandenen Gleichstromgeneratoren parallel, dann wird das Anlassen am einfachsten von der Gleichstromseite aus vorgenommen. Zu diesem Zwecke gibt man von dem vorhandenen Gleichstromnetz auf die

entsprechend zu wählen. 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 gleich sein, und die Spannungen und Phasen beider müssen übereinstimmen. Auch die für das drehstromseitige Parallelschalten notwendigen Meßgeräte 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-Drehstromumformer läuft, ist seine Drehzahl 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.

Die Erregung des Umformers muß für die Zeit des Anlassens an die Sammelschiene, nach dem Anlassen an die Umformerklemmen gelegt werden. Hierzu wird ein einpoliger Umschalter ohne Unterbrechung benutzt, der indessen nur umgeschaltet werden darf, wenn an seinen Polen kein Spannungsunterschied besteht. Das ist der Fall, wenn der Gleichstromschalter, auf dessen beiden Seiten die Erregung abwechselnd abgenommen wird, nach dem Anlassen geschlossen ist. Die Bedienung des Umschalters muß vorsichtig erfolgen, damit kein Kurzschluß herbeigeführt wird.

Ist ein dauernd und zuverlässig spannungführendes Gleichstromnetz nicht vorhanden, so kann neben der oben bereits genannten Anwurfform auch ein besonderer, angebauter asynchroner Drehstrommotor als Anwurfsmotor verwendet werden. Bei sehr großen Umformern wird diese Anlaßform in der Regel erforderlich werden. Die Abb. 148 zeigt das Schaltbild hierfür. Ist der Anwurfsmotor für eine geringere Polzahl gebaut, so muß er durch Widerstände im Läuferstromkreise auf die synchrone Drehzahl des Einankerumformers herabgeregelt werden. Das Einschalten einer mechanischen Übersetzung ist nicht gleich günstig. Nach dem Parallelschalten ist der Motor abzuschalten und tunlichst abzukuppeln. Die Abb. 154 zeigt einen derartigen Maschinensatz.

Eine andere, ebenfalls häufig benutzte Form dieses drehstromseitigen Anlaufes ist die:

Anlassen durch gleichpoligen Anwurfmotor und Anlegen des Umformers über Drosselspulen an das Wechselstromnetz (Abb. 148) (Grobsynchronisierung).

Der Umformer wird durch den Anwurfsmotor gleicher Polzahl auf eine Drehzahl gebracht, die um die Schlüpfung des Anwurfmotors unter seiner synchronen Drehzahl liegt. Dann legt man ihn — mit so viel vorgeschaltetem Widerstand im Magnetkreise, daß keine Selbsterregung eintritt — über eine dreiphasige Überschalt-Drosselspule (Synchronisierdrossel) an die volle Betriebsspannung. Nachdem der Umformer bei langsamer Verstärkung der Erregung von selbst in Synchronismus gelaufen ist, wird ebenso wie beim asynchronen Anlauf nötigenfalls durch Magnetpolumschalter die richtige Polarität her-

gestellt, dann die Erregung auf ihren normalen Wert verstärkt und nun erst die Überschaltdrossel kurzgeschlossen und der Anwurfmotor abgeschaltet.

Der ganz kurze Überschaltstrom bleibt meist unter dem Nennstrom, das Bürstenfeuer ist ganz gering. Die richtige Schaltfolge kann durch einen entsprechend ausgebildeten Steuerschalter verhältnismäßig einfach sichergestellt werden. Unter Umständen empfiehlt es sich, Schalterverriegelungen anzuwenden derart, daß das Anlegen an das Netz nur bei schwach erregtem Umformer (Nebenschlußregler ganz vorgeschaltet), das Kurzschließen der Synchronisierdrossel nur bei normaler Betriebsstellung des Reglers möglich ist.

Das Verfahren ist geeignet, bei fast ebenso geringen Ansprüchen an die Geschicklichkeit (kein Synchronisieren) das asynchrone Anlassen

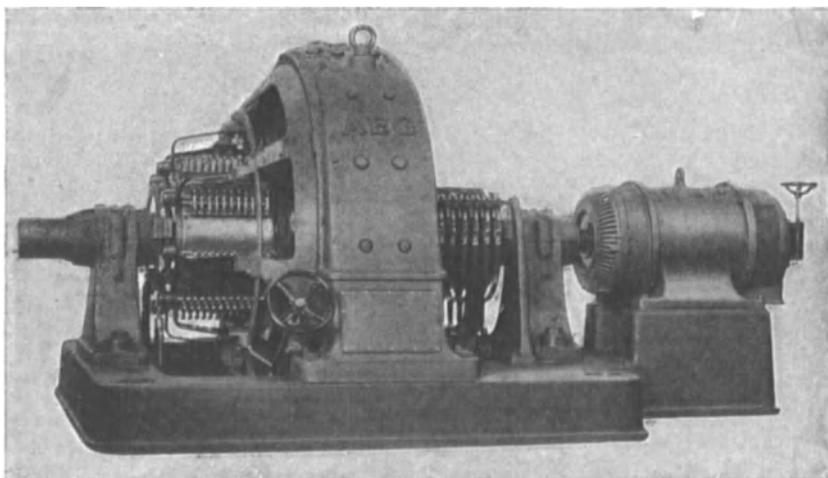


Abb. 154. Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformer mit Anwurfmotor.

(Selbstanlauf) besonders in den Fällen zu ersetzen, wo sich diesem mit Rücksicht auf das Bürstenfeuer gewisse Schwierigkeiten entgegenstellen z. B. bei hohen Gleichstromspannungen (1000 V und darüber).

Betriebseigenschaften und Schaltgeräte. Die sonstige Arbeitsweise des Einankerumformers in der Verwendung als Drehstrom-Gleichstromumformer kann mit wenigen Einschränkungen allen betrieblichen und wirtschaftlichen Anforderungen entsprechend angepaßt werden, sofern der Konstrukteur von vornherein bei der Durchbildung der Maschine auf die Eigenarten des Betriebes Rücksicht nehmen kann. Solche Eigenarten, die besonders beobachtet werden müssen, kann sowohl das Drehstromnetz als auch die Gleichstrombelastung aufweisen.

Für große industrielle Anlagen mit Eigenerzeugung, in denen neben Drehstrom z. B. für besondere motorische Antriebe oder für elektrochemische, elektrometallurgische und ähnliche Zwecke Gleich-

strom erforderlich ist, wird der Einankerumformer zumeist die vorteilhafteste Umformergattung sein, da aus dem Drehstromnetz Betriebs- und Störungseigenarten kaum zu beachten sein werden, sofern es sich um verhältnismäßig ruhigen, stoßfreien Betrieb handelt. Nur eine etwa verlangte Spannungsregelung in sehr weiten Grenzen kann unter Umständen dazu Veranlassung geben, auch den Motorgenerator zum Vergleich heranzuziehen.

Wesentlich anderer Feststellung und Beurteilung unterliegt dagegen der Einankerumformer, wenn er an eine Fernkraft-Übertragungsanlage angeschlossen werden soll. Die Eigenarten solcher Anlagen liegen, wie schon wiederholt erwähnt, in der Hauptsache darin, daß mit ständig gleichbleibender Drehstromspannung nicht gerechnet werden kann, weil durch die Ausdehnung der Fernkraftübertragungsleitungen und der Verteilungsnetze über weite Gebiete Störungen durch atmosphärische Ursachen oder aus den oft außerordentlich zahlreichen Anschlußanlagen verschiedenster Art mehr oder weniger zum mindesten über Teilversorgungsgebiete zur Auswirkung kommen und sich in kurzzeitigen Spannungsschwankungen bzw. über mehrere Sekunden verlaufende Spannungsabsenkungen bemerkbar machen. Hiergegen ist der Einankerumformer, wie auch der Synchronmotor des Motorgenerators besonders empfindlich und neigt leicht zum Außertrittfallen. Tritt letzteres ein, so ist die Stromlieferung in der Umformanlage unterbrochen, also betrieblich eine Katastrophe herbeigeführt, obgleich z. B. lediglich eine an sich ganz unbedeutende kurzzeitige Spannungsabsenkung die Ursache war, die im Drehstromnetz nur ein augenblickliches Zucken der Beleuchtung verursachte, das kaum bemerkt wurde. Während nach einem solchen Außertrittfallen der Asynchronmotor, der wesentlich unempfindlicher ist, schnell wieder eingeschaltet werden kann und der Gleichrichter gegebenenfalls nach noch kürzerer Zeit wieder betriebsbereit ist, sofern bei diesen Umformergattungen die Spannungsschwankung oder Spannungsabsenkung überhaupt eine Auslösung herbeigeführt hatte, ist das erneute Hochfahren und Zuschalten des Einankerumformers zeitraubender und umständlicher, selbst wenn über die Synchronisierdrossel parallelgeschaltet wird. Ist das Gleichstromnetz stark belastet insonderheit mit Glühlampen, deren Widerstand im kalten Zustande sehr gering ist und für die Einankerumformer oftmals einer Kurzschlußbelastung gleichkommt, dann bereitet das erneute Einschalten große Schwierigkeit und kann fast zur Unmöglichkeit werden, jedenfalls aber die Störungszeit unverhältnismäßig verlängern. Gegen solche Störungen im Einankerumformerbetriebe können drehstromseitig in den Hauptnetzanlagen eine Reihe von Vorbeugungsmaßnahmen getroffen werden, so z. B. der Einbau der neuzeitig durchgebildeten Selektivschutzarten (Wahlschutz) für das Auslösen der Hochspannungsschalter, um die Fehlerstelle ohne Beeinträchtigung anderer Netzteile so schnell wie irgend möglich abzutrennen, dann Unterteilung des Maschinenbetriebes im Kraftwerke auf einzelne an sich getrennte Leitungsabschnitte, Einbau von Erdschlußlöschrichtungen, Kurzschlußstrombegrenzung durch Reak-

tanzen im Kraftwerke. Gleichstromseitig wird für vermaschte Netze eine selbsttätige oder von Hand zu schaltende Auftrennung neuerdings zur Ausführung gebracht, um die Höhe der Einschaltbelastung so weit zu mindern, daß der Einankerumformer wieder eingeschaltet werden kann. Auf alle diese Einrichtungen wird im II. und IV. Bande ausführlicher eingegangen.

Ein absolut sicherer Schutz gegen den Einfluß der Spannungsschwankungen und Spannungsabsenkungen auf das Außertrittfallen von Einankerumformern kann nicht gewährleistet werden. Allerorten sind in letzter Zeit nach dieser Richtung sehr eingehende praktische Versuche¹ durchgeführt worden, um den Einankerumformerbetrieb sicherer zu gestalten. Die Ergebnisse haben indessen noch nicht voll befriedigt und werden kaum weitere Möglichkeiten zu finden gestatten, die Betriebssicherheit dieser Umformergattung zu erhöhen. Nur insoweit ist die Durchbildung der Einankerumformer fortgeschritten, als heute Spannungsabsenkungen mit einer Dauer von etwa 1 bis 2 Sekunden bis auf eine Restspannung von etwa 30 vH vom Umformer noch ertragen werden können, ohne daß er aus dem Tritt fällt. Das ist als ein besonderer Fortschritt zu begrüßen. Dabei kommt dieser Umformergattung der elektrische Vorteil zustatten, daß mit sinkender Drehstromspannung auch die Gleichstromspannung sinkt, also eine Entlastung der Gleichstromseite eintritt, was beim Motorgenerator nicht der Fall ist. Verstärkt wird allerdings die Gefahr des Außertrittfallens wieder, wenn das stromliefernde Kraftwerk relativ klein zu den Störungsleistungen und mit der Spannungsabsenkung eine Frequenzänderung² verbunden ist. Bei sehr großen Kraftwerken wird dagegen bei leichteren Störungsursachen die Frequenzänderung kaum bemerkbar sein.

Die Vermeidung des leichten Außertrittfallens des Einankerumformers bei Spannungsänderungen wird auch durch die Ausgestaltung der Schalteinrichtungen und zwar dadurch erreicht, daß die Drehstrom- und Gleichstrom-Selbstschalter entsprechend gewählt werden. Hierbei ist aber noch eine zweite Betriebsform des Umformerwerkes besonders zu beachten, dahin ob die Gleichstromseite selbständig ist, d. h. keine andere Stromquelle irgendwelcher Art parallelarbeitet, oder ob ein Parallelbetrieb mit anderen Umformern bzw. mit unabhängigen Stromquellen stattfindet.

Beim selbständigen Gleichstrombetriebe kann kein Rückstrom auf die Einankerumformer zur Zeit der von der Drehstromseite auf die Gleichstromseite übertragenen Spannungsänderung gelangen. Dann genügt es, die Gleichstromseite normal durch einstellbare Höchst-

¹ Vom Verfasser: Einankerumformer, Kaskadenumformer und Gleichrichter zum Anschluß an Fernkraftübertragungsanlagen. Elektrizitätswirtschaft 1926/27, Nr. 447, S. 555.

Dr. Hillerbrand: Das Verhalten von Einankerumformern bei Hochspannungsnetzkurzschlüssen: Elektrizitätswirtschaft 1926, Nr. 414.

² Einfluß von Spannungs- und Frequenzschwankungen der speisenden Netze auf den Betrieb von Einankerumformern. ETZ 1927, S. 129.

Kloss, E.: Über Verhalten von Umformern bei Netzstörungen. Siemens-Zeitschrift 1929, S. 617 und 859.

stromschalter zu sichern und dem Ölschalter der Drehstromseite ebenfalls Höchststromauslösung zusammen mit einer Spannungsrückgangsauslösung zu geben, die bei etwa 30 vH Restspannung anspricht mit einer Zeitverzögerung von etwa 3 bis 5 Sekunden. Eine elektrische Verriegelung beider Schalter darf nicht vorgenommen werden.

Arbeiten Einankerumformer untereinander parallel und stimmen ihre Belastungskennlinien genau überein, haben sie zudem je ihren eigenen Transformator, so wird der Parallelbetrieb auch bei Spannungsänderungen entweder alle oder keinen Umformer gefährden. Allerdings darf dabei auf der Gleichstromseite kein Rückstromschalter vorhanden sein.

Liegen die Einankerumformer in irgendeiner Form im Parallelbetrieb entweder mit anderen Umformergattungen oder Gleichrichtern oder mit vom Drehstromnetze unabhängigen Gleichstromquellen (Generatoren, Batterie), dann bedarf die Beurteilung der Betriebsgefährdung durch Spannungsänderungen ganz besonderer Vorsicht. In allen Fällen kann ein durch Spannungsänderung beeinflusster Umformer von anderer Seite Rückstrom erhalten und dann plötzlich umgekehrt als Gleichstrom-Drehstromumformer arbeiten. Nach den Angaben auf S. 202 ist diese Betriebsweise nicht ohne weiteres zulässig und kann zu Gefährdungen des Umformers selbst führen. Mit dem Außertrittfallen eines Umformers in einem großen Netze können weiter die anderen Maschinen plötzlich so stark überlastet werden, daß auch ihre Schalter zur Auslösung kommen und dann den gesamten Betrieb umwerfen. Hiergegen Maßnahmen zu treffen, ist sehr schwer möglich. Zur Sicherung wird hier der Gleichstromschalter noch mit einem je nach den Verhältnissen in Stromhöhe und Zeit einstellbaren Rückstromrelais versehen, während die Drehstromseite in der bisher angegebenen Form zu schützen ist. Eine elektrische Verklüftung der Gleichstrom- und Drehstromschalter sollte nicht vorgenommen werden. Zusammen mit dieser Schutzdurchbildung für die Einankerumformer sind die Schutzvorrichtungen aller am Parallelbetriebe teilnehmenden Stromlieferungseinrichtungen in Einklang zu bringen und auch die Schalter der abgehenden Gleichstrom-Speise- und Verteilungsleitungen mit einzubeziehen.

Eine andere Form, die Einankerumformer bei Spannungsänderungen und Parallelbetrieb in Gang zu halten, ist von Neumann¹ angegeben worden. Hier wird beim Ansprechen des Gleichstrom-Rückstromrelais oder -Schalters der Gleichstromkreis nicht unterbrochen, sondern durch Einschalten eines entsprechend bemessenen Widerstandes die Größe des Rückstromes derart begrenzt, daß der Umformer im Betriebe bleibt. Nach Wiederkehr der Spannung zur vollen Höhe wird der Widerstand selbsttätig kurzgeschlossen, und der Umformer beteiligt sich erneut an der Stromlieferung. Ein Schaltbild zeigt Abb. 155.

Schließlich ist auch der Gleichstrom-Rückstrom-Schnellschalter noch zu erwähnen, der auch bei Gleichrichtern neuerdings

¹ ETZ 1927, S. 169.

zur Verwendung kommt (S. 231). Auf die selbsttätige Wiederzuschaltung ist ebenfalls hinzuweisen, die sich bisher aber nicht hat einbürgern können, da sie zu verwickelt ist, die Schaltzeit zu kürzen nicht gestattet und Bedienung im Umformerwerk zumeist vorhanden

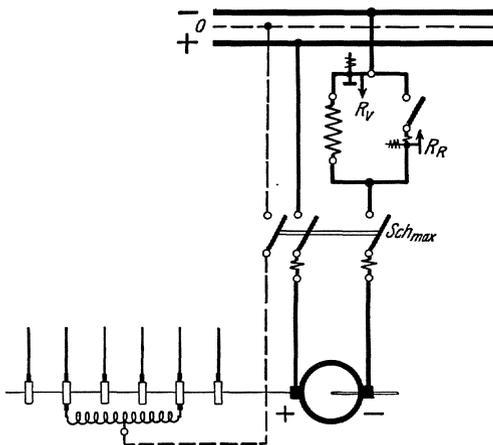


Abb. 155. Neumann-Schutzschaltung für Einankerumformer.

ist, die dann schneller eingreifen kann.

Für all diese Betriebsarten bestimmte Richtlinien zu geben, ist naturgemäß nicht möglich, da in jeder Anlage die Verhältnisse verschieden sind. Konstrukteur und Betrieb müssen gemeinsam die Lösung solcher Aufgaben durchführen, sonst können die Störungen in Einankerumformeranlagen ein Ausmaß annehmen, das die Weiterführung des Betriebes zur Unmöglichkeit macht.

Leidet das Drehstromnetz unter vielen Spannungsschwankungen und

ist hiergegen aus der Eigenart der Verhältnisse keine wesentliche Verbesserung möglich, so ist von der Verwendung von Einankerumformern abzuraten und ein Gleichrichter oder Motorgenerator, unter Umständen auch ein Kaskadenumformer zu wählen trotz der Nachteile in wirtschaftlicher Beziehung gegenüber dem Einankerumformer.

Neben dem Einfluß der Spannungs- und Frequenzschwankungen ist auch die Spannungskennlinie der zugeführten Drehstromspannung dann von besonderer Bedeutung, wenn sie durch höhere Harmonische von der reinen Sinusform abweicht. Es möge hier lediglich der Hinweis genügen, daß die höheren Harmonischen starkes Bürstenfeuer am Kollektor des Einankerumformers hervorrufen, das zwar keine verstärkte Beschädigung von Bürsten und Kollektor zur Folge hat, aber im Betriebe ungemein stört und die Belastungsfähigkeit herabsetzt, weil auch die Verluste im Umformer zunehmen.

Die großen Kraftübertragungsanlagen arbeiten selbst bei bester Maschinen-Spannungskennlinie nicht mit reiner Sinusform. Dazu kommt Art, Umfang und der Verlauf der Belastung für einzelne Teilgebiete, Leitungsinduktivität und Kapazität, Leistungsfaktor des Netzes und mehreres andere, wodurch die Form der Spannungskennlinie verzerrt wird. Hiergegen wendet man beim Einankerumformer Glättungsdrosseln an oder gibt dem Transformator stärkere Streuung, alles aber Maßnahmen, die unerwünscht sind und die vor allen Dingen bei der Bestellung des Umformers erwogen und entsprechend angewendet werden sollen. Es ist daher gegebenenfalls zu empfehlen, für verschie-

dene Zeiten (Tag, Nacht, Sonntag) und verschiedene Belastungszustände Spannungskennlinien am späteren Aufstellungsorte des Einankerumformers oszillographisch aufzunehmen, damit wieder der Konstrukteur derartige Betriebseigenheiten berücksichtigen kann.

Andererseits ist der Drehstrom-Gleichstromumformer stark überlastbar, ohne daß er aus dem Tritt fällt, was bei einem einfachen Synchronmotor in gleicher Weise nicht zutrifft. Es empfiehlt sich dann aber der Einbau von Wendepolen und einer Hilfskompondwicklung, um ein Nachstellen der Bürsten mit zunehmender Belastung zu vermeiden, und funkenlose Kommutierung zu erreichen. 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 leicht gebaut sein, um den Schwankungen in der Frequenz des Drehstromnetzes gut folgen zu können. Zur Phasenregelung des Netzes wie z. B. der Synchronmotor eignet sich der Einankerumformer nicht, was hier besonders betont werden soll. Als Anhaltspunkt sei angegeben, daß für eine Voreilung von z. B. $\cos \varphi = 0,8$ eine Maschine notwendig wird, deren Nennleistung bei $\cos \varphi = 1$ etwa doppelt so groß ist als die bei $\cos \varphi = 0,8$ verlangte Leistung.

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 diese wird infolge der Wirbelströme, die bei Schwankungen der Frequenz des Drehstromnetzes in derselben entstehen, ein bremsender Einfluß auf den Anker des Umformers ausgeübt.

Schließlich sei erwähnt, daß die Drehstrom-Gleichstrom-Einankerumformer auch zur Speisung eines Dreileiter-Gleichstromnetzes benutzt werden können. Zu diesem Zwecke wird der Nulleiter des Netzes bei dem Dreiphasenumformer an den Nullpunkt des sterngeschalteten Transformators angeschlossen (Abb. 148). Bei der Sechshephasenschaltung ist der Nulleiter an eine mit 2 Umformer-Schleifringen verbundene Spannungsteiler-Drosselspule anzuschließen (Abb. 151 und 155). Besondere Einrichtungen zur Spannungsteilung sind dann nicht mehr nötig. Soll in beiden Netzhälften getrennt die Spannung geändert werden können, dann muß man allerdings besondere Gleichstrom-Zusatzmaschinen benutzen.

b) Die Gleichstrom-Drehstromumformung. Diese zweite, gleichfalls häufiger verlangte Arbeitsweise kommt dann zur Anwendung, wenn bei einem von anderen Gleichstrommaschinen gespeisten Netze der Umformer eine Aushilfe auch für das Drehstromnetz bilden und im Falle der Störung an den Drehstromgeneratoren für diese einspringen soll. Eine solche Betriebsweise ist allerdings nicht gleich günstig wie die umgekehrte, und nur unter bestimmten Verhältnissen empfehlenswert.

Soll der Umformer nur dann als Gleichstrom-Drehstromumformer arbeiten, 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. Der Umformer muß eine Doppelschlußwicklung erhalten, die bei Belastung das Feld verstärkt. Sind Drosselspulen oder sonstige Regelgeräte auf der Drehstromseite vorhanden, so sind dieselben kurzzuschließen. Ferner ist zu berücksichtigen, daß die Spannung auf der Drehstromseite bis zu den Oberspannungsklemmen des Transformators recht bedeutend abfällt, was nur durch Nachregelung des Umformers beseitigt werden kann, wenn nicht der Transformator auch oberspannungsseitig mit unterteilter Wicklung bzw. mit entsprechenden Anzapfungen ausgeführt wird. Infolgedessen ist vorteilhafter ein Drehtransformator zu benutzen. Ein Fliehkraftschalter am Umformer ist ferner anzubauen, der bei eintretender unzulässiger Steigerung der Drehzahl den Umformer abschaltet.

Ist die Drehstromseite des Umformers induktiv belastet, so muß der Umformer ebenfalls mit einem Fliehkraftschalter ausgerüstet werden, um bei Überlastung ein „Durchgehen“ desselben zu vermeiden, denn wie bereits erwähnt ist derselbe, solange er nicht synchron auf ein bereits unter Spannung 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 Magnet-erregung geschwächt; dadurch steigt die Drehzahl des Umformers. An Stelle des Fliehkraftschalters, der beim Ansprechen den Umformer durch Auslösen der Schalter abschaltet, kann auch ein Fliehkraftregler in Verbindung mit einer Hilferregerwicklung benutzt werden. Durch letztere wird bei Überschreitung einer bestimmten Drehzahl die Erregung selbsttätig plötzlich verstärkt, und dadurch die Drehzahl wieder auf ein zulässiges Maß herabgemindert. Diese Hilferregerwicklung 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 Frequenz schwankt. Auch hier ist ein Fliehkraftschutz notwendig. Ist dagegen die Frequenz des vorhandenen Drehstromnetzes dauernd unverändert, 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.

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. In Abb. 156 ist für diese Ausführung ein Schaltbild gegeben. Zum Spannungsregeln und bei Parallelbetrieb wird zweckmäßig ein Drehtransformator benutzt.

Es ist dringend zu empfehlen, auf alle diese Verhältnisse vor der Auftragserteilung auf derartige Umformer hinzuweisen bzw. schon bei der Entwurfsbearbeitung Rücksicht zu nehmen, um beim späteren Betriebe die günstigsten und vor allem auch befriedigende Arbeitsverhältnisse zu erhalten. Gegebenenfalls wird für solche nach zwei Richtungen zu verwendenden Umformer ein Motorgenerator besser am Platze sein.

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:

c) Die 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 ungünstig, daß eine funkenlose Kommutierung 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 vH geringer ist als diejenige eines mechanisch angetriebenen Gleichstromgenerators gleicher Größe. Wird der Umformer umgekehrt als Gleichstrom-Wechselstromumformer betrieben, so sinkt die Leistung auf der Wechselstromseite bei $\cos \varphi = 0,8$ bis auf etwa 65 vH der normalen; die Ausnutzung ist also sowohl nach der einen wie nach der anderen Seite als außerordentlich ungünstig zu bezeichnen.

Schließlich macht das Anlassen des Umformers Schwierigkeiten; es empfiehlt sich daher, bei Einphasen-Wechselstrom besser einen Motor-generator aufzustellen.

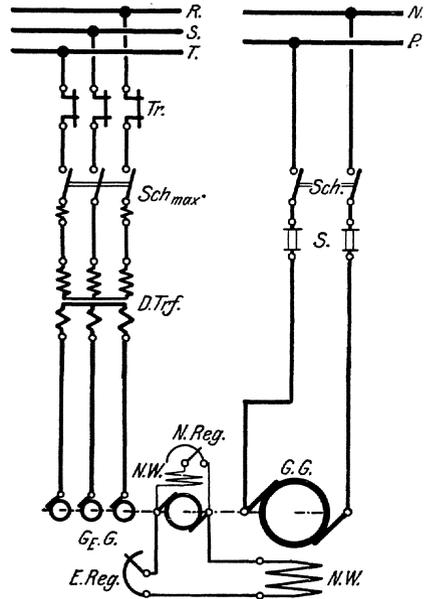


Abb. 156. Schaltbild eines Gleichstrom-Drehstrom-Einankerumformers mit besonderer Erregermaschine.

d) Der Doppelstromgenerator. Wie bereits zu Anfang dieses Kapitels erwähnt, kann man den Einankerumformer, sofern man ihn mechanisch antreibt, auch als Doppelstromgenerator benutzen, 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 Störungen an dieser Maschine die Stromlieferung beider Stromarten natürlich unterbrochen ist. Wenn nicht insbesondere Raumverhältnisse dazu zwingen, eine solche Doppelstrommaschine aufzustellen, sollte man vorteilhafter von der Verwendung derselben absehen und besser 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 Hauptschlußwicklung 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 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. Wendepole können beim Doppelstromgenerator nicht angewendet werden.

e) Der Parallellauf 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 sämtlicher 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. 202 erklärten Gründen annehmen. Es ist der Umformer infolgedessen bei derartigen Betriebsverhältnissen stets mit einem Fliehkraftschutz oder mit einer besonderen Erregermaschine auszurüsten.

F. Der Kaskadenumformer¹.

33. Der Kaskadenumformer im allgemeinen.

Zur Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom kommt weiter der Kaskadenumformer zur Anwendung, der für eine Reihe von Betriebseigenarten ebenfalls recht schätzenswerte Vorzüge besitzt. Neuerdings ist diese Umformergattung zwar etwas in den Hintergrund getreten, trotzdem soll auch sie noch behandelt werden.

Ein Nachteil des Einankerumformers liegt darin, daß derselbe, um von der Wechselstromseite in Betrieb gesetzt zu werden, besondere Anlaßvorrichtungen erforderlich macht oder einen Stromstoß auf das Drehstromnetz ausübt, der unter Umständen nicht mehr zugelassen werden kann. Ferner kann eine funkenfreie Kommutierung des Gleichstromes bei höheren Frequenzen des Wechselstromes nur durch reichliche Bemessung des Umformers erzielt werden. Bei dem Motorgenerator, bei dem ein Synchronmotor die Gleichstrommaschine antreibt, ist im allgemeinen ebenfalls eine besondere Vorrichtung nötig, um ihn von der Wechselstromseite anzulassen. Ferner müssen Motor und Generator für die volle Leistung des Gesamtmaschinensatzes gebaut werden. Die dritte Anordnung schließlich mit Asynchronmotoren als Antriebsmaschinen hat den Nachteil, daß der aufgenommene Wechselstrom gegenüber der Klemmenspannung phasenverschoben ist. Für die beiden letztgenannten Formen des Motorgenerators ist außerdem der große Raumbedarf zu erwähnen.

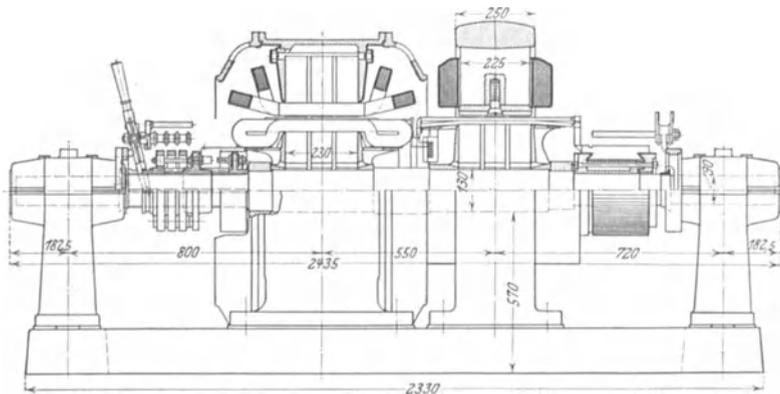


Abb. 157. Schnitt durch einen Kaskadenumformer.

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

¹ Arnold, E. u. J. L. la Cour: Der Kaskadenumformer. Die Wechselstromtechnik, Bd. 5. — ETZ 1910, H. 23 u. 24; EKB 1906, H. 19; 1910, H. 5.

Drehstrommotor mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ arbeiten, und drittens gestattet er im Verhältnis zu den drei obengenannten Umformeranordnungen eine Baustoff- bzw. Raum- und Preisersparnis zu erzielen. Der Kaskadenumformer vereinigt somit die Vorzüge

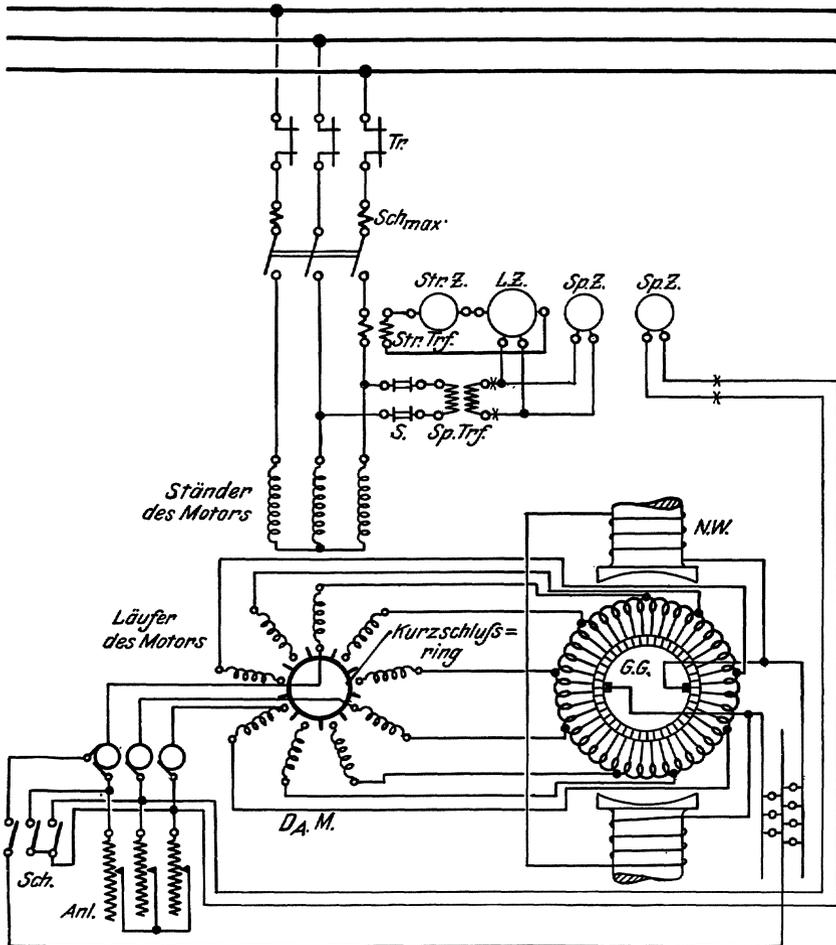


Abb. 158. Stromlauf beim Drehstrom-Gleichstrom-Kaskadenumformer.

der anderen Umformer und nähert sich auch in seinem Wirkungsgrade dem Einankerumformer.

Nach Abb. 157 und dem Stromlauf Abb. 158 besteht der Kaskadenumformer aus einem gewöhnlichen asynchronen Drehstrommotor und einem Einankerumformer, beide auf gemeinsamer Welle. Beide Maschinen sind also mechanisch und starr miteinander gekuppelt. Die einen Enden der Läuferwicklung des Asynchronmotors sind in einem Punkte zusammengeschlossen, während die anderen Enden

mit gleichverteilten 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.

34. Die Arbeitsweise des Kaskadenumformers.

a) Die Drehzahl und die Spannungsverhältnisse. Um die Arbeitsweise des Kaskadenumformers näher kennenzulernen, soll auf die elektrischen Verhältnisse etwas ausführlicher eingegangen werden. Zunächst sei erwähnt, daß der Asynchronmotor in seiner Bauart nicht wesentlich von der gewöhnlichen abweicht. Es besteht nur insofern ein Unterschied, als der Läufer mit 9, 12 oder einer noch größeren Phasenzahl 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. 90 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:

$$n_1 = \frac{60 \cdot \nu}{p_1}$$

umläuft, worin ν die Frequenz des Drehstromes und p_1 die Polpaarzahl des Asynchronmotors bedeutet. Bezeichnet ferner ν_R die Frequenz der im Läufer des Motors induzierten EMK, p_2 die Polpaarzahl des Einankerumformers und ν_G die Frequenz der in der Gleichstromwicklung induzierten EMK, so ist:

$$\nu_R = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot \nu = \nu - \frac{p_1 \cdot n_2}{60} \quad (102)$$

und:

$$\nu_G = \frac{p_2 \cdot n_2}{60},$$

und da naturgemäß:

$$\nu_R = \nu_G,$$

so läuft der Kaskadenumformer nicht mit der durch die Frequenz des zugeführten Drehstromes und die Motorpolzahl bedingten Drehzahl, sondern man findet durch Umrechnung, daß:

$$n_2 = \frac{60 \cdot \nu}{p_1 + p_2}, \quad (103)$$

d. h. also die Drehzahl ist umgekehrt verhältnisgleich 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. (103) die Drehzahl, mit der der Läufer und der Umformeranker umlaufen, gleich der Hälfte des Wertes, der sich aus der Frequenz 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 entgegen-

gesetzten 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 der Maschinensatz mit einer Geschwindigkeit, die sich zu der durch die primäre Frequenz bedingten verhält wie die Polzahl des Motors zu der Summe der Polzahlen von Motor und Umformer, also nach Gl. (103):

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{p_1}{p_1 + p_2};$$

infolgedessen ist dann:

$$n_2 = \frac{p_1}{p_1 + p_2} \cdot n_1. \quad (104)$$

Die dem Motor zugeführte elektrische Energie wird teilweise in mechanische und teilweise in elektrische Energie umgesetzt, und zwar läßt Gl. (104) erkennen, daß der $\frac{p_1}{p_1 + p_2}$ -te Teil in mechanische Energie 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 an Baustoff sparen zu können.

Da also der Maschinensatz bei gleichen Polzahlen mit einer Drehzahl entsprechend der halben Frequenz des zugeführten Stromes arbeitet, folgt, daß die Hälfte der dem Asynchronmotor zugeführten elektrischen in mechanische Energie umgesetzt und durch die Welle auf den Einankerumformer übertragen wird. Die zweite Hälfte 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 Gleichstrom-generator und zur Hälfte Umformer.

Die Spannungsverhältnisse zwischen Drehstrom- und Gleichstromseite sind beim Kaskadenumformer nicht in dem gleichen Maße voneinander abhängig, wie das beim reinen Einankerumformer der Fall ist. Der Ständer des Drehstrommotors kann ohne Rücksicht auf 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 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 gewöhnlicher Asynchronmotoren nicht ab, und das ist ein nennenswerter Vorteil gegenüber dem Einankerumformer.

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 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.

Auch mit Rücksicht auf die Leistung kann man bei den Kaskadenumformern eine nennenswerte Gewichtsersparnis erzielen. Er wird daher immer billiger als beispielsweise ein Motorgenerator gleicher Leistung und Drehzahl abgesehen davon, daß sein Wirkungsgrad besser als derjenige der Motorgeneratoren ist (siehe Zahlentafel 14). Die Abmessungen des Asynchronmotors sind in erster Linie von der primären Frequenz und nicht von der Drehzahl des Läufers abhängig, und weil der Motor nur 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 umsetzen müßte. Der Umformer arbeitet ferner mit einer Frequenz 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. 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

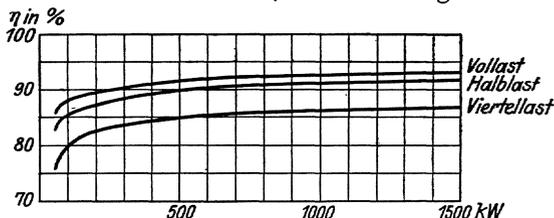


Abb. 159. Wirkungsgrad-Schaulinien für einen 1500-kW-Kaskadenumformer.

die beiden Maschinen unmittelbar zusammengebaut werden und die Zahl der Lager bis auf zwei herabgeht (Abb. 141). In Abb. 159 sind die Wirkungsgradschaulinien eines 1500-kW-Kaskadenumformers in Abhängigkeit von der Leistung dargestellt¹.

b) Das Anlassen. Das Anlassen des Kaskadenumformers erfolgt von der Drehstromseite in der gleichen einfachen Weise wie bei jedem asynchronen Drehstrommotor mittels eines festen Widerstandes im

¹ Hallo, H. S.: Der Kaskadenumformer. ETZ 1910, H. 23 u. 24.

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 Schaltbilde Abb. 158 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, 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 Betriebsdrehzahl, und er kann somit ohne weiteres in den dann festgelegten Synchronismus hineinlaufen. Überschreitet er seine Drehzahl, die demnach dem halben Synchronismus entspricht, um etwa 20 bis 25 vH, dann hat sich die Gleichstrommaschine vollständig erregt, und die Drehzahl des Motors beginnt wieder zu fallen. Ist die Drehzahl bis auf den 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 nachdem die Umdrehungen des Maschinensatzes 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, daß der Nebenschlußregler der Gleichstromseite des Einankerumformers nicht ausschaltbar eingerichtet werden muß, 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 bequeme Art, den Kaskadenumformer ohne besondere Hilfsgeräte und ohne umständlich synchronisieren zu müssen, von der Drehstromseite in Gang zu setzen, ist mit einer der Hauptvorteile desselben gegenüber dem Einankerumformer und dem synchronen Motor-generator. Außerdem kommt noch die große Einfachheit seiner Anlaßgeräte hinzu.

c) Die Spannungsregelung. Eine Regelung der Gleichstromspannung kann beim Kaskadenumformer bis auf etwa ± 10 vH 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, diesem Umformer eine synchrone Wechselstromzusatzmaschine vorzuschalten, die dann 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 gleichbleibender 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 Gleichstromnullleiter an den Sternpunkt der Phasen des Läufers angeschlossen, weil der neutrale Punkt der Läuferwicklung zugleich der neutrale Punkt für die Gleichstromwicklung ist (Abb. 158). 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 Dreileiter-schaltung wirkt der Umformer zugleich als Ausgleichsmaschine. In der Praxis ist bereits wiederholt beobachtet worden, daß diese Ausgleichswirkung derart gut ist, daß, wenn eine Hälfte des Dreileitersystems ganz entlastet und die andere vollbelastet wird, der Spannungsunterschied zwischen dem Mittelleiter und den Außenleitern nur wenige Prozente 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 Hilfserregerwicklung aufbringt.

d) Die Verwendung des Kaskadenumformers ist fast ausschließlich für die Drehstrom-Gleichstromumformung, indessen ist es auch möglich, durch eine Hauptschlußwicklung auf den Polen der Gleichstrommaschine diesen Umformer gleichzeitig zur Umformung von Gleichstrom in Drehstrom einzurichten.

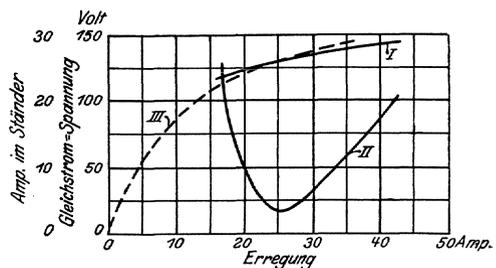


Abb. 160. Kennlinien eines 70-kW-Kaskadenumformers.

Hinsichtlich der Arbeitsweise bei Einphasen-Wechselstrom gelten sinngemäß die Ausführungen über die Induktionsmotoren im I. Abschnitte und die Einankerumformer auf S. 160. Dasselbe ist der Fall für den Parallelbetrieb, und zwar ist auch für den Kaskadenumformer ein Fliehkraftschutz erforderlich, wenn die Frequenz des zugeführten Wechsel- bzw. Drehstromes nicht unverändert ist, und der Umformer induktiv belastet wird.

In Abb. 160 sind noch die Kennlinien eines 70-kW-Kaskadenumformers abgebildet; Kennlinie *I* gilt für den Leerlauf, Kennlinie *II* zeigt die Stromentnahme aus dem Drehstromnetze bei veränderlicher Erregung und gleichbleibender Ständerspannung von 5000 V; Kennlinie *III* stellt die Leerlaufskennlinie des Gleichstromgenerators als Motor bei offenem Motorstromkreise dar.

G. Der Gleichrichter.

35. Wirkungsweise und Betriebseigenschaften im allgemeinen¹.

a) **Physikalisches.** Der Quecksilberdampf-Gleichrichter — nur dieser soll im folgenden behandelt werden — dient lediglich zur Umformung von ein- oder mehrphasigem Wechselstrom in Gleichstrom. Sein mechanisches Sondermerkmal liegt darin, daß er ohne Benutzung bewegter Massen arbeitet. Er ist seinem Wesen nach ein Schaltgerät, bei dem als Schaltorgan ein im luftleeren Raume bewegter und gerichteter Stromfaden verwendet wird. Die Einteilung erfolgt daher nach Stromstärken, nicht nach Leistungen. Hinsichtlich der Bauform wird unterschieden zwischen dem Glasgleichrichter und dem Eisengleichrichter. Beim ersteren wird der luftleere Raum in einem Glasgefäß, bei letzterem in einem Eisengefäß gebildet.

Der Gleichrichter steht für die heute in der elektrischen Kraftübertragung wohl am häufigsten vorkommende Art der Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom mit den anderen bisher behandelten Umformungsarten im schärfsten Wettbewerb, da er eine Reihe von Vorzügen besitzt, die betrieblich von besonderer Bedeutung sind. Auf sie und auf eine kritische Gegenüberstellung aller Umformungsarten wird auf S. 251ff. näher eingegangen.

Der Vollständigkeit wegen sollen zunächst die physikalischen Grundlagen kurz gestreift werden, da ihre Kenntnis die Beurteilung der technischen Eigenschaften der Gleichrichter sehr erleichtert.

In einem luftleeren Gefäß (Abb. 161) stehen zwei metallische Körper *A.* und *K.* gegenüber, die mit den Polen einer Stromquelle — (Batterie *B.*) — so verbunden sind, daß *A.* (Anode) am Pluspol, *K.* (Kathode) am Minuspol liegt. Da der luftleere Raum nicht leitet, kann zunächst ein elektrischer Strom nicht zustandekommen. Wird aber die Kathode *K.* durch irgendein Mittel auf sehr hohe Temperatur z. B.

¹ v. Issendorff, J.: Neuere Untersuchungen über das betriebsmäßige Verhalten von Quecksilberdampf-Gleichrichtern. ETZ 1929, H. 30, S. 1079.

auf etwa 2 bis 3000° C erhitzt, so entströmen ihr Elektronen (negativ geladene kleinste Teilchen), die von der positiven Anode angezogen werden, sich nach dieser hin bewegen und auf ihr deren elektrisch positive Ladung aufheben.

Der luftleere Raum wird bei Anwesenheit eines solchen erhitzten Körpers leitend für den Strom, indessen nur für eine bestimmte Stromrichtung und zwar nach dem erhitzten Körper zu. Daher fließt von der Stromquelle elektrisch positive Ladung nach, die wieder von den neu auftreffenden Elektronen ausgeglichen wird usw. Es bildet sich in dieser Weise ein Dauerzustand gekennzeichnet durch einen negativen Elektronenstrom von der Kathode zur Anode. Nach den Begriffsverhältnissen der Starkstromtechnik fließt umgekehrt der elektrische Strom vom Pluspol der Batterie zur Anode, durch die in der Bahn der Elektronen leitend gewordene luftleere Strecke zur Kathode und zurück zum Minuspol.

Als Kathodenstoff wird flüssiges Quecksilber benutzt. Die Anfangserhitzung der Kathode wird durch einen Hilfsvorgang — die Hilfszündung — eingeleitet, indem zwischen der Kathode und einer Hilfsanode ein Lichtbogen gezogen wird. Hierdurch bildet sich auf der Kathode ein ständig umherirrender glühender Fleck — Kathodenfleck — von etwa 3000° C Temperatur, der dann in der geschilderten Weise Elektronen gegen die Anode aussendet.

Tritt an die Stelle der Batterie als äußere Stromquelle eine Wechselstromquelle W_2 (Abb. 161), so bleibt der bisher betrachtete Vorgang unverändert, solange die Anode A . an positiver Spannung liegt. Die positive Halbwelle des Stromes bringt einen Stromfluß von der Anode zur Kathode und damit in einem geschlossenen äußeren Stromkreise zustande. In der zweiten Halbwelle haben Spannung und Feld umgekehrte Richtung. Dann kann kein Elektronenstrom mehr fließen. Die glühende Kathode sendet die negativen Elektronen infolge der veränderten Feldrichtung nicht mehr gegen die Anode. Letztere ist praktisch kalt und daher in diesem Zustande nicht befähigt, Elektronen auszusenden. Der Elektronenstrom stockt, der Stromfluß ist unterbrochen. Das Gerät entspricht demnach einem Ventil, es läßt nur die positiven Halbwellen durch und unterdrückt ohne besonderen Verlust die negativen.

In Abb. 162 ist eine Ausführung für Einphasenstrom mit zwischengeschaltetem Transformator und zwei Anoden gezeichnet. Die Primärwicklung des Transformators wird zu einem Ringe zusammenschlossen. In dieser Form wird nun jede Halbwelle ausgenutzt, denn die beiden Anoden haben infolge der Transformatorprimärschaltung entgegen-

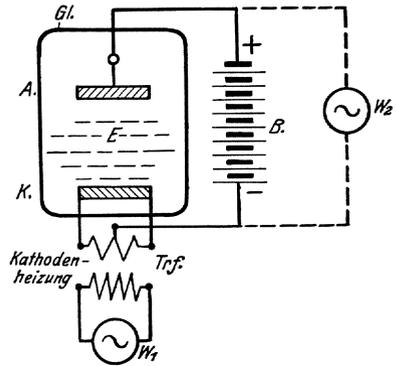
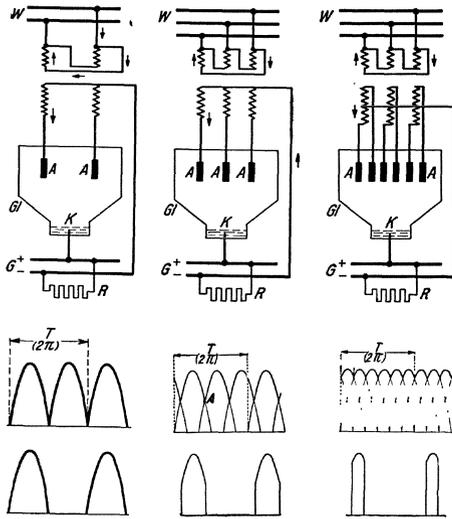


Abb. 161. Allgemeines Schalt- und Arbeitsbild eines Quecksilberdampf-Gleichrichters.

gesetztes Potential, das mit jeder Halbwelle wechselt; die jeweils positive Spannung führende Anode zieht den Elektronenstrom an sich. Der entgegengesetzt gerichtete positive elektrische Strom fließt als eine Halbwelle durch eine Anode und wechselt dann zur anderen. Das Gerät wird eine Zusammensetzung von zwei Ventilen; im Belastungswiderstande der Kathodenseite fließt ein ausschließlich aus positiven Halbwellen zusammengesetzter wellenförmiger Strom. Abb. 163 zeigt die Ausführung für Drehstrom bei 3-Phasen-, Abb. 164 bei 6-Phasenschaltung der Unterspannungsseite des Transformators. Die Zahl 6 der Phasen ergibt sich praktisch aus der Forderung, daß die periodischen Schwankungen der gleichgerichteten

Spannung möglichst gering sind und die praktische Durchbildung mit Rücksicht auf die übliche Phasenzahl 3 des Primärweges möglichst einfach ist. Der Anode, die jeweils die größte Spannung hat, werden sich die von der glühenden Kathode ausgesandten Elektronen zuwenden, und nur aus dieser Anode wird dann der Strom entnommen. Sobald die Spannung der nächsten Anode überwiegt, springt der Strom zu dieser über. Die stromliefernden Anoden wechseln zyklisch und zwar entsprechend der Frequenz des Wechselstromes.



Schaltbilder für Gleichrichter und Form des Gleichstromes.

Abb. 162. Einphasengleichrichter.

Abb. 163. Dreiphasengleichrichter.

Abb. 164. Sechsheisengleichrichter.

Anode Strom über die Zeitdauer $\frac{T}{3}$ bzw. allgemein $\frac{T}{n}$, wenn T die Dauer einer Periode des zugeführten Wechselstromes und n die Zahl der Anoden bedeutet. In dem zwischen der Kathode und dem unterspannungsseitigen Nullpunkte des Transformators liegenden Gleichstrom-Belastungskreise reihen sich die Ströme der einzelnen Anoden einander; die Kennlinie des gleichgerichteten Stromes ist die Einhüllende der Kennlinien der einzelnen Anodenströme. In den Abb. 162 bis 164 ist für die verschiedenen Schaltungen die Stromform des Gleichstromes angegeben. Die dabei auftretenden Schwankungen sind die größten, die vorkommen können, sofern der Gleichstromkreis nur Ohmschen Widerstand enthält und der Transformator verlust- und streuungsfrei arbeitet. Befinden sich im Gleichstromkreise Motoren, also induktive Widerstände, so wird durch diese die Welligkeit des Gleichstromes

wesentlich gedämpft. Für den äußeren Gleichstromkreis ist die Kathode der positive, der Transformator-Nullpunkt der negative Pol. Der gleichgerichtete Strom setzt sich zusammen aus einem Gleichstrom und überlagerten Pulsationen, deren Grundfrequenz gleich ist dem Produkt aus Wechselstromfrequenz und Phasenzahl.

An sich ist die Wirkung eines solchen mit Luftleere arbeitenden Gerätes nicht abhängig von der Anwesenheit von Quecksilberdampf. Das Quecksilber und sein Dampf haben nur die besonders wertvollen Eigenschaften elektrisch der Herabsetzung des Spannungsverlustes und mechanisch des niedrigen Verdampfungspunktes, sowie der selbsttätigen Erneuerung der Kathode, denn das verdampfte Quecksilber schlägt sich schon bei gewöhnlichen Temperaturen an den Gefäßwandungen nieder, verflüssigt sich und fließt infolge seines hohen spezifischen Gewichtes leicht längs diesen der Kathode wieder zu. Je nach der Ausführung des Gefäßes wird gegebenenfalls noch eine besondere Kühlung für diesen Zweck angewendet. Schließlich verhindert die Luftleere im Gleichrichtergefäß die Oxydation, so daß praktisch kein Verbrauch an Kathodenstoff stattfindet. Es mag dieses zur Kennzeichnung der Quecksilberverwendung genügen.

Ist die Gleichstrombelastung genügend groß, so genügt die Wärmewirkung des Lichtbogens, um den Kathodenfleck und damit den Elektronenstrom dauernd aufrechtzuerhalten; die besondere Zündung wird dann abgeschaltet.

b) Die Strom- und Spannungsverhältnisse. Sowohl die Ströme, also Gleichstrom und Anodenstrom, als auch die Spannungen stehen zueinander in einem festen Verhältnis. Unter der vereinfachten Voraussetzung, daß der Gleichrichter induktionsfrei belastet ist, die Verluste und die Streuung des Gleichrichter-Transformators vernachlässigt werden, und Strom und Spannung rein sinusförmig verlaufen, sind die Rechnungswerte für die einzelnen Schaltungen in Zahlentafel 12 zusammengestellt. In der Hauptsache ist wissenswert auf der Gleichstromseite der arithmetische, auf der Wechselstromseite der effektive Mittelwert des Stromes insbesondere für die Auswahl der Meßgeräte. Auf der Gleichstromseite weichen wegen der Welligkeit des Stromes Effektiv- und arithmetische Mittelwerte voneinander ab. Für den am häufigsten verwendeten 6phasigen Gleichrichter ist der Unterschied jedoch so gering (etwa 1⁰/₁₀₀), daß es praktisch gleichgültig ist, welcher Wert benutzt wird, d. h. ob die Messung der Gleichstromstärke

Zahlentafel 12.

Phasenzahl p_2	Strom einer Anode			Gleichstrom			Verhältniswerte			
	Scheitel i_s	Effektiv i_e	Mittel i_m	Scheitel I_s	Effektiv I_e	Mittel I_m	$\frac{i_e}{I_e}$	$\frac{I_e}{I_m}$	$\frac{i_e}{I_m}$	$\frac{u_e}{U_m}$
2	1,00	0,50	0,32	1,00	0,71	0,64	0,71	1,111	0,785	1,110
3	1,00	0,49	0,28	1,00	0,84	0,83	0,58	1,016	0,587	0,855
6	1,00	0,39	0,16	1,00	0,95	0,95	0,41	1,001	0,409	0,740

u_e = Effektivwert der Phasenspannung auf der Wechselstromseite.

U_m = arithmetischer Mittelwert der Spannung auf der Gleichstromseite.

mit dynamometrischen oder Drehspulmeßgeräten erfolgt. Mit steigender Phasenzahl nähern sich Effektiv- und Mittelwerte des Stromes auf der Gleichstromseite immer mehr dem Höchstwert, die Welligkeit des Stromes nimmt also immer mehr ab. Auf der Wechselstromseite hingegen werden die Unterschiede immer größer, d. h. mit steigender Phasenzahl verbessert sich die Güte der Gleichrichtung des Stromes, dagegen verschlechtert sich die Ausnutzung der einzelnen Anoden oder Wechselstromphasen.

Für den praktischen Gebrauch sind die Werte der Zahlentafel 12 noch zu berichtigen. Die meßbaren Kennlinienformen sind in Wirklichkeit nicht reine Sinuskennlinien, weil stets induktive Widerstände, so z. B. schon die Transformatorenstreuung vorhanden sind, die die Kennlinienform verzerren. Infolge dieser Widerstände kann der Anodenstrom weder plötzlich auftreten, noch plötzlich verschwinden. Dadurch überlappen sich die Stromkennlinien der einzelnen Anoden, die Dauer der Stromlieferung wird etwas länger und die Verhältnisse gestalten sich daher günstiger. Die Berichtigung ist um so bedeutender, je niedriger die Gleichrichterspannung ist. Die Berichtigungsziffern sind auf S. 229 bei der Berechnung der Gleichrichteranlagen angegeben.

Bei einem sechsphasigen Gleichrichter ist der Effektivwert des Anoden- bzw. Phasenstromes $i_e = 0,409 \cdot I_m$. Da die 6 Phasen der sekundären Wicklung des Transformators danach ausgelegt werden müssen, ergibt sich eine sekundäre Leistung gleich dem 1,815fachen Wert der Gleichstromleistung, eine primäre Leistung gleich dem

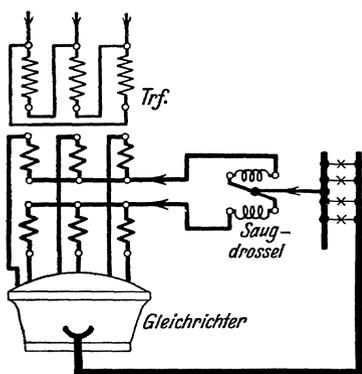


Abb. 165. Gleichrichterschaltung mit BBC-Saugdrossel.

1,285fachen Wert und eine Typenleistung gleich dem 1,55fachen Wert der Gleichstromleistung ohne Berücksichtigung des Leistungsfaktors und der Verluste (S. 230). Durch die von BBC ausgeführte Zwischenschaltung einer Drosselspule im Gleichstromkreis (Saugdrosselspule, Abb. 165) wird eine erhebliche Verbesserung in der Ausnutzung des Transformators erzielt. Die sekundäre Sechspannenwicklung des Transformators ist hierbei in zwei dreiphasige Systeme aufgelöst, welche gegeneinander um 180° verschoben sind. Der aufgelöste Nullpunkt wird an einen

normalen Einphasentransformator angeschlossen, der in der Mitte angezapft ist. Diese Anzapfung bildet den Rückleiter des Gleichstromnetzes. Durch die Drosselwirkung dieser beiden Wicklungen des Transformators wird eine Überlagerung der Phasenströme erzielt, so daß gleichzeitig zwei Anoden brennen. Dadurch wird der Effektivwert des Phasenstromes herabgesetzt, und der Transformator und die Verbindungsleitungen zwischen Transformator und Gleichrichter fallen wesentlich kleiner aus. Die Typenleistung des Transformators beträgt nur

den rund 1,41fachen Wert der Gleichstromleistung, dafür kommen aber der Preis und die Verluste dieser Drossel hinzu. Über ihre Größe läßt sich folgendes sagen: Jede ihrer Wicklungshälften hat bei der dreifachen Frequenz 25 vH der Phasenspannung des Haupttransformators aufzubringen und muß für den halben Gleichstrom bemessen sein. Dies ergibt zwar nur eine Größenordnung von rund 5 vH der Sekundärleistung des Haupttransformators. Trotzdem muß die Drossel bedeutend größer bemessen werden mit Rücksicht auf den bei Sinken des Stromes unter ihre Magnetisierungs-komponente eintretenden Spannungsanstieg von rund 15 vH. Sie wird je nach der Wahl der Grenze etwa 10 bis 15 vH der Größenordnung des Haupttransformators erhalten, so daß eine nennenswerte Ersparnis durch ihre Anordnung nicht erzielt werden kann. Als Nachteil kommt der erwähnte Spannungsanstieg hinzu, der bei stark schwankender Belastung, bei welcher der Strom häufig unter die erwähnte Grenze sinkt (bei Bahnbetrieb besonders in den Anfangs- und Endstunden) für die Beleuchtungskörper und sonstige angeschlossenen Geräte unangenehm werden kann, so daß unter Umständen durch notwendig werdende zusätzliche Belastungen größere Verluste eintreten können.

c) **Spannungsabfall und Wirkungsgrad.** Um den Elektronenstrom im Gleichrichter zustande zu bringen, muß ein Spannungsgefälle vorhanden sein, d. h. der Betrieb des Gleichrichters verursacht Spannungsabfall und damit Verlust. Dieser Verlust setzt sich zusammen aus den Einzelverlusten an der Anode und Kathode und dem Spannungsverluste im Lichtbogen, der im wesentlichen abhängig ist von der Länge des Lichtbogens. Letztere muß bei höheren Spannungen größer gewählt werden als bei niedrigen Spannungen. Infolgedessen ändert sich der Spannungsverlust mit der Höhe der Spannung.

Der Gesamtspannungsabfall beträgt je nach Leistung und Bauart 15 bis 25 V und verteilt sich wie folgt auf drei Hauptglieder: Etwa 5 bis 6 V an der Kathode (Kathodenfall), ungefähr 4 bis 8 V an den Anoden (Anodenfall), der Rest im Gasraum zur Überwindung der Widerstände. Dieser Verlust ist ein Mindestmaß bei mittlerer Stromstärke und steigt bei schwacher, ebenso wie bei sehr starker Belastung etwas an. In Abb. 166 ist der Verlauf des Spannungsabfalles durch eine Kennlinie dargestellt, die nach unten gekrümmt ist, also sowohl bei Entlastung als auch bei Belastung von einem Mittelwerte gerechnet ansteigt. Das ist besonders zu beachten für den Parallelbetrieb mehrerer Gefäße untereinander und mit anderen Umformern, wozu weiter noch darauf aufmerksam zu machen

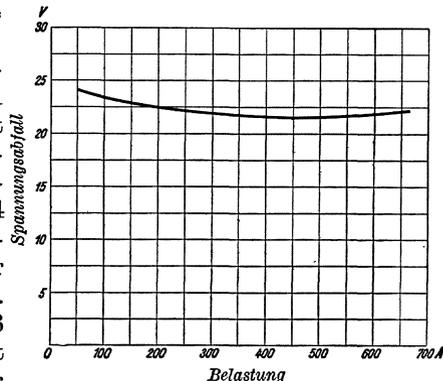


Abb. 166. Spannungsabfall im Gleichrichter in Abhängigkeit von der Belastung.

ist, daß der Spannungsabfall im Transformator und etwa noch vorgeschalteter Drosselspulen nicht unberücksichtigt bleiben darf (Abb. 167).

Der Wirkungsgrad. Da andere Verluste im Gleichrichter nicht auftreten, kann aus der Kennlinie des Spannungsabfalles ohne weiteres

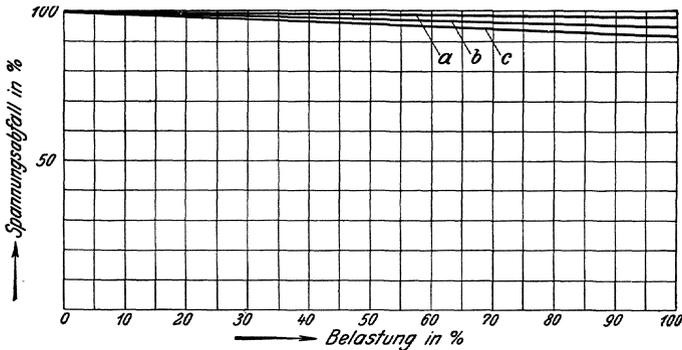


Abb. 167. Gesamtspannungsabfall eines Gleichrichters mit Transformator und Drosselspule, abhängig von der Belastung. *a* Spannungsabfall im Transformator, *b* Spannungsabfall des Gleichrichters mit Drosselspule, *c* Gesamtspannungsabfall.

die des Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Belastung abgeleitet werden. In Abb. 168 ist die Wirkungsgradkennlinie eines Gleichrichters in Abhängigkeit von der Spannung gezeichnet und in Abb. 192 eine solche in Abhängigkeit von der Belastung in Vergleich gestellt zu dem Wirkungsgradverlauf anderer Umformer. Dieser Kennlinienvergleich zeigt die wirtschaftlich wesentlich Überlegenheit des Gleichrichters insbesondere bei geringeren Teilbelastungen.

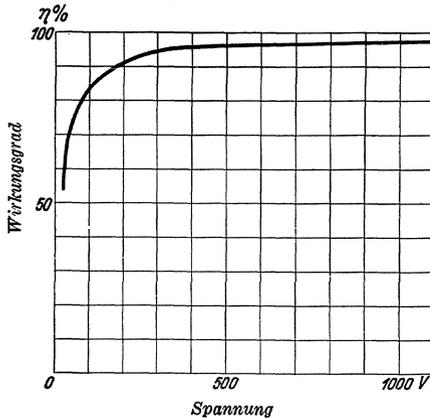


Abb. 168. Wirkungsgrad eines Gleichrichters bei verschiedener Gleichstromspannung.

Der Wirkungsgrad des Gleichrichters steigt mit der Spannung auf der Gleichstromseite, denn der einzige Verlust durch den Spannungsabfall ist praktisch unveränderlich, fällt also bei kleinen Spannungen mehr ins Gewicht als bei großen (Abb. 168). Bei 800 V

Gleichspannung und 20 V Abfall im Gleichrichter wird der Wirkungsgrad $\eta_{Gl} = \frac{800}{820} = 0,98$, bei 110 V Gleichspannung nur $\eta_{Gl} = \frac{110}{130} = 0,825$. Bei höheren Spannungen ist der Wirkungsgrad des Gleichrichters durchweg besser als der von umlaufenden Maschinen, und zwar ist diese Überlegenheit, wie bereits kurz angedeutet, besonders ausgesprochen bei Teillasten. Ein- und Mehrphasengleichrichter unterscheiden sich hinsichtlich des Wirkungsgradverlaufes nicht. Der Gleich-

richter gewinnt also an Wirtschaftlichkeit bei höherer Gleichstromspannung, was für Bergwerksanlagen und besonders für Bahnen von besonderer Bedeutung ist.

Für die wirtschaftliche Beurteilung einer Gesamtanlage sind weiter noch die Verluste im Transformator und in den Hilfsgeräten zu berücksichtigen.

d) Die Transformatorschaltung und -ausführung. Da die Gleichrichteranlagen in der Mehrzahl der Fälle hochgespannten Ein- oder Mehrphasenstrom umzuformen haben, also primär ein Transformator vorgeschaltet werden muß, sind die elektrischen Verhältnisse dieses Transformators (des Haupttransformators) im wesentlichen mitbestimmend für den Spannungsverlust bzw. Spannungsabfall der Gesamtanlage. Wie bereits auf S. 216 kurz angedeutet, kann die Strom- und Feldänderung nicht plötzlich vor sich gehen, da die Transformator-Induktivität verzögernd wirkt. Beim Verlöschen des Stromes einer Phase und ebenso beim plötzlichen Ansteigen des Stromes der folgenden Phase entstehen Streuspannungen, die sich geometrisch zu der EMK des Transformators addieren, den Sprung verzögern und abschwächen. Während des Überganges verläuft die Spannungskennlinie annähernd wagerecht. Dadurch wird die Welligkeit der gleichgerichteten Spannung und des Stromes beeinflußt und in einen sägezahnförmigen Verlauf gebracht. Während der kurzen Dauer des wagerechten Verlaufes haben zwei benachbarte Anoden annähernd gleiches Potential. Die Elektronen strömen daher zu beiden, und es findet ein Überlappen der einzelnen Anodenströme statt. Die Brenndauer der Anoden wird daher verlängert, die Ausnutzung der Transformatorschenkel etwas verbessert. Die Streuung des Transformators hat infolgedessen einen zusätzlichen Spannungsabfall zur Folge. Muß der Spannungsabfall klein sein, so muß eine Transformatorschaltung gewählt werden, die geringe Streuung ergibt. Dabei ist allerdings zu beachten, daß ein Spannungsabfall von etwa 6 bis 8 vH zwischen Leerlauf und Vollast im Interesse des guten Parallelarbeitens mit anderen Gleichrichtern und Umformern und der Dämpfung von Kurzschlüssen zweckmäßig ist. Geringe Streuung ergeben solche Transformatorschaltungen, bei denen auf jedem Transformatorschenkel sich die primären und sekundären Amperewindungen das Gleichgewicht halten. Es würde zu weit führen, hier auf theoretische Einzelheiten einzugehen. Je nach dem Zweck und den Betriebsverhältnissen muß es der Lieferfirma überlassen bleiben, die vorteilhafteste Schaltung zu wählen. Am gebräuchlichsten sind die folgenden zwei Transformatorschaltformen:

Primär Dreieck, sekundär Stern: Sekundär ist nur immer ein Transformatorschenkel belastet, der die jeweils stromführende Anode speist. Die anderen Sekundärwicklungen sind stromlos, da der Strom sich über Kathode und Nullpunkt des Transformators schließt. Der das Gleichgewicht haltende primäre Strom fließt über denselben Schenkel und schließt sich über Verbindungen und Zuleitungen.

Primär Stern, sekundär Zickzack: Der primär dem belasteten Schenkel zufließende Strom muß über eine der anderen Primärwick-

lungen zurückfließen, weil ihm in der Sternschaltung kein anderer Weg offen ist. Durch die Zickzackschaltung der Sekundärwicklung (Hintereinanderschalten von Teilen der Wicklungen verschiedener Schenkel) werden aber durch den Belastungsstrom einer Anode ebenfalls die beiden Schenkel magnetisiert, so daß der erforderliche Ausgleich eintritt.

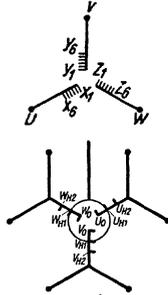


Abb. 169. Transformatorschaltung für AEG-Großgleichrichter.

Die Sternschaltung primär und sekundär ist ungeeignet.

Eine andere von der AEG bei ihren Großgleichrichtern angewendete Schaltung — primär Stern, sekundär sechsphasiger Zickzack in Gabelschaltung — ist in Abb. 169 gezeichnet.

Für die Durchbildung des Haupttransformators sind noch einige weitere Gesichtspunkte besonders zu beachten.

Da der Gleichrichter selbst keine Reaktanz besitzt, wird der Kurzschlußstrom bei einem Kurzschluß innerhalb des Gleichrichters (Rückzündung) durch keinen Widerstand des Gleichrichters gedämpft. Seine Größe (Stoß- und Dauer-Kurzschlußstromstärke) wird daher nur bedingt durch den Ohmschen und induktiven Widerstand des Haupttransformators und der sonst noch vorhandenen Geräte wie Drosselspulen, Regeltransformator u. dgl. Da die thermischen und mechanischen Wirkungen des Kurzschlußstromes auf Transformator, Drosselspulen, Gleichrichter und Schaltanlage mit dem Quadrate der Stromstärke zunehmen, können außerordentliche Gefahren für die Gesamtanlage entstehen, wenn die Speisung aus einem großen Netze erfolgt. Infolgedessen muß der Transformator kurzschlußsicher gebaut und ihm zudem eine reichliche Kurzschlußspannung e_k gegeben werden. Sind diese Maßnahmen nur beschränkt anwendbar, so ist die Kurzschlußreaktanz durch vorgeschaltete Drosselspulen zu erhöhen, was allerdings einen höheren Spannungsabfall auf der Gleichstromseite des Gleichrichters zur Folge hat. Wie weit hier gegangen werden darf, ist nur von Fall zu Fall zu entscheiden. Die zusätzliche Reaktanz kann auch im Regeltransformator untergebracht werden, sofern ein solcher notwendig ist.

Der Haupttransformator ist zweckmäßig ferner mit oberspannungsseitigen Anzapfungen (z. B. ± 4 vH nach den VDE-Vorschriften) zu versehen, die im spannungslosen Zustande zu schalten sind, um Dauerspannungsänderungen im speisenden Drehstromnetze während der einzelnen Jahreszeiten und Belastungsverhältnisse elastisch folgen zu können.

Schließlich sollen die Haupttransformatoren für Eisengleichrichter noch sog. Entgasungsklemmen, d. h. Anzapfungen erhalten, von denen Strom für das Formieren und Anheizen des Gleichrichters bei erstmaliger Inbetriebsetzung und nach späteren Instandsetzungen mit einer Spannung von etwa 35 bis 45 V entnommen werden kann.

e) **Der Leistungsfaktor.** Sofern kein Transformator vorgeschaltet ist, verursacht der Lichtbogen im Gleichrichter keine Phasenverschiebung.

Sie wird für die Gesamtanlage also einschließlich Transformator herbeigeführt durch den Blindverbrauch der Haupt-, Zusatz- und Regeltransformatoren bzw. Drosselpulen. Der Leistungsfaktor eines Gleichrichters bezogen auf die Gleichstromseite in der mathematischen Festlegung z. B. bei Drehstrom:

$$\cos \varphi = \frac{\text{Wattabgabe gleichstromseitig}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}$$

ist also kleiner als 1. Hierzu kommt noch die eigenartige Arbeitsweise des Gleichrichters darin, daß immer nur eine Anode Strom führt. Dadurch wird der dem Netz entnommene Strom in seinem sinusförmigen Verlauf verzerrt. Das hat zur Folge, daß die Belastung des Netzes etwas ungünstiger wird, weil nunmehr der Strom einen größeren Wert

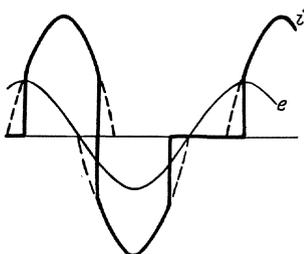


Abb. 170. Primärstromverlauf eines Dreiphasen-Gleichrichters bei Dreieck-Stern-Transformatorschaltung.

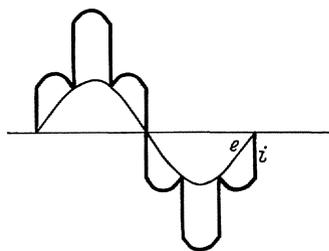


Abb. 171. Primärstromverlauf eines Sechsphasen-Gleichrichters bei Stern-Doppelstern-Transformatorschaltung.

annimmt als bei sinusförmigem Verlauf. In Abb. 170 und 171 sind die Primärstromkennlinien eines dreiphasigen Gleichrichters bei Transformatorschaltung Dreieck-Stern und eines sechsphasig geschalteten Gleichrichters bei Schaltung des Transformators in Stern-Doppelstern gezeichnet ohne Berücksichtigung von Verlusten, vorausgesetzt sinusförmige Spannung und induktionsfreier Transformator. Wenn man aus den gezeichneten verzerrten Kennlinien die Leistung und die Effektivwerte ermittelt und den Leistungsfaktor nach obiger Festsetzung berechnet, ergibt er sich kleiner als eins. Nach dieser Betrachtungsweise wird der Leistungsfaktor, sofern Blindstromverbrauch durch den Transformator nicht stattfindet, auch als Verzerrungswert γ bezeichnet.

Die Abweichung in den Kennlinienformen wird also ausgedrückt durch diesen Verzerrungswert oder auch Belastungswert γ , dem wirtschaftlich die gleiche Bedeutung zukommt wie der gewöhnlichen Phasenverschiebung in der Belastung des Netzes. In Zahlentafel 13 sind die Werte für die verschiedenen Transformatorschaltungen zusammengestellt, die für die Stromtarife zu beachten sind.

Am ungünstigsten ist die Dreiphasen-Gleichrichterschaltung. Bei der sechsphasigen Schaltung erreicht der Verzerrungswert annähernd die Einheit, spielt also keine bedeutende Rolle mehr. Wohl zu beachten ist aber, daß zu dem Verzerrungswerte noch der Einfluß der Transfor-

Zahlentafel 13.

Phasenzahl		Transformatorschaltung		Verzerrungs- oder Belastungs- wert γ
m_1 primär	m_2 sekundär	primär	sekundär	
1	2	einphasig	zweiphasig Ring	1,00
3	3	Dreieck	Stern	0,84
3	3	Stern	Zickzack	0,84
3	6	Stern	Zickzack in Gabelschaltung	0,96
3	6	Dreieck	Doppelstern	0,96

mator-Magnetisierungsströme und Induktivitäten auf den eigentlichen $\cos \varphi$ hinzukommt. Der tatsächliche Leistungsfaktor ist also das Produkt aus dem Leistungsfaktor des Transformators an sich, $\cos \varphi_{Trf}$, und dem Verzerrungswerte γ , so daß der Leistungsfaktor einer Gleichrichteranlage insgesamt zu ermitteln ist aus Gl. (105):

$$\cos \varphi_{GI} = \cos \varphi_{Trf} \cdot \gamma. \quad (105)$$

Abb. 172 zeigt den Verlauf des Leistungsfaktors in Abhängigkeit von der Belastung.

Der Leistungsfaktor wird mit Wattmetern, Strom- und Spannungsmessern in der üblichen Weise und die Blindleistung mit Blindstromzählern bestimmt. Eine Verbesserung des Netzleistungsfaktors durch den Gleichrichter ist naturgemäß nicht möglich.

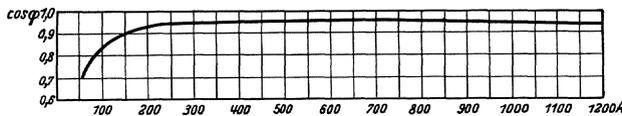


Abb. 172. Leistungsfaktor eines Gleichrichters abhängig von der Belastung.

f) **Sonstige Betriebseigenschaften** (Grenzstrom, Überlastung, Kurzschluß, Rückarbeiten, Frequenz, Rückzündung, Parallelbetrieb). Der Grenzstrom. Als Grenzstrom bezeichnet man denjenigen kleinsten Strom, der noch durch die Belastung zulässig ist, um den Gleichrichter nicht zum Erlöschen zu bringen. Nach der Einleitung wird das Glühen auf der Oberfläche der Kathode durch den Betriebsstrom selbst herbeigeführt. Dieses Glühen und damit die Wirkungsweise des Gleichrichters hört auf, wenn eine bestimmte Stromstärke unterschritten wird. Diese Grenzstromstärke liegt bei einzeln arbeitenden Gleichrichtern etwa bei 5 A, bei parallelarbeitenden Gefäßen etwa bei 20 bis 30 A. Es genügt dabei, daß der Strom nur in seinem Momentanwerte, also im Bruchteil einer Sekunde den tiefsten Wert erreicht, um den Hauptlichtbogen zum Erlöschen zu bringen.

Um daher den Betrieb bis auf die praktische Belastung Null (Leerlauf) führen zu können, werden Drosselspulen im Gleichstromkreise und ein Hilfsstromkreis, der unabhängig vom Hauptstromkreise arbeitet und nicht gleichzeitig mit diesem zum Verlöschen kommt, benutzt. Diese Mittel gestatten eine einwandfreie Deckung aller Belastungsverhältnisse bis zum Leerlauf.

Die Überlastbarkeit des Gleichrichters ist infolge der geringen Masse der Anoden und der Kathode und der Nachgasung begrenzt. Sie beträgt bei voll erwärmtem Gefäß etwa:

100 vH auf 1 s
50 „ „ 5 s
25 „ „ 5 min,

bei kaltem Gefäß etwa 25 vH auf 10 min.

Gegen Überbeanspruchung bei Kurzschluß ist der Gleichrichter im allgemeinen nicht empfindlich vorausgesetzt, daß zweckentsprechende Schutzmaßnahmen im Gleichstromkreise vorhanden sind, über die auf S. 231 das Erforderliche gesagt ist. In besonders rauen Betrieben z. B. im Braunkohlenbergbau mit Tagebau, bei welchem durch die Art der Bagger- und Bahnanlagen mit häufigen und heftigen Kurzschlüssen zu rechnen ist, muß die Kurzschlußbeanspruchung der Gesamtanlagen geprüft und gegebenenfalls durch die bereits gekennzeichneten Mittel herabgesetzt werden.

Ein Rückarbeiten ist beim Gleichrichter aus den eingangs erwähnten Gründen nicht möglich. Das ist besonders zu beachten für Industrie- und Bahnanlagen, bei denen Stromrückgewinnung durch Nebenschlußmotoren (Hebezeuge, Talfahrt) vorkommen kann. Für solche Fälle ist besondere Untersuchung notwendig, in welcher Weise durch andere Netzbelastung oder durch Widerstände, die bei der Stromumkehr zugeschaltet werden, ein solcher Betrieb gewährleistet werden kann.

Die Frequenz des zugeführten Stromes hat auf den Betrieb des Gleichrichters keinen Einfluß. Es entfällt das Synchronisieren und der Störungseinfluß bei Frequenzschwankungen.

Die Rückzündung. Nach dem einleitend Gesagten ist die Anode praktisch kühl, die Kathode weißglühend. Erhitzt sich durch irgendwelche Ursachen auch die Anode an einer Stelle über 2000°C , so kann auch die Anode einen Elektronenstrom zur Kathode oder zu anderen Anoden aussenden. Der Gleichrichter wird dann nach allen Richtungen stromdurchlässig, die Ventilwirkung versagt; der innerhalb des Gleichrichters von der gestörten Anode ausgehende Strompfad hat sehr geringen Widerstand und wirkt als Kurzschluß und zwar nicht nur wechselstromseitig, sondern auch gleichstromseitig, falls andere Gleichrichter oder sonstige Gleichstromerzeuger parallel mit dem kurzgeschlossenen Gleichrichter an den Sammelschienen liegen. Diesen Störungsvorgang bezeichnet man als Rückzündung. Die Gleichrichterbauformen der letzten Jahre sind dieser Schwierigkeit allmählich Herr geworden, da die Durchbildung naturgemäß wesentliche Fortschritte gemacht hat. Ganz beseitigt kann die Gefahr der Rückzündung und die ihr folgenden unangenehmen Wirkungen auf die angeschlossenen Netze nicht werden. Als Ursachen sind anzusehen einmal nicht genügende Luftleere im Gleichrichtergefäß. Die Dichtungen an Anoden und Kathode müssen daher ganz besonders sorgfältig hergestellt und gewartet werden. Einzelheiten hierzu werden bei der Besprechung der Glas- und Eisengleichrichter zur Behandlung kommen. Weiter ist die Überlastung durch

zu hohe Stromstärken gefährlich, da sie, sofern sie genügend lange Zeit andauert, die Temperatur des Gefäßes und der Anoden so stark steigern kann, daß der Elektronenausritt auch aus den Anoden vor sich geht. Das ist bei der Wahl des Gleichrichters für bestimmte Betriebsverhältnisse ganz besonders zu beachten. Weiter kann eine unzulässige Temperatur des Gleichrichters durch ungenügende Abführung der erzeugten Stromwärme eintreten. Da der Gleichrichter keine umlaufende Teile besitzt, die die Kühlung bewirken können, die Strahlung andererseits nicht genügt, um die erzeugte Wärmemenge = Spannungsverlust \times Belastungsstrom abzuführen, müssen besondere zusätzliche Kühlvorrichtungen angewendet werden, über die ebenfalls später gesprochen werden wird. Andere Ursachen schließlich finden durch den inneren Aufbau Berücksichtigung so die Abschirmung der Anoden gegen zu starke Quecksilberströmungen von der Kathode, gegen unmittelbare Bestrahlung der Anoden durch die Kathode und Niederschlag von Quecksilberdampf auf den Anoden.

Parallelbetrieb mehrerer Gleichrichter untereinander und mit anderen Stromquellen. Der Verlauf des Spannungsabfalles bei verschiedenen Belastungen war in Abb. 166 dargestellt. Wenn die Spannungsänderung an sich auch gering ist, so hat sie dennoch zur Folge, daß mehrere Gleichrichter von einem gemeinsamen Transformator aus nicht ohne weiteres in Parallelschaltung betrieben werden können. Nimmt zufällig einer der parallelarbeitenden Gleichrichter mehr Strom auf als die anderen, so verringert sich sein Spannungsabfall und der Strom würde immer weiter steigen, während die anderen Gleichrichter entlastet würden. Um diesem betrieblich unzulässigen Zustande zu begegnen, werden Drosselspulen den einzelnen Anoden vorgeschaltet. Da der Ohmsche Spannungsverlust der Drosselspule mit wachsendem Strome zunimmt, steigt der gesamte Spannungsabfall des Stromkreises mit wachsender Belastung. Dagegen hat die Induktivität der Drosselspule eine ausgleichende Wirkung auf die Stromverteilung.

Der Parallelbetrieb zwischen Gleichrichtern, Generatoren und Umformern bedarf stets besonderer Untersuchungen. Da jeder am Parallelbetrieb beteiligte Umformer oder Generator eine abweichende Kennlinie für den Spannungsabfall ganz allgemein aufweisen wird, so nimmt bei Belastungsänderungen diejenige Maschine mehr Last auf, deren Spannungs-kennlinie einen flacheren Verlauf hat, die also einen geringeren Spannungsabfall besitzt. Es ist daher notwendig, daß die Spannungs-kennlinien möglichst derjenigen des parallelzuschaltenden Gleichrichters angepaßt werden. Durch Abgleichung mittels Zusatzeinrichtungen wird sich ein guter Parallelbetrieb herbeiführen lassen, sofern das Primärnetz für alle im Parallelbetriebe liegenden Maschinen und Gleichrichter gemeinsam ist, also Schwankungen des Primärnetzes auf alle diese gleichzeitig wirken.

Bei Einankerumformern, deren Gleichspannung von der Drehstromfrequenz praktisch unabhängig ist, aber von der Höhe der Wechselspannung beeinflusst wird, läßt sich ein ruhiger Parallelbetrieb auch bei drehstromseitigen Spannungsschwankungen ermöglichen. Bei Motor-

generatoren wird dieses nicht immer zu erreichen sein, insbesondere wenn mit den Spannungsschwankungen merkliche Frequenzschwankungen verbunden sind.

Umständlicher gestalten sich weiter solche Fälle, in denen Generatoren durch Maschinen nicht elektrischer Art (Dampfturbinen, Wasserturbinen usw.) angetrieben werden, oder verschiedene, untereinander unabhängige Primärnetze zur Stromlieferung dienen. Hier ist Vorsicht zu üben und dem Berechnungsingenieur genauester Aufschluß zu geben, um den zu erwartenden Verhältnissen entsprechend Rechnung tragen zu können. Gegebenenfalls werden besondere Untersuchungen und Messungen notwendig werden.

Mit Gleichstrom-Doppelschlußgeneratoren kann ein Parallelbetrieb nur dann erzielt werden, wenn die Hauptschlußwicklung abgeschaltet und der Generator als reine Nebenschlußmaschine betrieben wird, weil der gerade Verlauf der Spannungskennlinie bei zunehmender Belastung zum Parallelschalten und Parallelbetriebe nicht geeignet ist.

Besonders hinzuweisen ist auf die Betriebsform, die für ein mit verschiedenen Umformergattungen besetztes Umformerwerk gegebenenfalls wirtschaftlich am zweckmäßigsten zu wählen ist und die sich an diejenige größerer Kraftwerke mit Grund- und Spitzenlastmaschinen anschließt. Liegen z. B. Motorgeneratoren und Gleichrichter im Parallelbetriebe, und handelt es sich um die Deckung von Licht- und Kraftstrom nach dem üblichen Belastungsverlaufe gemischter Anschlußverhältnisse, so ist derart zu verfahren, daß derjenige Umformer, dessen Wirkungsgrad bei Vollbelastung am höchsten ist, die Grundlast deckt und der Gleichrichter die Spitzenbelieferung übernimmt, weil sein Wirkungsgrad auch bei Teilbelastungen wesentlich günstiger und fast gleich demjenigen bei Vollast ist. Diese Betriebsweise läßt sich einfach auf folgende Weise erreichen.

Gibt man dem Motorgenerator gegenüber dem Gleichrichter einen verhältnismäßig steilen Verlauf der Belastungskennlinie und legt die

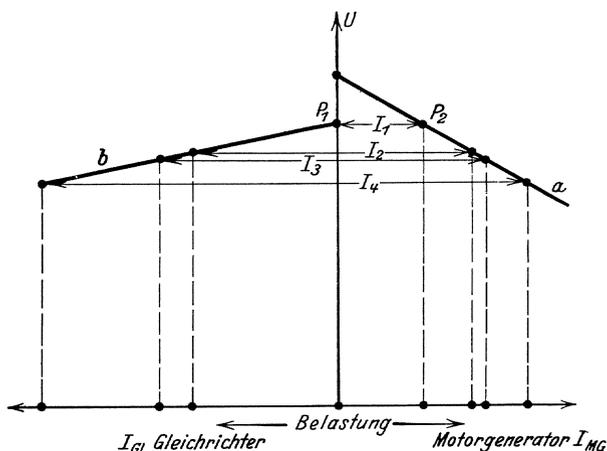


Abb. 173. Lastverteilung bei Parallelbetrieb zwischen Motorgenerator und Gleichrichter.

Belastungskennlinie des Gleichrichters etwas tiefer als die des Generators, bezogen auf die Leerlaufspannung, so kann diese Betriebsweise der gesamten Anlage mit gutem Erfolge erreicht werden. In Abb. 173 sind die Kennlinien beider Umformergattungen gezeichnet. Die Kennlinie a

ist die des Motorgenerators, die Kennlinie b die des parallelarbeitenden Gleichrichters. Der Motorgenerator übernimmt bis zur Belastung, die durch die Abszisse des Punktes P_2 gegeben ist, die Leistungslieferung. Von da an beteiligt sich der Gleichrichter an der Deckung der Belastung, und zwar infolge seines verhältnismäßig geringen Spannungsabfalles wesentlich stärker als der Motorgenerator. Soll dagegen die Belastung möglichst gleichmäßig auf beide Umformergattungen verteilt werden, so ist hierzu nur der Nebenschlußregler des Motorgenerators zu benutzen.

Ähnliche Untersuchungen werden anzustellen sein, wenn Einankerumformer oder Kaskadenumformer vorhanden sind. Dabei wird auch der Belastungsverlauf nach Zeit und Spitzenhöhe zu beurteilen sein.

36. Die Spannungsregelung und die Spannungsteilung für Dreileiteranlagen.

Da der Gleichrichter keine Spannung erzeugt, muß die Spannung, falls sie geregelt werden soll, durch besondere Einrichtungen vor oder hinter dem Gleichrichter beeinflusst werden. Es sind hierfür eine große Zahl von Regelungsarten durchgebildet worden, von denen nur die am häufigsten benutzten besprochen werden sollen. Den Gleichrichter ohne jede Regelung zu benutzen, ist im allgemeinen für Licht- und Kraftnetze nicht zu empfehlen, da sich dann ein den heutigen Ansprüchen an die Gleichheit der abgegebenen Spannung entsprechender Betrieb nicht erzielen läßt, alle Schwankungen im Primärnetz vielmehr übertragen werden.

Die Regelung auf der Gleichstromseite wird nur bei kleinen Einheiten und für geringe Regelungsgrenzen angewendet. Man benutzt in der Nulleitung zum Transformator einen regelbaren Widerstand

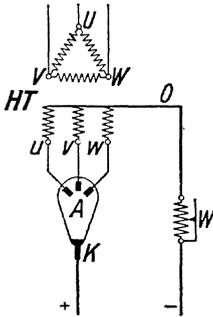


Abb. 174. Nullpunkts-Spannungsregelung mit Widerstand.

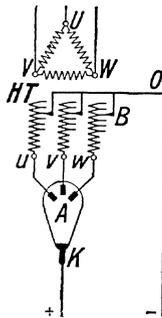


Abb. 175. Nullpunkts-Spannungsregelung mit Stufentransformator auf dem Haupttransformator sekundär.

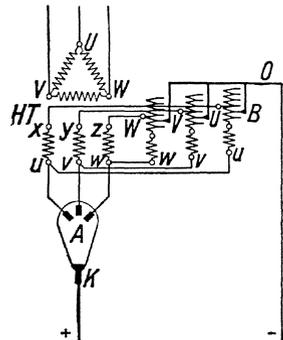


Abb. 176. Spannungsregelung mit besonderem Regeltransformator.

(Abb. 174). Da in diesem Energie in Wärme also nutzlos umgesetzt wird, wird der Wirkungsgrad der Anlage unter Umständen stark beeinträchtigt.

Die Regelung auf der Wechselstromseite ist die übliche und erfolgt in der Mehrzahl der Fälle durch Wicklungsunterteilung des

Transformators und Benutzung eines Stufenschalters. Die Wicklungsunterteilung kann je nach der Höhe der Primärspannung in die Primär- oder in die Sekundärwicklung des Haupttransformators verlegt werden etwa nach Abb. 175, oder man benutzt einen besonderen Stufentransformator mit Windungsschalter (Abb. 176). Die Schaltung nach Abb. 175 und 176 wird als Nullpunktregelung bezeichnet. Sie gestattet eine sehr feinstufige Regelung. Eine andere Form ist noch zu erwähnen, bei der nicht im Transformator-Nullpunkte, sondern an den Phasenenden durch mehrpolige Stufenschalter geregelt wird. Die Stufung ist gröber, da hierbei die einzelnen Phasen gleichzeitig geregelt werden. Eine häufig bei Glasgleichrichtern zu findende Regelung ist in Abb. 177 in der Ausführung der S.S.W. dargestellt. Die Transformator-Sekundärwicklung ist an einen Stufenschalter geführt. Die Primärwicklung hat außerdem die auf S. 220 erwähnte, im spannungslosen Zustande zu schaltende Unterteilung erhalten.

Für die Speisung und Regelung von Verteilungsnetzen wird die Stufenregelung im Nullpunkt des Transformators bevorzugt. Sie ist indessen nur dort benutzbar, wo das Primärnetz verhältnismäßig geringe Spannung besitzt und Trockentransformatoren (S. 319) zur Aufstellung kommen können. Bei Hochspannung und Öltransformatoren läßt sich die große Zahl von Klemmen aus dem Transformator-kessel nicht mehr herausführen. Es muß dann nach Abb. 176 ein besonderer Regeltransformator aufgestellt werden.

Für die Ladung von Akkumulatorenbatterien, die mit niedriger Spannung und großer Stromstärke beginnt und mit den umgekehrten Verhältnissen für Spannung und Strom endigt, wird zumeist die Schaltung derart gewählt, daß eine Drosselspule in jeder Primärphase liegt, deren Einfluß auf S. 224 bereits gekennzeichnet wurde.

An Stelle der Transformatoranzapfungen mit Stufenschalter oder eines besonderen Regeltransformators kann auch ein Drehtransformator benutzt werden. Näheres über diesen mit seinen Vorzügen und Nachteilen ist im III. Abschnitt angegeben.

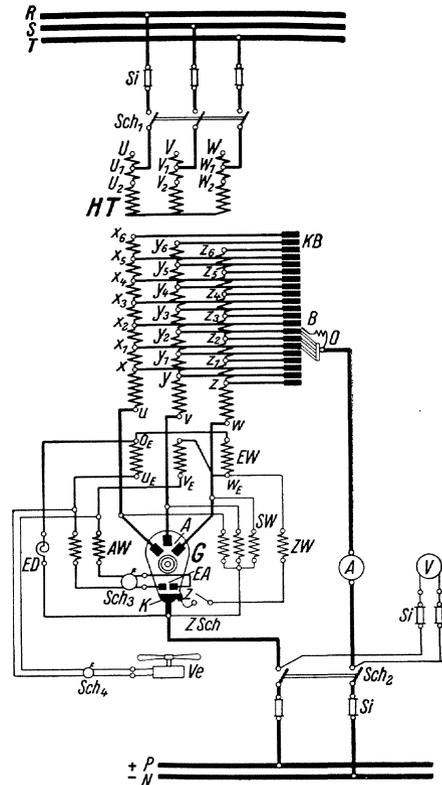


Abb. 177. Schaltbild für eine Glasgleichrichteranlage mit Stufentransformator zur Spannungsregelung.

Welche Form der zweckmäßigsten Regelung anzuwenden ist, hängt naturgemäß von den jeweiligen Umständen ab.

Die Spannungsteilung für den Anschluß von Dreileiteranlagen erfolgt am betriebsichersten und wirtschaftlichsten in der Form, wie sie auch bei Gleichstromkraftwerken, deren Maschinen für die Außenleiterspannung gewickelt sind, angewendet wird entweder nach Abb. 178 durch eine geteilte Batterie oder nach Abb. 179 durch einen Ausgleichs-

maschinensatz. Im IV. Bande sind diese Ausführungsformen besonders behandelt, weswegen darauf verwiesen werden muß.

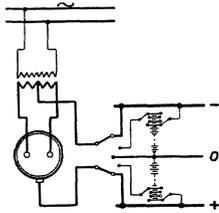


Abb. 178. Gleichrichter-Dreileiterschaltung mit Spannungsteilung durch Batterie.

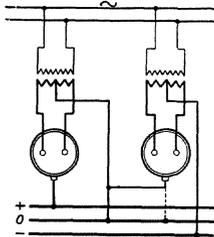


Abb. 180. Gleichrichter-Dreileiterschaltung ohne zusätzliche Spannungsteiler.

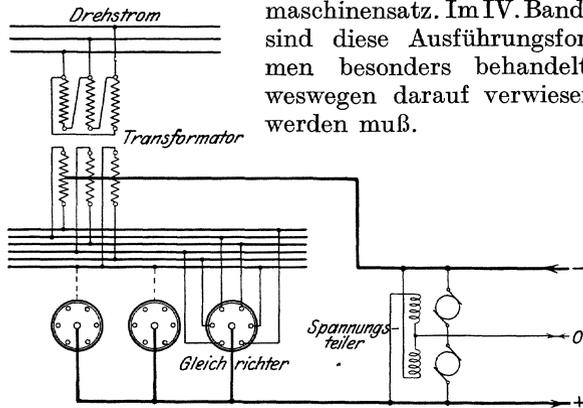


Abb. 179. Gleichrichter-Dreileiterschaltung mit Spannungsteilung durch Ausgleichsmaschinensatz.

Die Spannungsteilung durch 2 Gleichrichter in der Schaltung nach Abb. 180 vorzunehmen, ist zwar wiederholt ausgeführt worden, hat aber schwerwiegende Bedenken, die darin liegen, daß bei einem Kurzschluß zwischen einem Pol und dem Nulleiter die volle Spannung auf die andere Netzhälfte gelegt wird. Da der Gleichrichter kein Rückarbeiten zuläßt, wird infolge des Kurzschlußstromes der zweite Gleichrichter abgeschaltet und die volle Außenleiterspannung bleibt auf der Netzhälfte liegen. Dadurch werden die angeschlossenen Stromverbraucher naturgemäß sehr gefährdet.

37. Die Berechnung von Gleichrichteranlagen.

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, daß bei der Berechnung einer Gleichrichteranlage mit zugehörigem Transformator besondere Einzelheiten zu berücksichtigen sind. Es soll daher an Hand einfacher Gleichungen und der Zahlentafel 12 der Gang der Berechnung so weit erläutert werden, als das für den entwerfenden Ingenieur von Bedeutung ist. Zur Vervollständigung sind die Gleichungen für das folgende Beispiel gleichzeitig ausgewertet worden.

Beispiel. Speisung eines Gleichstrom-Zweileiternetzes mit 230 V bei 1000 A aus 2 Gleichrichtern angeschlossen an einen gemeinsamen Transformator. Die Drehstrom-Primärspannung beträgt 10 kV verkettet, die Frequenz 50 Herz; Gleichrichter in Sechschphasenschaltung.

Gegeben sind:

Die Gleichstromspannung U_G , die der Gleichrichter als arithmetischen Mittelwert der Gleichstromspannung erzeugen muß (230 V) im Leerlauf, die Stromstärke auf der Gleichstromseite I_G wiederum als arithmetischer Mittelwert (1000 A) und daraus nach den arithmetischen Mittelwerten die Gleichstromleistung $N_G = U_G \cdot I_G \cdot 10^{-3}$ kW (230 kW). Je nach den elektrischen und betrieblichen Verhältnissen ist nun die verlangte Stromstärke I_G auf ein oder mehrere Gefäße (hier $z = 2$) zu verteilen, so daß die Stromstärke für ein Gefäß:

$$I_{G1} = \frac{I_G}{z} \quad (500 \text{ A}).$$

Dabei soll die Unterteilung derart vorgenommen werden, daß jedes Gefäß für die gleiche Stromstärke zu bemessen ist, was auch der zukünftig zu erwartenden Entwicklung des Stromabsatzes entsprechen wird. Die Unterteilung in Grund- und Spitzenlast, die Überlastbarkeit, die Belastungsverteilung auf andere mitlaufende Umformer u. dgl. soll damit ebenfalls beachtet sein.

Ist u_0 der Spannungsabfall im Gleichrichtergefäß, so ist der Wirkungsgrad für jedes Gefäß alleine:

$$\eta_{G1} = \frac{U_G}{U_G + u_0} \quad (u_0 = 18 + 20 \text{ Volt}, \quad \eta_{G1} = 0,915). \quad (106)$$

Der Strom, der im Nulleiter zum Transformator fließt und der für die Bemessung dieser Leitung, sowie der in ihr liegenden Sicherungsgeräte (Schalter, Sicherung) maßgebend ist, ist gleich dem Belastungsstrom I_G [bzw. I_{G1} , sofern jedes Gefäß seinen eigenen Transformator besitzt] (1000 A).

Auf der Wechselstromseite sind die Effektivwerte bestimmend. Für den Haupttransformator sekundär ist die Stromstärke in jeder Phase (siehe Zahlentafel 12):

$$I_{W2} = I_G \frac{i_e}{I_m} \quad (1000 \cdot 0,409 = 409 \text{ A}), \quad (107)$$

und die Spannung (Leerlaufspannung zwischen Nullpunkt und Phase):

$$U_{W2} = U_G \frac{u_e}{U_m} + u_0 \quad (230 \cdot 0,74 + 18 = 188 \text{ Volt}). \quad (108)$$

Sind Drosselspulen vorgeschaltet, so muß U_{W2} entsprechend vergrößert werden.

Die Leistungsabgabe aus der Transformator-Sekundärwicklung beträgt dann, wenn m_2 die Phasenzahl bezeichnet (6):

$$N_{W2} = I_{W2} \cdot U_{W2} \cdot m_2 \cdot k_1 \cdot 10^{-3} \text{ kVA} \quad (435 \text{ kVA}). \quad (109)$$

k_1 berücksichtigt die kurzzeitige Verzögerung im An- und Abstieg des Anodenstromes infolge der Abweichung der Stromkennlinien von der reinen Sinusform durch die induktiven Widerstände. Es beträgt praktisch:

k_1 bei	60 V	0,91
„	110 V	0,94
„	230 V	0,95
„	470 V und darüber	0,98

Der Transformator zur Speisung eines Gleichrichters ist demnach größer zu wählen als der Gleichrichterleistung in kW entspricht. In Gl. (109) ist allerdings noch kein Sicherheitszuschlag für die Berücksichtigung des Spannungsabfalles im Transformator und etwa verlangte Regelung enthalten. Man kann diesen je nach den Verhältnissen mit etwa 5 bis 10 vH ansetzen.

Bezeichnet für die Primärwicklung des Haupttransformators:

m_1 die Phasenzahl (3),
 η_{Trf} den Wirkungsgrad des Transformators bei induktionsfreier Belastung (0,975),
 $\cos \varphi_{Trf}$ den Leistungsfaktor des Transformators bei induktionsfreier Belastung (0,960),
 so wird der Transformator primär beansprucht mit einer Leistung:

$$N_{W_1} = N_{W_2} \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \frac{1}{\eta_{Trf} \cdot \cos \varphi_{Trf}} \text{ kVA} \quad (330 \text{ kVA}). \quad (110)$$

Der Haupttransformator ist dann zu wählen für eine Leistung:

$$N_W = \frac{1}{2} [N_{W_1} + N_{W_2}] \text{ kVA} \quad (383 \text{ kVA}), \quad (111)$$

also rund 1,64mal größer in kVA mit Berücksichtigung des Leistungsfaktors und der Verluste als der Gleichrichterleistung in kW entspricht (ohne Berücksichtigung des vorerwähnten Sicherheitszuschlages).

Für den Netzanschluß und die Schaltgeräte gilt schließlich folgendes:

Ist β die Verkettungszahl, d. h. die Anzahl der von einem Netzleiter aus gespeisten Wicklungszweige des Haupttransformators (2)

und U_1 die verkettete Primärspannung (10 kV), so ist der Strom, der zuzuführen ist:

$$I_1 = \frac{N_{W_1}}{U_1 \cdot m_1} \sqrt{\beta} \text{ A} \quad (15,5 \text{ A}), \quad (112)$$

und die Netzleistung:

$$N_1 = \frac{N_G}{\eta_{G1} \cdot \eta_{Trf}} \text{ kW} \quad (253 \text{ kW}). \quad (113)$$

Der Leistungsfaktor in bezug auf die Netzbelastung berechnet sich zu:

$$\cos \varphi_1 = \frac{N_1}{N_{W_1}} \quad (0,765). \quad (114)$$

38. Die Schalt- und Schutzgeräte.

Bevor zur Besprechung der beiden Gleichrichterbauformen und ihrer Einrichtungen samt der Durchbildung der Schaltanlagen übergegangen wird, sollen noch allgemeinere Gesichtspunkte erörtert werden, die für die Wahl und Anordnung der Schalt- und Schutzgeräte maßgebend sind.

Für die Auswahl der Schaltgeräte auf der Wechsel- und Gleichstromseite ist Besonderes nicht zu beachten, sofern es sich nur um einen Gleichrichter handelt und Parallelbetrieb mit anderen Umformern oder einer Batterie nicht vorkommt. Dann sind je nach der

Höhe der Spannungen und der Größe der Stromstärke auf der Wechselstromseite selbsttätige Höchststrom-Ölschalter und auf der Gleichstromseite Sicherungen bzw. ebenfalls Höchststromschalter einzubauen. Bei höherer Wechselstromspannung und Freileitungszuführung ist noch ein Überspannungsschutz vorzusehen. Sicherungen in den Anodenleitungen sind zweckmäßig fortzulassen, da sie für den Betrieb keinen Wert haben. Wird ihr Einbau von der Lieferfirma dennoch verlangt, so ist darauf zu achten, daß diese nach einem Ansprechen nur mit den gleichen Schmelzstreifen bzw. Patronen versehen werden dürfen.

Über die Schutzmaßnahmen für den Transformator besonders dann, wenn der Gleichrichter an einem großen Netz mit hoher Kurzschlußleistung liegt, ist bereits auf S. 220 gesprochen worden.

Bei Parallelbetrieb mehrerer Gleichrichter untereinander oder mit anderen Umformern auch dann, wenn eine größere Batterie gleichstromseitig vorhanden ist, muß die Auswahl des gesamten Schaltgerätes besonders durchdacht werden, weil hier unter Umständen recht verwickelte Verhältnisse auftreten können, wenn z. B. durch Rückzündung oder durch andere Ursachen im Gleichrichter Kurzschluß nicht nur einiger oder aller Phasen des Haupttransformators, sondern auch noch ein Gleichstrom-Rückstrom von den anderen Stromquellen über Gleichrichter und Transformator eintritt. Wenn die Betriebserfahrungen der letzten Zeit auch gezeigt haben, daß derartige umfangreiche Störungen zu den Seltenheiten gehören, so muß ihnen ein vorsichtig geführter Betrieb dennoch Rechnung tragen insonderheit bei großen Anlagen und empfindlichen Stromabnehmern (Städten u. dgl.). Das heute beste Mittel, einen allseitigen Kurzschluß und damit die Ursache für weitere Störungen so schnell wie nur irgend möglich zu unterbrechen, besteht darin, auf der Gleichstromseite einen sog. Rückstrom-Schnellschalter einzubauen, der nach den neuesten Durchbildungen imstande ist, den Kurzschlußstrom innerhalb eines Zeitraumes von etwa $\frac{1}{100}$ sec also eines Polwechsels bei Frequenz 50 zu unterbrechen bzw. durch einen mit dem Schalter verbundenen Parallelwiderstand von seinem Spitzenwerte auf einen noch zulässigen Wert absinken zu lassen. Mit diesem Schnellschalter elektrisch verbunden wird in letzterem Falle dann ein gewöhnlicher Selbstschalter, der den Stromfluß vollständig unterbricht. Der Grund für die Anwendung der etwas umständlicheren Schaltung über den vorübergehend im Störungsstromkreise liegenden Parallelwiderstand liegt darin, die beim plötzlichen Übergange von Kurzschluß auf Leerlauf auftretenden Überspannungen zu vermeiden. Zweckmäßig ist es, mit dem Rückstrom-Schnellschalter auch den Drehstrom-Ölschalter elektrisch zu verlinken und letzteren dann durch den Schnellschalter ebenfalls zur Auslösung bringen zu lassen. Auf diese Weise wird der gestörte Gleichrichter allseitig vom Netz getrennt.

An Stelle des Gleichstrom-Selbstschalters kann der Rückstrom-Schnellschalter (ohne Parallelwiderstand) auch mit einem Überstromrelais versehen werden, so daß er auch bei Überlastung im normalgerichteten Betriebe mit einer gewissen Zeitverzögerung anspricht. Dann sind weitere Sicherungsgeräte auf der Gleichstromseite nicht erforderlich.

Die Hochspannungsseite des Transformators ist schalttechnisch wie jede Transformatorschaltung zu behandeln. Der Ölschalter kann naturgemäß nicht als Schnellschalter ausgebildet werden. Erfahrungsgemäß empfiehlt es sich, diesen Schalter mit Höchststromrelais zu versehen, die etwa der höchstzulässigen betriebsmäßigen Stoßbelastung des Gleichrichters entsprechend eingestellt werden, aber keine Zeit-, sondern nur eine Augenblicksauslösung erhalten.

Die Beurteilung der Bauform und der Betriebssicherheit eines Gleichrichters hat sich in der Hauptsache zu erstrecken auf:

- das Gefäß und seine dauernd gute Luftleere bzw. die zur Erhaltung der Luftleere erforderlichen Zusatzvorrichtungen,
- die Durchbildung der Kathode und der Anoden (Quecksilberniederschlagsraum, Bestrahlung, Abschirmung, Rückzündung),
- die Kühleinrichtungen,
- die Zündeinrichtungen.

Genau so wie bei den Maschinen und später auch bei den Transformatoren kann auf bauliche Einzelheiten nicht näher eingegangen werden. Die heute auf dem Markt befindlichen Ausführungen erster Elektrizitätsfirmen zeigen keine Unterschiede so wesentlicher Art mehr, daß sie eines besonderen Hinweises bedürfen abgesehen von Einzelheiten, über die die Druckschriften der Lieferfirmen guten Aufschluß geben. Das Folgende behandelt daher wiederum nur Grundsätzliches, das für die Aufstellung eines Entwurfes und für den Betrieb von wesentlicher Bedeutung ist.

39. Der Glasgleichrichter und seine Schaltanlage.

Der Glasgleichrichter besteht, wie Abb. 181 zeigt, aus einem luftleer gepumpten, aus besonderem Glase hergestellten Kolben, dem die Form einer Birne gegeben wird. Im unteren Teile befindet sich das Quecksilber, somit also die Kathode. Der Quecksilberdampf wird in diesem Kolben abgekühlt und fließt an den Wandungen in verdichteter Form wieder zur Kathode zurück. Je nach der Phasen- und Anodenanzahl erhält der Glaskolben mehrere seitliche Arme, an deren Enden die aus Graphit bestehenden Anoden nach besonderen Kunstgriffen eingeschmolzen sind. Hier erfolgt auch die Stromzuführung.

Wie bereits gesagt, muß zur Inbetriebsetzung des Gleichrichters zunächst die „Zündung“ vorgenommen werden. Der hierzu erforderliche Hilfslichtbogen wird je nach der Größe des Gefäßes bzw. der Stromstärke und der Höhe der Spannung entweder durch schwaches Kippen des Gefäßes oder durch einen Spritzvorgang eingeleitet. Die Kippzündung bewirkt durch die Kolbenbewegung eine Verbindung des Quecksilbers der Kathode mit der sog. Zünd- oder Erregeranode. Bei der Spritzzündung wird Quecksilber aus der Kathode an eine besondere Erregeranode gespritzt.

Zur Aufrechterhaltung der dauernd guten Luftleere im Glaskolben können im Betrieb keine besonderen Einrichtungen benutzt werden. Hauptsache ist nur, daß die Einschmelzung der Anoden auf das sorg-

fältigste geschieht. Läßt die Luftleere mit der Zeit nach, so wird der Kolben unbrauchbar und ist zu ersetzen. Die Lebensdauer des Glaskolbens ist also beschränkt. Sie beträgt nach der Firmengewährleistung 2000 Betriebsstunden, doch sind zahlreiche Kolben im Betriebe, die bis 15000 Stunden gebrauchsfähig waren.

Die Gestaltung des Glaskolbens und der Anodenarme trägt den Forderungen bester gegenseitiger Lage von Kathode und Anoden mit Rücksicht auf die gefährlichen Rückzündungsmöglichkeiten Rechnung.

Besonderer Beachtung bedarf die Kühlung des Glaskolbens. Da die Oberfläche des Glaskolbens, abgesehen von ganz kleinen Gleichrichtern, nicht ausreicht, um die erzeugte Wärmemenge

durch Ausstrahlung abzuführen, muß eine künstliche Kühlung zur Hilfe genommen werden und zwar in Gestalt eines kleinen unter dem Kolben angebrachten, elektrisch angetriebenen Schraubenlüfters, der mit dem Einschalten des Gleichrichters selbsttätig in Betrieb gesetzt wird. Da von der ständig ausreichenden Luftbewegung je nach der Höhe der Belastung das ordnungsmäßige Arbeiten des Gleichrichters abhängig ist, muß dafür gesorgt werden, daß der Lüfter bei höher belastetem Glaskolben nicht ungewollt zum Stillstande kommt. Tritt dieser doch ein, so muß auch der Gleichrichter dann sofort abgeschaltet werden. Das geschieht entweder von Hand bei ständig besetzter Anlage auf Grund einer entsprechend eingefügten akustischen Meldung, oder selbsttätig durch Auslösen des Transformatorhauptschalters.

Die AEG hat für die Kühlung von Glasgleichrichtern durch den Lüfter eine ihr patentierte Schaltung¹ darin angegeben, daß der Lüfter bei abnehmender Belastung gewollt abgeschaltet wird. Dadurch wird der Wirkungsgrad des Gleichrichters verbessert, und zwar weil die Höhe des Verlustes beeinflußt wird. Abb. 182 zeigt den Verlauf des Spannungsabfalles in einem 150 A Glaskörper ohne und mit Kühlung. Der Spannungsabfall in diesem Glaskörper verläuft bei stillstehendem Lüfter bei

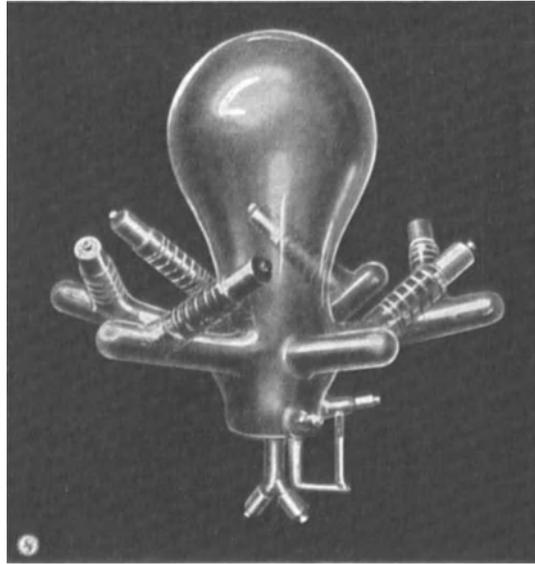


Abb. 181. Glasgleichrichtergefäß (sechsamig) für Spritzzündung (S. S. W.).

¹ Müller, G. W.: Der Wirkungsgrad des Glas-Gleichrichters und seine Beeinflussung durch die Kühlung. AEG-Mitt. 1924, H. 7.

einer Belastung von 0 bis 70 A nach der Kennlinie 1. Wird die Belastung gesteigert und der Lüfter zugeschaltet, so ändert sich der Spannungsabfall von 0 bis 150 A nach Kennlinie 2. Da der Verlust im Gleichrichter gleich ist Spannungsabfall \times Belastungsstromstärke, kann also

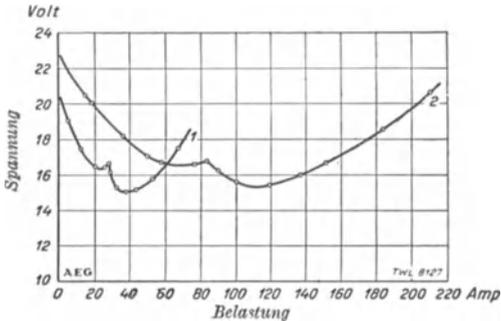


Abb. 182. Spannungsabfall in einem 150-A-Glaskolben ohne Lüfterkühlung (1), mit Lüfterkühlung (2).

auf diese Weise im Laufe eines Jahres eine beträchtliche Stromersparnis erzielt werden, sofern starke Leistungsschwankungen mit

häufiger Belastungsabnahme unter 40 vH, also unterhalb des Kreuzungspunktes der Kennlinien 1 und 2 vorkommen, an dem dann der Lüfter selbsttätig abgeschaltet wird. Das Zu- und Abschalten erfolgt durch ein entsprechend

durchgebildetes Relais. Andere Firmen, z. B. S.S.W. benutzen an Stelle des Relais eine Drosselspule, die bei einem bestimmten Stromdurchgange den Lüfter in Betrieb setzt und umgekehrt.

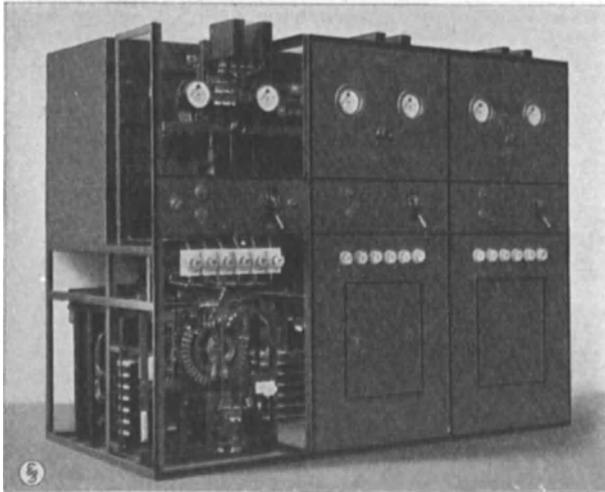


Abb. 183. Glasgleichrichteranlage für 3×200 A. Vorderansicht. Vorderverkleidung des ersten Schrankes abgenommen.

Die Schaltanlage. Da eine vollständige Gleichrichteranlage mit ihren Nebengeräten nach feststehenden Regeln zusammengefügt sein muß, sind von jeher die Glasgleichrichter in der Form schalttafelähnlicher Schränke gebaut worden, in denen sämtliche Zubehörteile untergebracht werden. Die Schränke besitzen Anschlußklemmen für den zugeführten

Dreh- oder Wechselstrom, Gleichstromklemmen für das Gleichstromnetz und eine Klemme zum Anschluß der Erdleitung, so daß die Montage sehr einfach ist. Werden mehrere solcher Schränke nebeneinander gestellt zur Parallelarbeit mehrerer Gleichrichter, so bildet das Ganze eine gut aussehende Schalttafel. Zur Montage der fertigen Anlage gehört dann nur noch die Anordnung des zugehörigen Leistungstransformators und die Durchbildung der Hochspannungsseite. Diese erfolgt in der gleichen Form wie jede andere Hochspannungsanlage. In Abb. 183 und 184 ist eine Anlage von drei Gleichrichtern je 200 A bei 240 V in der Vorder- und Rückseite gezeigt,

Der Aufbau der Gleichrichterschränke ist aus der Abb. 183 und 184 leicht zu ersehen. Die Glaskörper sind nur zwecks Darstellung sichtbar

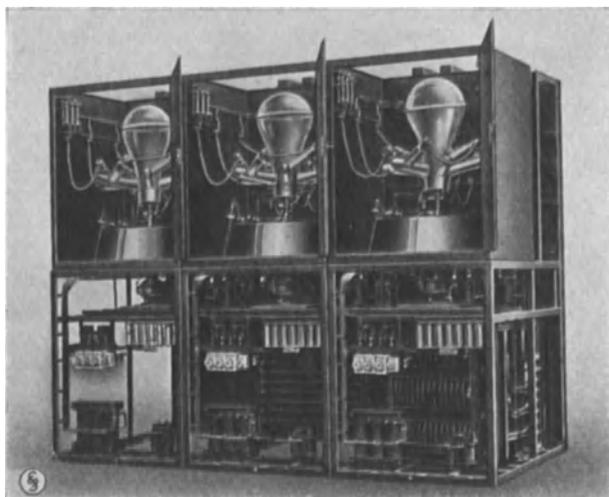


Abb. 184. Glasgleichrichteranlage für 3×200 A. Rückansicht. Zellen geöffnet.

wiedergegeben. Im Betriebe sind dieselben auch nach rückwärts durch eine Blechverkleidung abgeschlossen. Abb. 185 zeigt ein Schaltbild für zwei Dreiphasen-Gleichrichter, die in Parallelschaltung an einem gemeinsamen Haupttransformator liegen. Bei *a* befindet sich der Kabelanschluß der Drehstromseite. Von hier aus führen die Leitungen zum dreipoligen Schalter *Sch*₁, mit Überspannungsableitern an den Ausschaltkontakten. Dieser dient zum Ein- und Ausschalten des Gleichrichters. Vom Schalter führen die Leitungen nach dem Regeltransformator *Reg.Trf*. Vom Regeltransformator geht der Strom durch den Regelschalter über die Anodensicherungen und die Anodendrosselspulen an die Anodenschlüsse des Kolbens. In der Kathode vereinigen sich die drei Halbwellen des Drehstromes zum Pluspol des Gleichstromes. Die Plusleitung führt über das Motorrelais, die Kathodendrosselspule und den Nebenschluß *N*. für den Strommesser zum zweipoligen Hebelwähler *Sch*₁ und

dann ins Gleichstromnetz. Von der Minusklemme geht der Strom zum Hebelschalter Sch_2 , und von dort in den niederspannungsseitigen Nullpunkt des Haupttransformators.

In den Nebenstromkreisen, die von einer Hilfswicklung des Regeltransformators Strom erhalten, liegen der Lüfter, dessen Motor an das Motorrelais angeschlossen ist, und der Erregertransformator. In der Unterspannung des Erregertransformators liegen die Erregerdrosseln.

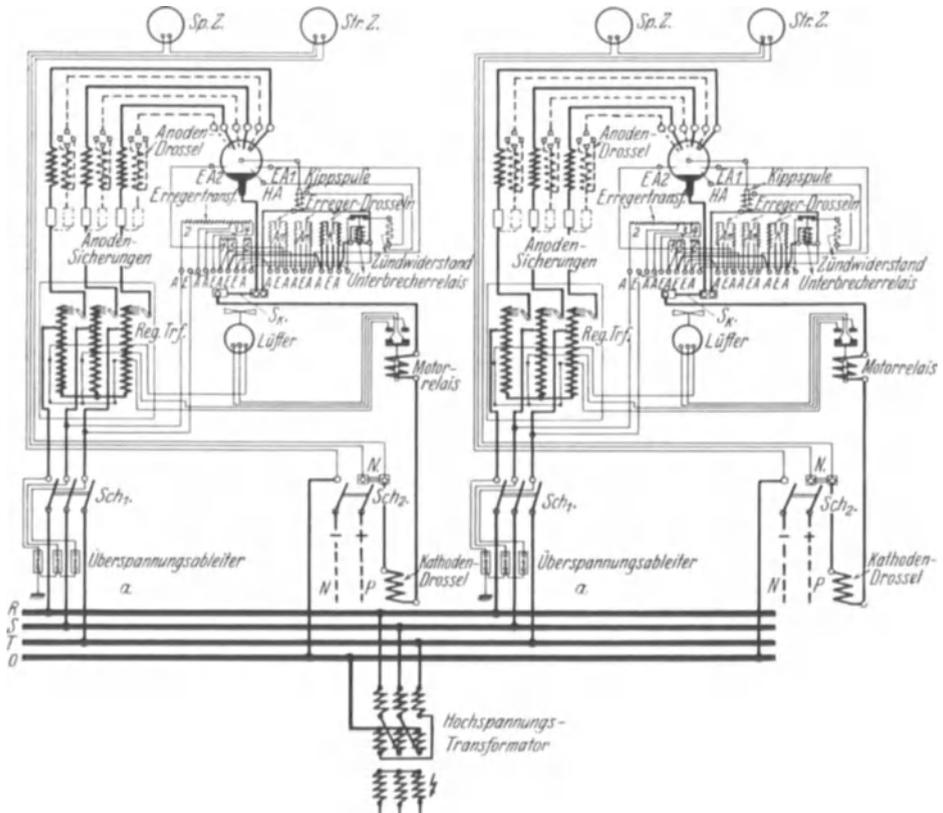


Abb. 185. Schaltbild für eine Glasgleichrichteranlage mit gemeinsamem Haupttransformator.

Der Zündkreis besteht aus dem Unterbrecherrelais, dem Zündwiderstande der Kippspule, den Erregeranoden $E.A._1$ und $E.A._2$ und der Hilfsanode $H.A.$

Besonders zu erwähnen ist noch die durch den Lüfter gekühlte Sicherung S_k in der Gleichstrom-Plusleitung, die als Überlastungsschutz dient. Überstromsicherungen auf der Drehstromseite der Gleichrichter selbst sind nicht verwendet. Die überspannungsseitige Schaltung des Haupttransformators weist keine Abweichungen gegenüber der üblichen auf.

Aus dem Schaltbilde an besonderen Schaltgeräten zu erwähnen sind die Anodendrosselspule b und die Gleichstromdrosselspule p .

Die Anodendrosselspule. Wie bereits gesagt, ist der Spannungsabfall bei allen Belastungen im Lichtbogen stets unverändert, die Gleichspannung wird also bei zunehmender Belastung annähernd in gerader Linie verlaufen. Da eine gute Stromverteilung auf die einzelnen, im Parallelbetriebe befindlichen Stromlieferer nur dann zu erreichen ist, wenn die Spannung bei zunehmender Belastung abfällt, wird auf der Primärseite die Anodendrosselspule vorgeschaltet. Dann erhält man einen Spannungsverlauf nach den Linien a bis c der Abb. 167. Der Gleichrichter besitzt also die Kennlinie einer Nebenschlußmaschine.

Schwierigkeiten bei der Parallelschaltung mehrerer Glaskörper sind bei richtiger Anwendung der Drosselspulen nicht zu erwarten.

Die Gleichstromdrosselspule — auch Kathoden- oder Glättungs-drosselspule genannt — dient dazu, die bei der Gleichrichtung noch vorhandene geringe Welligkeit auszugleichen, damit bei Stromstößen Spannungsspitzen und bei vorhandenen Fernsprechanlagen Gesprächsstörungen vermieden werden. Sie wird zweckmäßig nur dort verwendet, wo die Verhältnisse der Gleichrichteranlage es erfordern, denn in einer großen Anzahl von Anlagen ist die Gleichstromdrosselspule nicht nötig, z. B. für Batterieladung und Gleichrichter, die parallel zu einem Generator geschaltet sind. Bei Fortfall der Spule wird eine Stromersparnis erzielt von etwa 100 bis 400 W je nach Größe des Gleichrichters.

Für die erwähnten Fernsprechstörungen genügt unter Umständen die Glättungsdrossel allein nicht. Es müssen dann besondere Untersuchungen angestellt werden sowohl hinsichtlich der Isolation und der Leitungsverlegung der gesamten Fernsprechanlage, die nach jeder Richtung einwandfrei sein muß, als auch der Benutzung von Schwingungskreisen und ähnlichen Zusatzgeräten.

40. Der Eisengleichrichter und seine Schaltanlage.

a) **Der Aufbau.** Über eine bestimmte Stromstärke hinaus ist die Benutzung eines Glaskolbens nicht mehr möglich. Dazu kommt die verhältnismäßig kurze Lebensdauer des Glaskolbens selbst und seine Zerbrechlichkeit. Man ist daher schon bald nach der Durchbildung des Glasgleichrichters dazu übergegangen, den Glaskolben durch ein Metallgefäß zu ersetzen, dessen Abmessungen beliebig groß gewählt werden können, und hat so den Eisengleichrichter als Großgleichrichter geschaffen, der heute ebenfalls weiteste Verbreitung gefunden hat.

Von den verschiedenen Bauformen soll im folgenden kurz der B.B.C.-Großgleichrichter beschrieben werden. Ganz allgemein ist Anlage und Betrieb eines Eisengleichrichters wesentlich abweichend von demjenigen eines Glasgleichrichters und zwar in der Hauptsache hinsichtlich Aufrechterhaltung der Luftleere im Gleichrichtergefäß und der Kühlung der Anoden. Abb. 186 zeigt den Schnitt durch den B.B.C.-Großgleichrichter.

Das eigentliche Gleichrichtergefäß besteht aus zwei zylindrischen Hohlkörpern aus geschweißtem Stahlblech mit wagerecht anschließenden

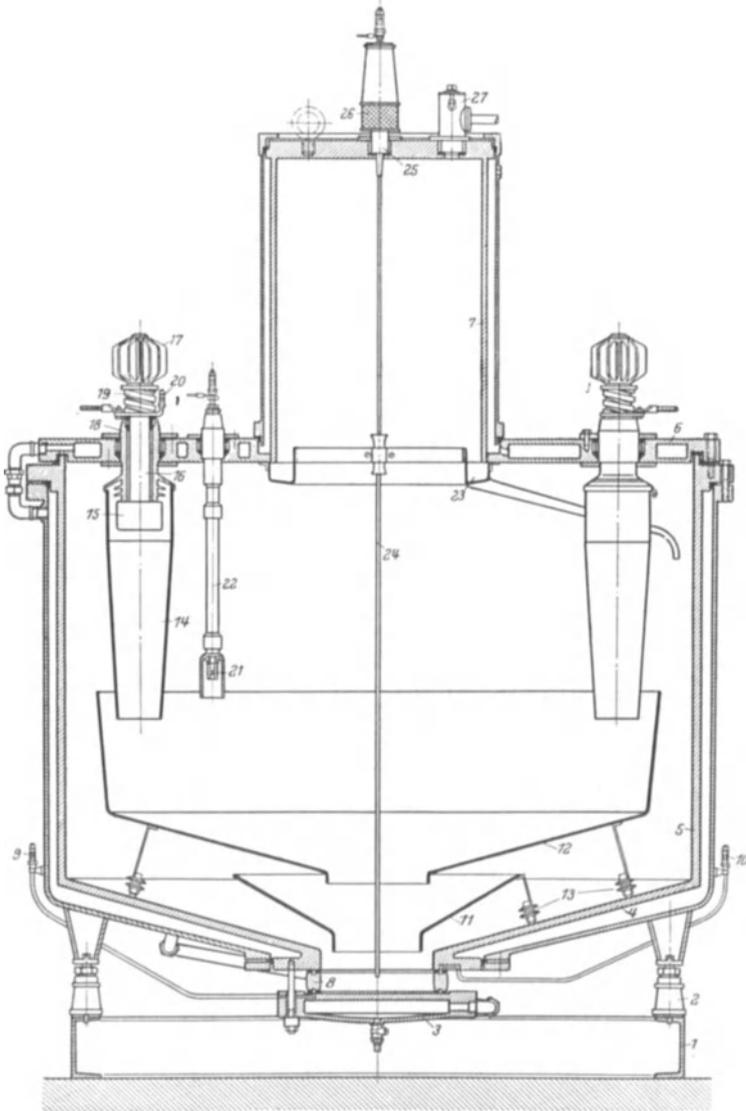


Abb. 186. Schnitt durch einen B.B.C.-Eisen-Großgleichrichter.

- | | | |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 Sockel | 10 Quecksilberstands-Anzeiger | 19 Feder |
| 2 Stützisolator | 11 Trichter | 20 Quecksilberstands-Anzeiger |
| 3 Kathodenplatte | 12 Sammler | 21 Elektrode |
| 4 Zylinderbodenplatte | 13 Stützisolatoren | 22 Erregeranode |
| 5 Zylindermantel | 14 Anodenhülse | 23 Quecksilberfänger |
| 6 Anodenplatte | 15 Elektrode | 24 Zündstange |
| 7 Kühlraum | 16 Leitungsbolzen | 25 Zündstangenisolator |
| 8 Kathodenisolator | 17 Luftkühler | 26 Solenoid |
| 9 Quecksilberstands-Anzeiger | 18 Anodeneinführungsisolator | 27 Vakuumhahn. |

dicken, ebenen Stahlplatten. Der untere Zylinder ist der Arbeitszylinder, während der schmalere obere als Kühl- oder Kondensationszylinder dient. Die Bodenplatte des Arbeitszylinders ist zur Aufnahme der isolierten Quecksilberkathode entsprechend ausgehöhlt, während der obere Abschluß die Anoden, die sich um den Kühlraum gruppieren, aufnimmt. Der Kühlzylinder ist lediglich dazu bestimmt, die erzeugte Wärme abzuführen und die von der Kathode aufsteigenden Quecksilberdämpfe wieder verdichtet niederzuschlagen. Der Deckel des Kühlraumes trägt eine Aufhängeöse, ferner den Anschlußstutzen der Vakuumleitung und die zum Anlassen notwendige isolierte Zündanode. Der Gleichrichter läßt sich nur an einer Stelle durch Abheben der Anodenplatte mit dem Kühlraum vom Arbeitszylinder öffnen. Der ringförmige Anodenträger ist mittels Schrauben gegen den unteren Arbeitszylinder gepreßt und wird durch Quecksilber vollkommen gasdicht abgeschlossen. Die Öffnung des Zylinders an dieser Stelle soll nur in Ausnahmefällen zwecks Vornahme größerer Untersuchungen erfolgen.

Am oberen Teil der Anodenbolzen werden die Zuleitungen vom Transformator angeschlossen. Anode und Zuleitungsbolzen sind infolgedessen gegen die Anodenplatte durch Porzellankörper sorgfältig isoliert. Dieser Isolator ist über der Anode schirmförmig ausgebildet. An diesem Schirm ist eine zylindrische Eisenblechbüchse befestigt, welche die Anode umgibt und zur Führung des Lichtbogens gegen die Kathode dient. Ihre untere Öffnung mündet in einen Sammeltrichter aus Blech, durch dessen mittlere Öffnung der Lichtbogen über einen zweiten kleineren Trichter zur Kathode gelangt. Die Anodenplatte trägt außer den Haupt- noch zwei kleine Hilfsanoden, welche zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft bei stark schwankender Belastung dienen. Schädlichen Entladungen zwischen den Anoden und neutralen Gefäßteilen ist durch eine technisch wohl durchgebildete Isolation der Kathode vorgebeugt. Die Gesamtbauart gestattet eine leichte, auch von ungeübter Hand durchführbare Auswechslung etwa schadhaft gewordener Einzelteile.

Als Baustoff für die Anoden wird besonders reines Eisen verwendet, das nicht während des Betriebes Gase freigibt, die die Wirkung des Lichtbogens beeinträchtigen können. Die Führung der Lichtbögen zwischen Anoden und Kathode erfolgt zwangsläufig durch Leitröhren aus Porzellan oder neuerdings aus Eisenblech, die an einem kurzen Porzellanisolator befestigt sind. Durch reichliche Bemessung der Anoden, Anbringung von Porzellanschirmen und Entfernung der zerbrechlichen Isolatoren aus der Bahn der Lichtbögen werden Kurzschlüsse und Rückzündungen vermieden.

Ein Zündsolenoid ermöglicht das Heben und Senken der Hilfsanode, die aus einem im Innern desselben angebrachten zylindrischen Eisenkörper besteht, der mit einem durch das ganze Arbeitsgefäß hindurchragenden Eisenstab verbunden ist. Am unteren Ende dieses Eisenstabes befindet sich die Zündanode etwa 10 mm über der Kathodenoberfläche.

Das Anlassen geschieht wiederum in der Weise, daß man mit Hilfe des Solenoids die Zündanode, die über einen Widerstand mit dem Plus-

pol einer Gleichstromhilfsquelle in Verbindung steht, ganz kurz mit der Kathode in Berührung bringt. Beim Zurückgehen der Zündanode bildet sich ein kleiner Lichtbogen, der das Einsetzen der Haupt- oder Arbeitslichtbögen veranlaßt. Praktisch beschränkt sich der Anlaßvorgang auf das Betätigen eines Druckknopfes für den Zündstromkreis und eines Hebelschalters für den Belastungswiderstand und nimmt nur wenige Sekunden in Anspruch.

In Fällen starker Schwankung des Belastungsstromes werden die bereits erwähnten Hilfsanoden zur Erzeugung eines etwa 5 A verbrauchenden Erregerlichtbogens an eine Hilfsstromquelle angeschlossen. Wenn die Fremderregung mittels Gleichstrom geschieht, so ist nur eine Hilfsanode erforderlich, bei Wechselstrom werden beide angeschlossen. Die Gleichrichterzylinder werden für gewöhnlich mit zwei Hilfsanoden geliefert, so daß die Fremderregung durch Gleich- oder Wechselstrom auch nachträglich angebracht werden kann (Abb. 187 und 188).

Da die Oberfläche des Kühldomes zur Abführung der erzeugten Wärmemenge nicht ausreicht, ist eine künstliche Kühlung durch Wasser vorgesehen. Um die Wandungen des Domes sind Blechmäntel gelegt; der hierdurch gebildete Hohlraum ist zur Aufnahme des Kühlwassers bestimmt. Die Zuführung des Wassers erfolgt in der Bodenplatte des Gleichrichters. Ein unterhalb der Kathode angebrachter Doppelboden gestattet in einfacher Weise die Kühlung dieser heißesten Stelle. Nachdem das Wasser noch den Arbeits- und Kondensationszylinder umflossen hat, tritt es am oberen Ende des Gleichrichters wieder aus. Über die Kühleinrichtung wird auf S. 243 gesprochen werden. Außer dem Dom werden bei Gleichrichtern für größere Leistung auch noch die Anoden gekühlt. Jede Anode erhält einen isoliert aufgesetzten Anodenkühler aus Wellblech, der so bemessen ist, daß die Temperatur unter 60°C bleibt. Bei der kleineren Type erfolgt die Anodenkühlung mittelbar durch ausgiebige Kühlung des Anodenträgers, so daß die Temperatur nahezu auf Raumtemperatur gehalten und eine Verdampfung des Dichtungsquecksilbers verhindert wird.

Jede Gleichrichteranlage benötigt ferner als Zubehör einen **Luftpumpenmaschinensatz** zur Erzeugung der Luftleere. Hierin besteht ein wesentlicher Unterschied in der Anlage eines Großgleichrichters gegenüber derjenigen eines Glasgleichrichters. Für die Luftpumpe wird zumeist ein Hochvakuum-Maschinensatz benutzt, der aus einer umlaufenden Vorvakuumpumpe in Reihe mit einer ruhenden Quecksilber-Hochvakuumpumpe besteht. Die Ausführung ist bei den verschiedenen Lieferfirmen verschieden. Die Luftleere im Gleichrichtergefäß muß bis auf 0,0001 mm Quecksilbersäule getrieben werden, um alle Luft- und Gasreste zu beseitigen, die sonst den Ionisationsvorgang ungünstig beeinflussen und die Sperrwirkung der Anoden vermindern.

Das Mitlaufen der Luftpumpe ist nur für die erste Betriebszeit erforderlich. Nach einigen Monaten Betriebsdauer sind sämtliche Restgase aus dem Zylinder entfernt (Formierung des Zylinders), so daß dann ein längerer Betrieb ohne Luftpumpe möglich ist. Der Zylinder

wird geschlossen und sich selbst überlassen. Die gasverzehrende Wirkung der Arbeitslichtbögen vermag dann die erforderliche Luftleere selbst zu erhalten. Hierbei ist allerdings Voraussetzung, daß der Zylinder tatsächlich gasdicht ist, was heute bei allen erstklassigen Gleichrichtern im weitgehendsten Maße der Fall ist. Verschiedene Sicherungseinrichtungen elektrischer und mechanischer Art gestatten den aufsichtslosen Betrieb der Luftpumpe. Da durch das Austreten von Öl und das Nachdringen von Luft bei unbeabsichtigter Stillsetzung der Pumpe der Betrieb des Gleichrichters gefährdet werden könnte, ist dieser Frage ganz besondere Aufmerksamkeit geschenkt worden.

b) Die Zündung und Erregung beim Eisengleichrichter ist nicht in gleich einfacher Weise herbeizuführen wie beim Glasgleichrichter. Wie auf S. 239 bereits kurz angegeben, wird beim Eisengleichrichter

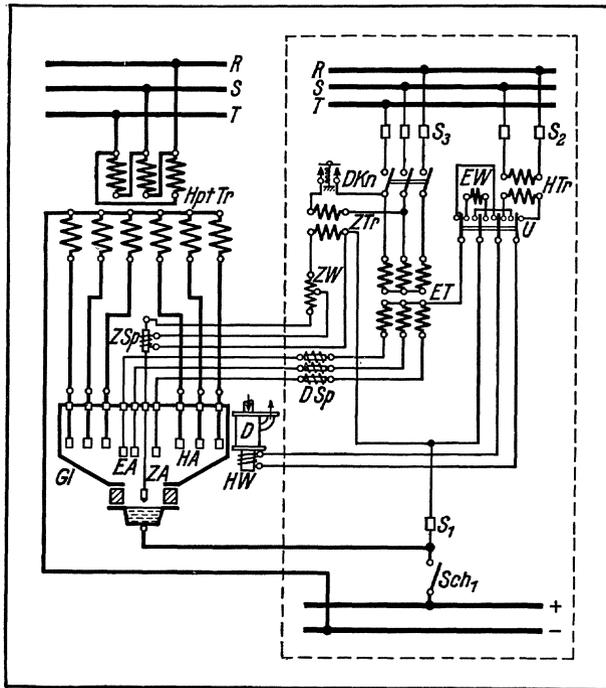


Abb. 187. Schaltbild für Wechselstromzündung.

D Quecksilberdampfpumpe, *DKn* Druckknopf, *DSp* Drosselspule, *EA* Erregeranoden, *ET* Erregertransformator, *EW* Erregerwiderstand, *Gl* Gleichrichtergefäß, *HA* Hauptanoden, *HptTr* Haupttransformator, *HTr* Hilfstransformator, *HW* Heizwiderstand, *S₁, S₂, S₃* Sicherungen, *Sch₁* Gleichstromschalter, *U* vierpoliger Umschalter, *ZA* Zündanode, *ZSp* Zündspule, *ZTr* Zündtransformator, *ZW* Zündwiderstand.

eine Zündanode benutzt, die durch ein Solenoid mittels Druckknopfschalter an eine Hilfsspannung gelegt wird. Beim Zünden taucht sie in das Kathodenquecksilber ein, dabei wird dann die Spule kurzgeschlossen und durch Federkraft wieder zurückgezogen. Der Abreißfunke stellt den Lichtbogen zwischen besonderen, bereits unter einer

Hilfswchelspannung stehenden Erregeranoden und der Kathode her. Dadurch wird der Gleichrichter gezündet. Das Schaltbild in der Ausführung der S. S. W. zeigt Abb. 187. Auf Einzelheiten soll nicht näher eingegangen werden. Diese Art der Zündung bezeichnet man als Wechselstromzündung und -erregung. Sie wird häufig angewendet

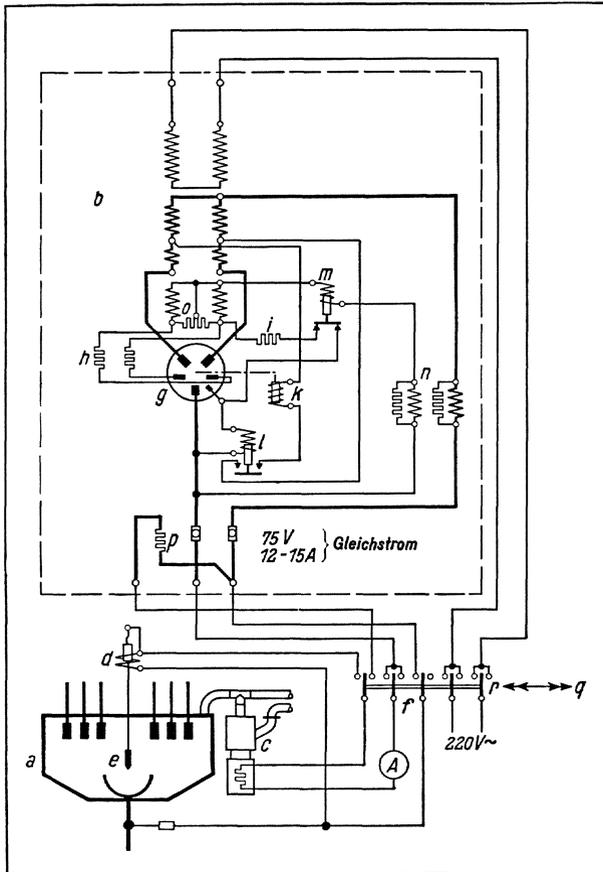


Abb. 188. Schaltbild für Gleichstromzündung.

a Großgleichrichter, *b* Hilfsgleichrichter, *c* Quecksilberdampf-pumpe, *d* Zündspule, *e* Zündnadel, *f* Umschalter, *g* Glaskörper, *h* Erregerwiderstände, *i* Zündwiderstand, *k* Kippmagnet, *l* Kipprelais, *m* Abschaltrelais, *n* gemeinsame Erreger- und Kathodendrosselspule, *o* Überspannungsschutz-widerstand, *p* Ersatzwiderstand beim Entgasen, *q* Schalterstellung Entgasen, *r* Schalterstellung Betrieb.

und hat sich durchaus bewährt. Besondere Einrichtungen sind nicht erforderlich. An sich ist diese Art der Zündung und Erregung nichts anderes als die Benutzung gewissermaßen eines besonderen Hilfsgleichrichters im Hauptgleichrichter, der mit letzterem die Kathode gemeinsam hat.

Wie aus Abb. 187 ersichtlich sind im Gleichrichtergefäß 3 Erregeranoden *EA* und eine Zündanode *ZA* unterzubringen. Das bedeutet

4 isolierte und vakuumdichte Einführungen. Um diese zu vermeiden, sie beziehungsweise auf eine zu beschränken und damit die Bauart einfacher zu gestalten, ist eine andere Zündungs- und Erregerdurchbildung zu erwähnen, bei der der Zündanode gleichzeitig die Erregung zugewiesen wird (Gleichstromzündung). Der Erregerstrom wird dann von einem besonderen, getrennt aufgestellten kleinen Einphasengleichrichter geliefert. Auch hierfür ist der Vollständigkeit wegen ein Schaltbild in Abb. 188 gezeichnet.

Der Glasgleichrichter ist für eine Gleichspannung von 75 V bemessen, er kann bis zu 15 A dauernd hergeben. In der Regel genügt ein Erregerstrom von etwa 10,5 bis 12 A, dabei gehen etwa 10 bis 15 V im Lichtbogen verloren, während etwa 60 V im Heizwiderstand der Quecksilberpumpe verbraucht werden. Für Nebenzwecke (z. B. Erregung der Spannungsspulen von Rückstromrelais, für Ladung kleiner Hilfsmeldebatterien, für elektrische Messung der Luftleere u. a.) stehen dann noch etwa 200 bis 250 W zur Verfügung. Es ist dabei zu beachten, daß der Erregerglasgleichrichter naturgemäß das Potential der Kathode annimmt und daher, ebenso wie der etwa angeschlossene Nebenverbrauch, entsprechend isoliert sein muß. Da der Hilfs-Glasgleichrichter selbsttätige Kippzündung erhält, zündet er selbst und mit ihm der zugehörige Großgleichrichter ohne weiteres, sobald die Hilfsspannung (220 V Wechselstrom) eingeschaltet wird oder nach einer etwaigen Unterbrechung wiederkehrt. Die Bedienung ist damit auf das geringste Maß zurückgeführt. Der Hilfsgleichrichter ist mit seinem gesamten Zubehör auf einem Gestell aufgebaut, das leicht in der Schaltanlage oder an irgendeiner anderen passenden Stelle des Gleichrichterraumes untergebracht werden kann, zumal seine Abmessungen sehr klein sind; bei etwa 400×400 mm Grundfläche beansprucht er etwa 900 mm in der Höhe. Falls die Lichtwirkung des Gleichrichterkolbens im Aufstellungsraum unerwünscht ist, kann sie mit Hilfe eines Blechschirmes abgeblendet werden.

Ausführungen mit Gleichstromzündung, bei denen besondere Zündungseinrichtungen bei schwankenden Betriebsverhältnissen mitlaufen müssen, sind betrieblich ungünstiger und verwickelter und werden daher heute nicht mehr benutzt.

c) **Die Kühlung.** Da der Gleichrichter als ruhender Umformer keine mechanisch bewegten Teile besitzt, kann seine Verlustwärme nicht durch die Lüfterwirkung der Drehbewegung abgeführt werden. Es muß vielmehr auch hier wiederum eine künstliche Wärmebeseitigung zur Anwendung kommen. Diese künstliche Kühlung, die sich auf die Kathode, den Arbeitszylinder, die Anoden und den Kühlraum zu erstrecken hat, wird durch fließendes Wasser vorgenommen. Mit Rücksicht auf die zulässige Beharrungstemperatur des Gleichrichters, die im allgemeinen bei 50°C liegt, muß die Kühlung unbedingt sicher erfolgen. Sie wird überwacht durch ein Kontaktthermometer, das bei Überschreiten der zulässigen Temperatur um etwa 2 bis 3 vH eine Meldevorrichtung betätigt und beim weiteren Wachsen der Temperatur den Primärschalter zur Auslösung bringt.

Je nach den vorhandenen Wasserverhältnissen, der Größe der Anlage, dem Wasserpreise, der Beschaffungsmöglichkeit und den Druckverhältnissen werden drei verschiedene Kühlformen ausgeführt und zwar:

- a) die unmittelbare Kühlung durch Frischwasser,
- b) die mittelbare Kühlung durch Frischwasser,
- c) die Rückkühlung mit natürlichem oder künstlichem Luftzuge.

Die Form a) ist die einfachste und billigste, setzt aber voraus, daß Wasser in genügender Menge und guter Beschaffenheit dauernd vorhanden ist. Da der Gleichrichter gegen Erde isoliert sein muß, ist mit Rücksicht auf den Erdschlußstrom und die dadurch entstehenden Korrosionen diese unmittelbare Kühlung nur bis etwa 2000 V Gleichspannung zu verwenden. Zur Isolierung des Gleichrichters wird in die Wasserzuführungsleitung ein Gummischlauch von solcher Länge eingefügt, daß die Wassersäule in ihm einen genügend großen elektrischen Widerstand bietet. Das Kühlwasser darf keine aggressiven Eigenschaften besitzen und keinen zu hohen Härtegrad, um die Kühlleitungen am Gleichrichter nicht mit der Zeit zu gefährden bzw. durch Ausfällungen zu verstopfen.

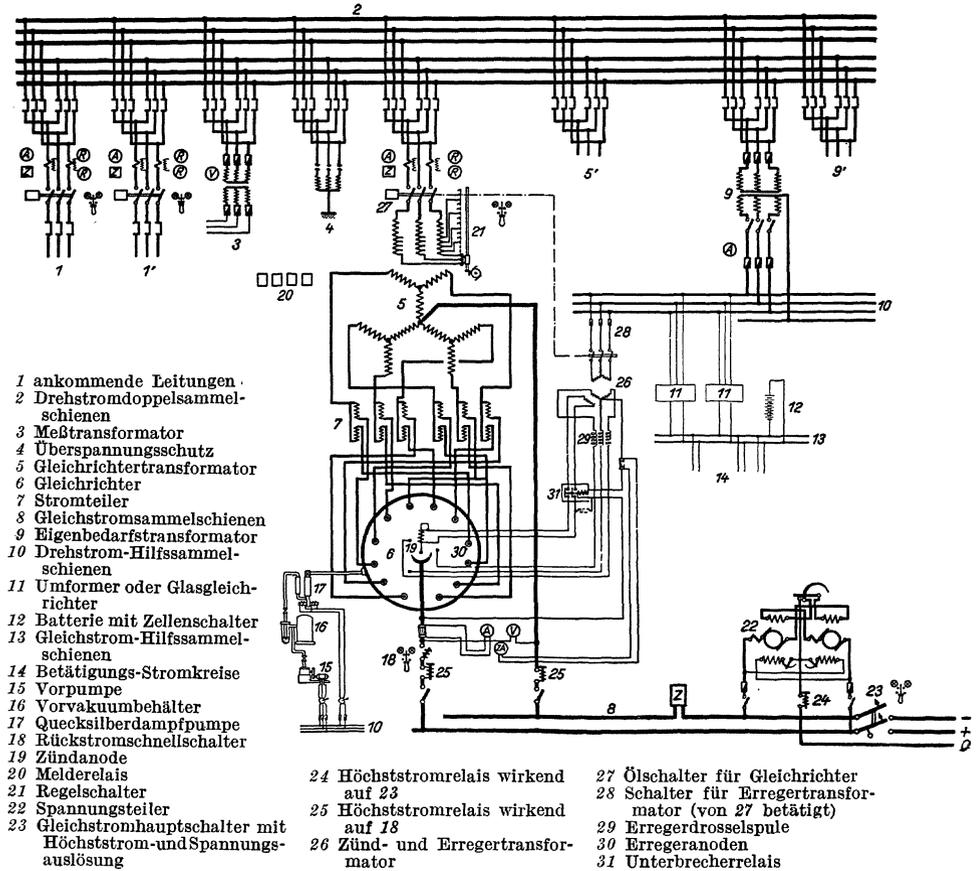
Der Kühlwasserbedarf beträgt je nach der Bauform und der Amperezahl etwa 1 Liter in der Minute für 100 A Gleichstrom bei 15° C Wassereintrittstemperatur und etwa 50° C Gleichrichterbeharrungstemperatur.

Die Form b) wird angewendet, wenn ungeeignetes Kühlwasser, also solches mit gebundenen und freien Beimengungen (hoher Härtegrad, Schlamm usw.) benutzt werden muß. Hier werden die Kühlräume des Gleichrichters mit gutem, reinem Wasser gefüllt und dieses Wasser durch eine Umwälzpumpe über einen Rückkühler getrieben, der im Gegenstrom außen vom vorhandenen Wasser umspült wird. Muß der Gleichrichter ständig im Betriebe sein, stehen also keine Betriebspausen für die gelegentliche Reinigung des Rückkühlers zur Verfügung, so wird die Kühlleitung derart umschaltbar eingerichtet, daß für die Zeit der Kühlerreinigung der Gleichrichter mit Frischwasser gekühlt wird. Für die Anwendung mit Rücksicht auf die Höhe der Gleichspannung und den Kühlwasserbedarf gilt das gleiche wie für Form a). Je nach der Betriebsdauer wird die Nachfüllung mit gutem Wasser (etwa 1 bis 2 Liter) etwa jeden Monat erforderlich sein.

Die Form c) schließlich wird notwendig einmal bei höherer Gleichspannung als 2000 V, um einen Erdschluß durch das Kühlwasser sicher zu vermeiden und dann dort, wo entweder nur sehr schlechtes oder sehr wenig Kühlwasser überhaupt oder sehr teures Kühlwasser zur Verfügung steht. Es tritt an Stelle des Rückkühlers der Form b) ein wesentlich größerer Rückkühler, der entweder nur durch die umgebende Luft oder durch künstlich verstärkte Frischluftzuführung gekühlt wird. Die natürliche Wärmeabführung aus dem Rückkühler kommt nur selten vor, denn sie bedingt eine gute Wärmeabführung aus dem Aufstellungsraume des Kühlers. Diesen im Freien unterzubringen empfiehlt sich nicht, da im Sommer die Wärmeabführung zu gering sein kann, im

Winter bei Betriebsunterbrechungen oder bei geringer Belastung des Gleichrichters über einen längeren Zeitraum Frostgefahr besteht.

Die künstliche Belüftung des Rückkühlers wird dergestalt durchgebildet, daß ein Schleudertlüfter einen starken Luftzug um den entweder mit ihm zusammengebauten oder über eine Rohrverbindung mit ihm zusammengeschalteten Rückkühler treibt. Hierfür gilt sinngemäß



- 1 ankommende Leitungen
- 2 Drehstromdoppelsammel-schienen
- 3 Meßtransformator
- 4 Überspannungsschutz
- 5 Gleichrichtertransformator
- 6 Gleichrichter
- 7 Stromteiler
- 8 Gleichstromsammelschienen
- 9 Eigenbedarfstransformator
- 10 Drehstrom-Hilfssammel-schienen
- 11 Umformer oder Glasgleich-richter
- 12 Batterie mit Zellschalter
- 13 Gleichstrom-Hilfssammel-schienen
- 14 Betätigungs-Stromkreise
- 15 Vorpumpe
- 16 Vorvakuumbehälter
- 17 Quecksilberdampfpumpe
- 18 Rückstromschnellschalter
- 19 Züdanode
- 20 Melderelais
- 21 Regelschalter
- 22 Spannungsteiler
- 23 Gleichstromhauptschalter mit Höchststrom- und Spannungs-auslösung

- 24 Höchststromrelais wirkt auf 23
- 25 Höchststromrelais wirkt auf 18
- 26 Zünd- und Erregertransfor-mator
- 27 Ölschalter für Gleichrichter
- 28 Schalter für Erregertransfor-mator (von 27 betätigt)
- 29 Erregerdrosselspule
- 30 Erregeranoden
- 31 Unterbrecherrelais

Abb. 189. Schaltbild eines Gleichrichter-Unterwerkes für Licht und Kraft.

das im III. Absch. für die Rückkühlung des Transformatorenöles Er-läuterte. Die Anlage für einen oder mehrere Gleichrichter sind aber naturgemäß wesentlich kleiner als für einen großen Transformator.

d) Das Schaltbild und der Aufbau der Schaltanlage. Abb. 189 zeigt das vollständige Schaltbild einer Großgleichrichteranlage der AEG für Licht- und Kraftstromabgabe an ein Dreileiternetz. Für die Spannungs-teilung ist ein Gleichstrommaschinensatz benutzt. Die Gleichrichter arbeiten dabei nur auf die Außenleiter. Die Spannungsregelung, die hier vorgesehen ist, erfolgt im Nullpunkt der Transformator-Primär-

wicklung. Einer besonderen Erläuterung bedarf dieses Schaltbild nicht, da alles Wissenswerte entsprechend eingetragen ist.

Der Aufbau der Schaltanlage. Beim Eisengleichrichter nimmt das Gleichrichtergefäß durch die Berührung mit dem Lichtbogen eine positive Spannung gegenüber der Kathode an. Der Spannungsunterschied ist ein mittlerer Wert des zwischen der Anode und Kathode bestehenden Spannungsgefälles und beträgt nur wenige Volt. Trotzdem muß der Gleichrichter isoliert aufgestellt werden. Das geschieht entweder in der Form, daß der Gleichrichter mit einem Schutzgitter gegen die Berührung durch die Bedienung umgeben wird. Dann müssen sämt-

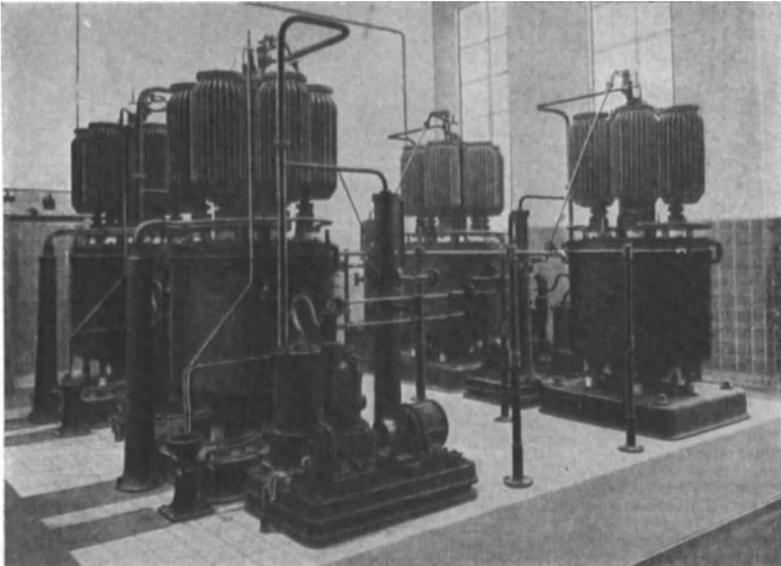


Abb. 190. Großgleichrichteranlage mit 4 Eisengleichrichtern (Brown, Boveri & Cie. AG.).

liche Bedienungsriffe für die Pumpen, die Meßgeräte und Kühlwasser-einrichtung sorgfältigst isoliert werden. Da dieser Schutz nicht immer und mit vollständiger Sicherheit gewährleistet werden kann z. B. in den Wintermonaten bei plötzlicher Temperaturänderung und ungenügender Belüftung des Gleichrichterwerkes ist die zweite Aufstellungsform mehr zu empfehlen und wird auch in der Mehrzahl der Fälle angewendet. Bei dieser steht der Gleichrichter mit seinem Zubehör auf einer isolierenden Unterlage (z. B. Asphalt-schicht mit Linoleum) oder auf Isolatoren und der Bedienungsgang ist zudem noch besonders isoliert. Um die Anoden wird dann noch ein Schutzgitter gezogen. Die Abb. 190 zeigt diese Form der Aufstellung.

Da auch der Eisengleichrichter kein Fundament erfordert, ist für die Errichtung eines derartigen Gleichrichterwerkes kein besonders guter Baugrund oder die Anlage einer teuren Fundierung erforderlich,

ein Vorteil, der oftmals sehr ins Gewicht fallen kann besonders für Werke auf ungünstigem Baugelände.

Der Aufbau der Schaltanlage für eine Eisengleichrichteranlage unterscheidet sich nicht von demjenigen für eine andere Umformergattung. Darum soll an dieser Stelle hierauf nicht näher eingegangen werden. Die Gesichtspunkte allgemeinerer Art sind für die Aufstellung der Transformatoren und ihrer Schalter im III. Abschnitt behandelt, über die sonstige Durchbildung der Schaltanlage ist im IV. Bande alles Erforderliche zu finden.

41. Die selbsttätig arbeitende, bedienungslose Gleichrichteranlage.

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, daß der Gleichrichter eine Umformergattung darstellt, die zur In- und Außerbetriebsetzung entgegen den Schalthandlungen bei den anderen Umformerbauarten nur sehr weniger Handgriffe bedarf, zumeist nur des Schließens bzw. Öffnens des Drehstrom- und des Gleichstromschalters und der Bedienung der Kühleinrichtung bei Großgleichrichtern. Diese betrieblich außerordentlich einfache Handhabung hat schon bald nach der Durchbildungsbeendigung der Gleichrichter den Gedanken nahegelegt, die ständige Bedienung vollständig zu sparen und die gesamte Anlage selbsttätig arbeiten zu lassen, zumal jedes Synchronisieren, Polarisieren usw. für die Parallelschaltung fortfällt. Die ersten Versuche mit einzelnen Gleichrichtern brachten bereits so günstige Ergebnisse in bezug auf geringste Störungszahl für die benutzten selbsttätigen Schalteinrichtungen, daß einzelne Elektrizitätswerke dazu übergehen konnten, solche Anlagen in den praktischen Betrieb einzugliedern. Die bisherigen Betriebserfahrungen sind durchaus befriedigend.

Von der ausführlichen Beschreibung einer selbsttätig arbeitenden Gleichrichteranlage soll abgesehen werden, da sich die Einzelheiten der Schalteinrichtungen auf Grund immer neuer Erfahrungen naturgemäß ständig ändern und die Baufirmen ihre Einzelheiten haben, auf die einzugehen zu weit führen würde. Es sollen daher nur kurz die für den Entwurf und den Betrieb beachtlichen Gesichtspunkte zur Behandlung kommen.

Ganz allgemein ist für die Anlage selbsttätiger Gleichrichteranlagen in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsunternehmungen nur dann Grund gegeben, wenn z. B. in einer Mittel- oder Großstadt eine größere Zahl von weit auseinanderliegenden Gleichrichterwerken erforderlich ist, die je nach den Belastungsverhältnissen abwechselnd ein- und auszuschalten sind und aus dieser Betriebsweise ein ständig zu haltendes zahlreiches Bedienungspersonal erforderlich sein würde. Hier können gegebenenfalls Ersparnisse erzielbar sein, also sich wirtschaftliche Vorteile ergeben, die beachtlich sind. Ist das nicht der Fall, dann wird die Wahl einer selbsttätig arbeitenden Anlage kaum ihre betriebliche Berechtigung haben und in solchen Netzen nicht zu wählen sein, die nur mit einer geringen Gleichrichterzahl versehen sind. Man muß

sich dabei immer vor Augen halten, daß die Öffentlichkeit bei Störungen an den Schalteinrichtungen eines Umformerwerkes kein Verständnis dafür hat, daß die Ersparnis an Betriebskosten zumal noch in Gegenüberstellung gebracht zu den Mehrkosten der Anlagen mehr bestimmend sein soll als die Betriebssicherheit bzw. rascheste Störungsbeseitigung. Das ist mit ein Grund dafür, daß sich jedenfalls in Deutschland die selbsttätig arbeitenden Gleichrichteranlagen bisher nicht nennenswert haben einführen können. Wenn sie in Amerika in größerem Umfange schon in Benutzung sind, so kann das nicht als ein Beweis für eine irrtümliche Auffassung bei uns angesehen werden. Dort wie hier sind Störungen in gleichem Ausmaß unangenehm. Es müssen dann anders geartete Betriebsverhältnisse vorliegen, die an sich schon z. B. bei elektrischen Bahnen gegeben sind. Für diese sind auch in Europa bereits selbsttätige Gleichrichteranlagen in größerer Zahl im Betriebe. Hier liegen die Anlagen bei den Haltestellen, können also jederzeit sofort auf Handbetrieb eingestellt bzw. untersucht werden, weil Bedienung immer in der Nähe ist, was für die Netzanlagen ja gerade vermieden werden soll. Dann spielt eine Stromunterbrechung nicht in gleichem Maße die Rolle wie bei der öffentlichen Elektrizitätsversorgung, da einmal Umschaltungen für die Fahrtdrahtspeisung in kurzer Zeit durchführbar sind, ferner Zugverspätungen eingeholt werden können u. dgl. mehr. Auch die etwa alle ein bis zwei Tage vorzunehmende Besichtigung und die wöchentliche gründliche Prüfung jeder Anlage läßt sich bei Bahnanlagen ohne wesentliche Kosten und leichter durchführen als in öffentlichen Netzen.

Hinsichtlich technischer Einzelheiten ist folgendes zu erwähnen:

Die Steuerung erfolgt entweder durch eine Schaltuhr bei Anlagen, die nur zu Zeiten geschaltet werden sollen also z. B. für die Deckung von Belastungsspitzen, oder des Nachts außer Betrieb zu nehmen sind. Mit der Kontaktgabe durch die Uhr wird der selbsttätige Schaltvorgang eingeleitet. Eine zweite Schaltform benutzt Relais, die in Abhängigkeit von der Spannung oder der Belastung ansprechen. Die gesamte Schalteinrichtung umfaßt auch das richtige Arbeiten der Kühlung und der Vakuumpumpe. Tritt hier eine Störung ein, so wird die ganze Anlage des betreffenden Gleichrichters gegebenenfalls stillgelegt. Es kann also zwar volle Sicherheit für den Gleichrichter mit seinen Einrichtungen gegen innere und äußere Störungsursachen gewährleistet werden, aber es fehlt bei Abschaltungen die sofortige Untersuchung oder der Eingriff von Hand. Dann können in ausgedehnteren Netzen solche Störungen durch Überlastung der anderen Anlagen weitere Ausdehnung annehmen und unter Umständen zum vollen Netzzusammenbruch führen.

Sämtliche Schalteinrichtungen werden in staubsicher gekapselter Ausführung und derart gebaut, daß auch jede Einwirkung von Feuchtigkeit bei Temperaturschwankungen im Winter vermieden wird.

42. Die ferngesteuerte und fernüberwachte Gleichrichteranlage.

Diese Ausführung unterscheidet sich von der bedienungslosen Anlage grundsätzlich dadurch, daß sie von einer Befehlsstelle z. B. von einem Kraftwerke oder einer Haupttransformatorenanlage einmal ein- und ausgeschaltet und zweitens überwacht wird. Beides ist vom betriebstechnischen Standpunkte wesentlich günstiger, denn Störungen in der Gleichrichteranlage können sofort bemerkt und durch schnellstes Eingreifen des in der Befehlsstelle vorhandenen Schaltwärters in kürzester Zeit behoben werden. Das sind die Hauptmerkmale dafür, daß sich diese schalttechnische Bauform auch in Deutschland schon in größerem Umfange hat einführen können. Sie verlangt eine Verbindung der Gleichrichteranlage mit der Befehlsstelle durch Steuer- und Meßkabel. Ob der jährliche Kapital- und Unterhaltungsdienst für diese Kabelanlagen die Mehrausgaben bei selbständiger Bedienung der Gleichrichterwerke aufwiegt, wird zwar auch hier zu wirtschaftlichen Feststellungen Veranlassung geben müssen. Ein nicht allzu großer Unterschied wird die ferngesteuerte Ausführung dennoch rechtfertigen, wenn dabei bedacht wird, daß der Gleichrichter, einmal in Betrieb gesetzt, so gut wie keinerlei weiterer dauernder Wartung bedarf und die Bedienung daher an sich über die ganze tägliche Betriebszeit keine Beschäftigung hat. Besonders wird naturgemäß die Ersparnis an Bedienung dort ins Gewicht fallen, wo eine größere Zahl von Gleichrichterwerken innerhalb eines Versorgungsgebietes vorhanden ist.

Die Fernsteuerung hat sich zu erstrecken auf:

das Ein- und Ausschalten der gesamten Anlage und die Spannungsregelung,

die Fernüberwachung auf:

die Feststellung der Spannungs- und Belastungsverhältnisse,

die Meldung jeglicher Störung an irgendeinem Teile der Gesamtanlage.

Die ferngesteuerten Schalter unterscheiden sich durch nichts Wesentliches von den motorisch- oder magnetisch-angetriebenen Schaltern in den Kraftwerken oder Transformatorenanlagen. Zur Betätigung dienen Steuerschalter mit farbigen Meldelampen für die Ein- und Ausstellung. An sich sind die Drehstrom- und Gleichstromschalter als selbsttätige Höchststromschalter auszuführen.

Die Spannungsregelung erfolgt dergestalt, daß der Spannungsregler am Transformator (der Stufenschalter) motorischen Antrieb erhält, der von der Befehlsstelle durch Druckknöpfe oder dgl. betätigt wird (Abb. 191). Ein Spannungszeiger der Fernüberwachung zeigt der Befehlsstelle an, welche Spannung gleichstromseitig an der betreffenden Stelle eingestellt ist.

Zur Fernüberwachung durch Strom- und Spannungszeiger ist nichts Besonderes zu erwähnen. Die Störungsmeldungen haben sich bei Großgleichrichtern mit Wasserkühlung auch auf Fehler in der Kühlwasseranlage zu erstrecken. Es können entweder Kontaktthermometer oder Kontaktmanometer, die bei Unterschreitung eines bestimmten Wasser-

druckes ansprechen, benutzt werden. Ferner ist das Vakuum und das ordnungsmäßige Arbeiten des Luftpumpensatzes zu überwachen.

Hinsichtlich der betriebstechnischen Einzelheiten zu solchen ferngesteuerten Gleichrichteranlagen ist noch besonders auf folgendes aufmerksam zu machen. Bei der Wahl der Steuerkabel sollte man tunlichst jede vereinfachte Schaltform unterlassen und für alle vorzunehmenden Schalthandlungen, sowie Messungen ein Adernpaar benutzen. Erspar-

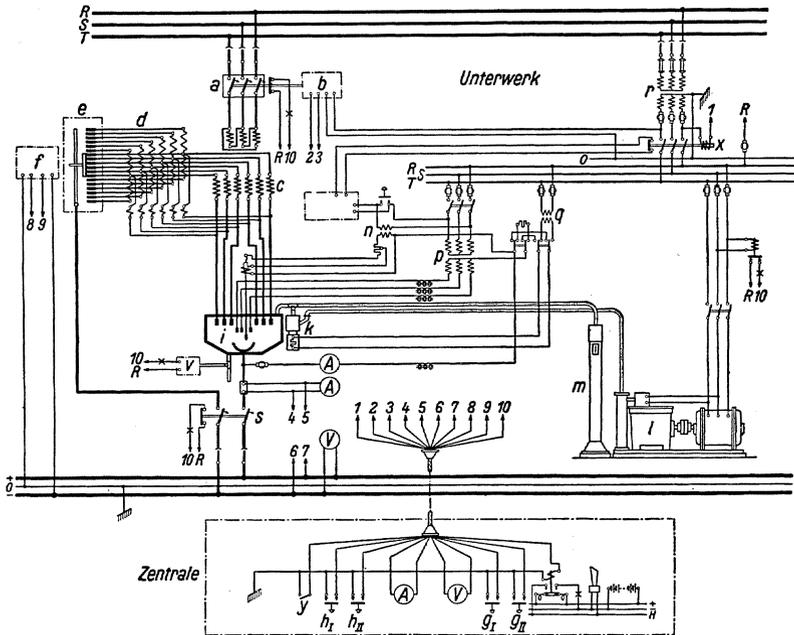


Abb. 191. Schaltung einer ferngesteuerten Groß-Gleichrichteranlage.

a Ölschalter, *b* motorischer Antrieb zum Ölschalter, *c* Haupttransformator, *d* Stufentransformator, *e* Stufenschalter, *f* motorischer Antrieb zum Stufenschalter, *g*₁ Spannung „höher“, *g*₁₁ Spannung „tiefer“, *h*₁ Ölschalter „Ein“, *h*₁₁ Ölschalter „Aus“, *i* Gleichrichter, *k* Quecksilberdampf-pumpe, *l* Vorpumpe, *m* Luftdruckmeßgerät, *n* Zündtransformator, *p* Erregetransformator, *q* Heiztransformator, *r* Hilfstransformator, *s* Überstromschalter mit Hilfskontakt, *v* Kühlwasseralarmvorrichtung mit Hilfskontakt, *x* Schütz für Hilfsstromkreise, *y* Betätigungsschalter für das Schütz.

nisse nach dieser Richtung werden in der Mehrzahl aller Fälle schon sehr bald zu Schwierigkeiten führen, die sehr unerwünscht sein können und dann zu beheben wesentlich mehr Ausgaben verursachen als den erstmaligen Anlageersparnissen entspricht. Auch Kabel-Reserveadern sollen stets vorgesehen werden, denn der Betrieb verlangt nach alter Erfahrung im Laufe der Zeit den Anschluß mancher neuen Geräte, der betriebstechnisch durchaus zweckmäßig sein könnte, aber unterbleiben müßte, weil die Verlegung neuer Kabel dann zumeist zu teuer wird.

Abb. 191 zeigt das Schaltbild einer ferngesteuerten Anlage der SSW und bedarf nach dem Gesagten keiner weiteren Erläuterung.

43. Die betrieblichen Vorteile der Gleichrichter.

Zusammengefaßt sind diese gegenüber den anderen Umformergattungen folgende:

hoher Wirkungsgrad, besonders bei hohen Spannungen und Teillasten; daher sehr guter Jahreswirkungsgrad besonders bei Betrieben mit schwankender Belastung;

günstiger Leistungsfaktor, der allerdings bis auf den Wert 1 nicht gebracht werden kann;

Unempfindlichkeit gegen Kurzschluß, große stoßweise Überlastungsfähigkeit;

Unabhängigkeit von der Frequenz;

schnellste Betriebsbereitschaft, rasche Inbetriebsetzung und Parallelschaltung wegen Fortfalls des Synchronisierens und Polarisierens, daher Ersparnis an Bedienung und weiter besondere Eignung für Fernsteuerung oder selbsttätigen Betrieb;

geringes Gewicht, Fehlen umlaufender Massen, daher Fortfall besonderer Fundamente, Möglichkeit der Aufstellung auf gewöhnlichen Decken und in Obergeschossen;

geräuschloses Arbeiten, daher Aufstellung im Stadttinnern und in bewohnten Gebäuden ohne Störung möglich;

billige Wartung, die sich bei Glasgleichrichtern auf die gewöhnliche Überprüfung, bei Eisengleichrichtern dazu noch auf Überwachen des Vakuums und des Kühlwassers beschränkt; geringe Unterhaltungskosten, da dem Verschleiß unterworfenen Teile gering an Zahl sind;

sehr hohe Lebensdauer und daher geringe Abschreibungslasten;

einfache und billige Reserve, wenn die Unterteilung der Leistung auf mehrere Gefäße zweckentsprechend vorgenommen wird.

44. Betriebs- und Wirtschaftsvergleich der verschiedenen Umformungsarten.

In Zahlentafel 14¹ sind die verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten zusammengestellt, um einen Überblick zu geben über Abmessungen, Gewichte usw. Der Betrachtung ist eine umzuformende Leistung von 1000 kW von Drehstrom in Gleichstrom zugrunde gelegt. Zu den Werten dieser Zahlentafel ist folgendes zu bemerken:

Die Frequenz des Drehstromes ist mit 50 Herz vorausgesetzt. Die Drehzahlen der einzelnen Maschinengattungen sind derart gewählt worden, 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 V gewählt. Eine besondere

¹ Die Unterlagen für die Zahlentafel 14 wurden dem Verfasser von den Siemens-Schuckert-Werken freundlichst zur Verfügung gestellt.

Regelung derselben ist nicht vorgesehen, so daß zusätzliche Einrichtungen wie Drosselspulen, Drehtransformatoren usw. unnötig sind. Das Anlassen soll von der Gleichstromseite möglich sein.

Ferner sind sämtliche Maschinensätze in ihrem elektrischen Aufbau so günstig wie 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 Zahlentafel 14 eingetragenen Maßzeichnungen ist ein Vergleich der mechanischen Ausführungen leicht durchführbar. Besonders vorteilhaft sind diese mechanischen Vergleichszahlen dann, wenn es sich um schwierige Bau- und Transportverhältnisse handelt.

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 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, wird man wohl in der Mehrzahl der Fälle den Synchron-Motorgenerator nicht wählen (siehe auch Abb. 192).

Ist der Synchronmotor nicht auf den Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ eingeregelt, so ist sein Wirkungsgrad und damit natürlich auch derjenige des Motorgenerators um durchschnittlich 1,5 vH schlechter ein Umstand, der dann besonders zu beachten ist, wenn die zugeführte elektrische Leistung an einen fremden Unternehmer zu bezahlen ist.

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. Dann ist mit Rücksicht auf eine bessere Lageraufstellung ein geschlossener Grundrahmen zu empfehlen.

Der Asynchron-Motorgenerator unterscheidet sich hinsichtlich seiner Baulänge nur unwesentlich vom Synchron-Motorgenerator. 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 Maschinensätzen 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-Motor-

generators nicht ohne weiteres von der Hand zu weisen. Auf die Leistungsfaktorverbesserung ist hier nicht Rücksicht genommen worden.

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 durch die zusätzlichen Vorrichtungen sind und die Anlagekosten verteuert werden.

Zu der Bodenfläche für den Umformer selbst ist diejenige für den Transformator hinzuzurechnen, die für den der Zahlentafel 14 zugrunde gelegten Fall etwa 4 m² 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.

Nur kurz sei erwähnt, daß dieser Umformer, wie die Maßzeichnung erkennen läßt, eine besondere Luftführung zwischen beiden Maschinen erhalten hat, um die Verluste durch Luftreibung zu vermindern. Man wählt sie in der Regel nur bei größeren Maschinen.

Die Zahlentafel 14 ist schließlich auch auf den Gleichrichter ausgedehnt und mit einer Maßzeichnung versehen worden. Das Gewicht des Gleichrichters (4600 kg) versteht sich nur für die Zylinder allein. Die Schaltschränke mit sämtlichem Zubehör sind darin nicht enthalten. Die Wirkungsgrade sind unabhängig vom $\cos \varphi$.

In Abb. 192 ist zum weiteren Vergleich der Wirkungsgradverlauf der verschiedenen Ausführungsformen einschl. der Regelvorrichtungen für Voll- und Teilbelastungen gezeichnet. Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit hat sich je nach den Betriebsverhältnissen auch auf Teilbelastungen zu erstrecken, die bei der Ermittlung des Jahreswirkungsgrades und der erzielbaren Ersparnisse im Vergleich mit den Kapitaldienstkosten die Wahl einer bestimmten Umformungsart stark beeinflussen. Dabei ist aber ganz besonders darauf aufmerksam zu machen, daß die Forderungen des Betriebes hinsichtlich der Unempfindlichkeit gegen elektrische und mechanische Betriebsvorkommnisse erfüllt werden müssen und beim Vergleich gegebenenfalls der Wirtschaftlichkeit voranzustellen sind. Diese Forderungen werden für die öffentliche Elektrizitätsversorgung stärker betont werden müssen als für Industrieanlagen, sofern es sich nicht auch bei den letzteren darum handelt, daß Störungen im Umformerbetrieb nicht vorkommen dürfen oder, falls sie vereinzelt eingetreten sind, auf die schnellste Art behoben werden müssen. Es ist hier dafür als Beispiel die elektrochemische Industrie zu nennen.

Die Inbetriebsetzung, für die nur das Anlaufen von der Drehstromseite verglichen werden soll, gestaltet sich beim Gleichrichter am einfachsten, weil das Synchronisieren fortfällt.

Soll der Umformer nach einer Störung auf ein mehr oder weniger stark belastetes Gleichstromnetz geschaltet werden, so ist auch hierfür der Gleichrichter neben dem synchronen- und asynchronen Motorgenerator besonders geeignet. Hinsichtlich der Schaltzeit ist der Gleichrichter den anderen Umformern gegenüber überlegen, da nur die Schalter zu betätigen sind. Die zulässige plötzliche Belastung muß besonders geprüft werden. Einankerumformer sind wesentlich ungünstiger und verlangen besondere Maßnahmen (Netzaufteilung usw.)¹.

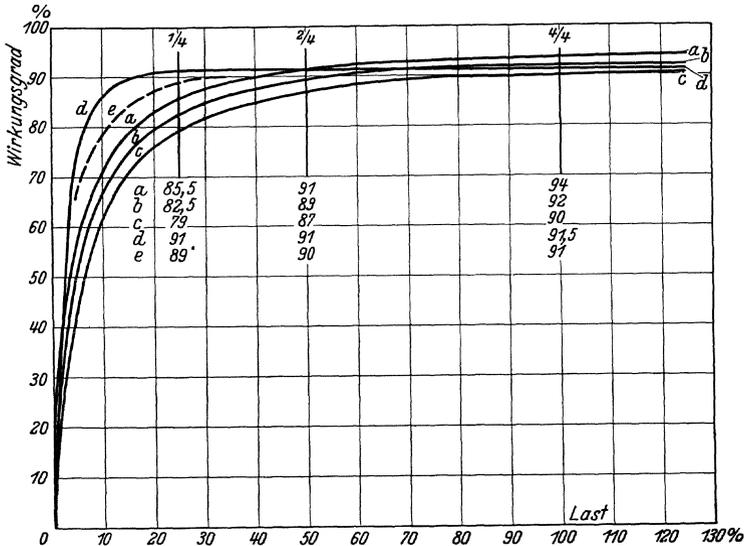


Abb. 192. Gesamter Wirkungsgrad von Umformersätzen.

Hochspannung 10 000 Volt, 50 \sim , $\cos \varphi = 1$. Gleichstrom 2×250 Volt, 1000 kW, Dreileiterbetrieb mit 30 vH Mittelleiterstrom, Spannungsregelung ± 5 vH.

a Einankerumformer mit Transformator und Drehtransformator und Spannungsteilung. b Kaskadenumformer mit Spannungsteilung. c Motorgenerator mit Spannungsteilung. d Quecksilbergleichrichter mit Stufentransformator ohne Ausgleichssatz für Spannungsteilung. e Quecksilbergleichrichter mit Stufentransformator mit Ausgleichssatz für Spannungsteilung.

Bei empfindlichem Drehstromnetz ist die plötzliche Zuschaltung von Last unter Umständen unerwünscht. Dann ist der Motorgenerator am vorteilhaftesten, weil seine Gleichstromseite unabhängig von der Drehstromseite ist. Der asynchrone Motorgenerator mit Läuferanlasser verursacht den geringsten Stromstoß. Beim Synchronmotorgenerator ist das nur zu erreichen, wenn ordnungsmäßig und gut synchronisiert wird. Die vereinfachten Anlaßverfahren von der Drehstromseite aus sind dann nicht gleichwertig. Für solche Fälle wird also zwischen Gleichrichter und Asynchron-Motorgenerator zu wählen sein. Kommt es dabei auch auf den Leistungsfaktor an, dann ist der kompensierte Asynchronmotor betrieblich am vorteilhaftesten. Hier wird die Abwägung aller Vorzüge und Nachteile beider Umformungsarten besonders sorgfältig durchgeführt werden müssen.

¹ Siehe Fußnote S. 198.

Bei unempfindlichen Drehstromnetzen wird der Synchronmotor-generator betrieblich in den Vordergrund rücken, wenn durch Stromtarifbestimmungen die Leistungsfaktorverbesserung wirtschaftliche Vorteile bietet. Mit dem Einankerumformer ist Gleiches nicht zu erreichen selbst unter entsprechender Berücksichtigung der unterschiedlichen Beschaffungskosten.

Bei Anschluß an größere Überlandnetze, in denen Spannungsschwankungen, Spannungsabsenkungen und auch Frequenzschwankungen vorkommen, ist der Gleichrichter am geeignetsten, da er gegen diese Betriebserscheinungen am unempfindlichsten ist. Auch der Asynchronmotor-generator kann hier in den Vordergrund treten. Am empfindlichsten ist der Einankerumformer und ihm annähernd gleich der Synchronmotor-generator.

Soll im Parallelbetriebe zwischen Umformer und anderen Stromquellen gleichstromseitig eine bestimmte Lastverteilung tunlichst selbständig erfolgen (Grund- und Spitzenlastübernahme), so ist der Synchron- bzw. Asynchronmotor-generator am vorteilhaftesten, weil die Gleichstromseite unabhängig von der Drehstromseite ist, und die Betriebskennlinien der Gleichstrommaschine durch besondere Mittel (Doppelschlußwicklung) entsprechenden Verlauf erhalten können.

Wird großer Gleichstrom-Spannungsregelbereich gefordert, so ist auch hier der Motorgenerator im Vorteil. Alle anderen Umformungsarten erfordern teure zusätzliche Einrichtungen auf der Drehstromseite, die zudem den Gesamtwirkungsgrad verschlechtern.

Schließlich ist die Betriebsforderung noch zu erwähnen, bei der sowohl die Drehstrom-Gleichstrom- als auch die umgekehrte Stromumformung gewünscht wird. Hierfür kommt nur der Synchron-Motorgenerator zur Verwendung, was wiederum in der Trennung der beiden Maschinen begründet liegt.

Zusammengefaßt ist vom rein betrieblichen Standpunkte aus dem kompensierten Asynchronmotor-generator und dem Gleichrichter zu meist der Vorzug zu geben. Der Kaskadenumformer bildet eine Mittelstufe je nach den einzelnen Betriebsforderungen. Am empfindlichsten ist der Einankerumformer. Wenn letzterer trotzdem neuerdings eine sehr große Verbreitung gefunden hat, so ist das wohl in der Hauptsache auf drei Umstände zurückzuführen, und zwar auf seinen günstigen Wirkungsgrad, seinen billigen Beschaffungspreis und seine geringe Raumbeanspruchung. In betriebstechnischer Hinsicht befriedigt er in einer Reihe von Fällen nicht.

H. Der Frequenzumformer.

a) **Die Betriebsverhältnisse.** Dieser Umformer dient dazu, Ein- oder Mehrphasenstrom aus einem Netze in ein zweites zu übertragen, wenn die Frequenzen beider Netze voneinander abweichen. Fälle solcher Art sind in Deutschland bisher selten gewesen, weil die meisten Kraftübertragungsanlagen mit der Frequenz 50 arbeiten. In Amerika findet

man dagegen den Frequenzumformer häufiger. Dort gibt es eine große Anzahl von bedeutenden Kraftwerken, die elektrischen Strom für den Betrieb von Bahnen mit einer Frequenz von 25 oder 16% liefern und die gleichzeitig elektrische Leistung für Beleuchtung und zum Betriebe von Motoren für industrielle Zwecke mit Frequenzen zwischen 40 und 60 abgeben. Auf dem Kontinent wird aber mit der zunehmenden Bahnelektrisierung und der Speisung aus den großen Fernkraftübertragungsanlagen auch der Frequenzumformer mehr und mehr zur Anwendung kommen müssen. Auf andere Fälle seiner Benutzung wird im folgenden besonders hingewiesen werden.

Für die Betriebsverhältnisse des Frequenzumformers ist zunächst grundsätzlich zu unterscheiden, ob:

a) das vorhandene Netz mit der gegebenen Frequenz ein neues Netz mit anderer Frequenz speisen soll, in welchem keine besondere Stromquelle vorhanden ist;

b) zwei mit verschiedenen Frequenzen arbeitende Netze mit eigenen Stromquellen zusammengeschaltet werden sollen.

Der Fall a) liegt vor, wenn in industriellen Anlagen oder für Bahnzwecke Motoren mit kleiner Frequenz anzuschließen sind, oder wenn die Drehzahlregelung besonders großer oder besonders gearteter Motoren durch Änderung der Frequenz gefordert wird. Auch der umgekehrte Fall kommt vor dann nämlich, wenn von Bahnkraftwerken Beleuchtungsnetze und Motoren gewöhnlicher Bauart für höhere Frequenz zu betreiben sind.

Der Fall b) tritt ein, wenn Kraftwerke unterschiedlicher Frequenz aus Gründen erhöhter Betriebssicherheit oder zur gegenseitigen Aushilfe parallelgeschaltet werden sollen, z. B. reine Bahn- und öffentliche Kraftwerke.

Im Hinblick auf die großen Landeselektrizitätsunternehmen, die in den letzten Jahren nicht nur in Deutschland, sondern auch im Auslande entstanden sind, wird dieses Anwendungsgebiet des Frequenzumformers auch zur reinen Speisung der Vollbahnanlagen aus diesen mit Drehstrom arbeitenden Großelektrizitätsanlagen immer weitere Bedeutung gewinnen, wobei dann mit der Frequenzumformung gleichzeitig auch eine Umformung des Drehstromes in Einphasenstrom stattzufinden hat.

Die Aufgabe solcher Frequenzumformer zur Netzkupplung¹ weicht von derjenigen für den einfachen Frequenzumformer nach Fall a) besonders darin ab, daß der Netzkupplungsumformer Leistung beliebig von der einen nach der anderen Seite überführen muß und sich in seiner Arbeitsweise auch den Frequenzschwankungen beider Netze von selbst anzupassen hat. Für gewöhnlich werden diese Frequenzschwankungen bei Drehstrom-Drehstromkuppelung etwa im Höchstfalle ± 1 vH betragen. Bei Drehstrom-Einphasenstromkuppelung wird man je nach

¹ Liwshitz, Dr.-Ing.: Netzkupplung mittels Induktionsumformer, Siemens-Zeitschrift 1926, S. 594 und ETZ. 1929, H. 37 u. 39. — Schenkel, Dr.-Ing.: Neue Anwendungsmöglichkeiten asynchroner Großmaschinen, ETZ. 1927, H. 17 u. 18 und ETZ. 1924, S. 1265.

Belastungsverlauf, Belastungsschwankungen, Größe der beiderseitigen Kraftwerke und den Antriebsverhältnissen der Kraftwerksgeneratoren mit Frequenzschwankungen auf der Drehstromseite zwischen ± 1 bis $2 \sqrt{H}$ und auf der Einphasenseite zwischen ± 2 bis $5 \sqrt{H}$ zu rechnen haben. Folgt der Frequenzumformer solchen Frequenzschwankungen nicht, so können Leistungsschwankungen zwischen beiden Netzen eintreten, die den Umformer je nach seiner Größe in bezug auf die Kraftwerksgröße gefährden, gegebenenfalls zerstören können. Die Einrichtungen für die Betriebsanpassung an solche Netzschwankungen müssen daher ganz besonders zuverlässig arbeiten. Diese Arbeitsverhältnisse und -bedingungen sind in der Hauptsache bestimmend für die Auswahl der Maschinenzusammensetzung für diese Umformergattung.

Ganz allgemein sind ferner sowohl für Fall a) als auch für Fall b) noch eine Reihe anderer Bedingungen bei der Auswahl der Bauart des Umformersatzes bestimmend, die dahin gehen, daß der Umformer selbsttätig auch eine bestimmte feste Leistung übertragen soll, daß er dabei den primären Leistungsfaktor zu regeln hat und ähnliches. Um hierfür den geeignetsten Maschinensatz zu finden, sind die Netzverhältnisse auf das sorgfältigste zu studieren. Es kann heute noch nicht eindeutig gesagt werden, daß eine bestimmte Maschinenzusammensetzung wirtschaftlich und betrieblich vorherrschend ist. Dazu fehlen die auf Jahre zu stützenden Betriebserfahrungen.

Die Zusammensetzung zu einem Frequenzumformer kann auf folgende Art vorgenommen werden:

als Motor:	als Generator:
Synchronmaschine	Synchronmaschine
Asynchronmaschine	Synchronmaschine

b) Der Synchron-Synchron-Umformer. Der Benutzung dieser Bauart zur Frequenzumformung für den Fall a) also ohne Parallelbetrieb zwischen Kraftwerken auf beiden Netzseiten, somit also nur für einseitige Stromlieferung stehen Schwierigkeiten betrieblicher Art nicht entgegen, wenn der Umformer entsprechend gebaut ist. Da selten nur ein einziger Maschinensatz zur Aufstellung kommen wird, zumeist also zwei oder mehrere Umformer vorhanden sein werden, die dann primär und sekundär parallel laufen müssen, muß verlangt werden, daß dieser Parallelbetrieb anstandslos gewährleistet ist. Mit dieser Bedingung ist selbstverständlich die zweite eng verbunden, daß dann das Parallelschalten und die Lastübernahme auf die einzelnen Maschinen schnell und einwandfrei durchführbar sein muß. Die Erfüllung dieser Bedingungen erfordert nunmehr aber eine besondere Bauart des Maschinensatzes.

Der Läufer der Synchronmaschine hat, je nachdem die Maschine leerläuft oder belastet ist, verschiedene Winkelstellungen zum Drehfeld des Ständers. Das Parallelschalten einer zweiten durch eine Synchronmaschine angetriebenen Synchronmaschine zu einer unter Last stehenden ist daher nicht ohne weiteres möglich. Es würde eine plötzliche sprungweise Lastverschiebung eintreten, die ein Pendeln beider Maschinen und dadurch Betriebsstörungen zur Auslösung brächten. Um

diese zu vermeiden, wird der Ständer jeder Antriebsmaschine solcher Umformersätze mechanisch derart ausgeführt, daß er verdreht werden kann.

Abb. 193 zeigt das Spannungsdiagramm einer Synchronmaschine in ihrer Arbeitsweise als Generator und als Motor bei $\cos \varphi = 1$. Es bezeichnet E die in der Ständerwicklung induzierte EMK, U die Klemmenspannung und E_x die Reaktanzspannung der Ständerwicklung. Der Strom I soll in Phase mit U sein. Das die EMKe erzeugende Feld Φ eilt diesem um 90° vor. Die Klemmenspannung eilt der EMK um den Winkel ψ vor oder nach auch räumlich in elektrischen Graden gemessen je nach der Höhe der Belastung und der Arbeitsweise der Maschine als Generator bzw. als Motor. Der rechte Teil der

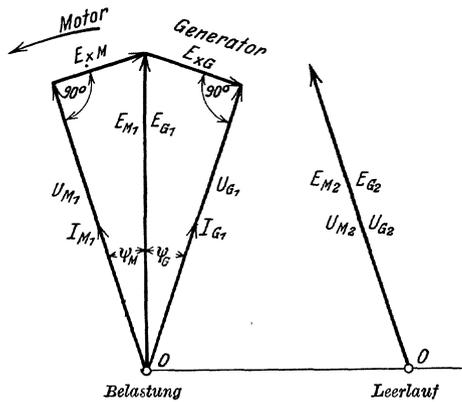


Abb. 193. Spannungsdiagramm einer Synchronmaschine für Generator- und Motorbetrieb.

Abb. 193 zeigt den unbelasteten Zustand, bei dem die EMK und die Klemmenspannung gleichgerichtet sind und annähernd zusammenfallen. Die Reaktanzspannung E_x ändert sich verhältnismäßig mit der Belastung. Der Winkel ψ ist bei Leerlauf annähernd gleich Null. Die Vektorstellungen von U sind daher übereinstimmend mit der Lage der Drehfelder in den Ständerwicklungen beider Maschinen eines Umformersatzes, wobei für die vollständige Beurteilung der Verhältnisse noch die Leistungsfaktoren und die Höhe der Belastung zu berücksichtigen sind. Da zudem die beiden Maschinen eines Umformers fest miteinander gekuppelt sind, besitzen beide Läufer zueinander eine feste Stellung und auch die Richtungen der die EMKe erzeugenden Felder gegeneinander liegen fest.

Für das Parallelschalten zwischen einem belasteten und einem unbelasteten Maschinensatz ist nun folgendes zu beachten:

Die Drehfelder der Motoren weisen in ihrer räumlichen Lage zueinander keine Abweichung auf, da sie von demselben Netz erzeugt werden, wohl aber besteht eine solche in der Lage der Vektoren der EMKe und der sie erzeugenden Felder. Wie bereits gesagt, fallen die Vektoren der EMKe für Motor und Generator im unbelasteten Zustande der Maschine — also im Leerlauf — mit den Vektoren der Klemmenspannung zusammen. Bei belasteter Maschine eilt E_M der Klemmenspannung U_M um den Winkel ψ_M nach (Motorbetrieb) und das Umgekehrte (E_G , U_G , ψ_G) ist der Fall bei Generatorbetrieb. Für den belasteten Maschinensatz eilt somit die Klemmenspannung des Generators der Klemmenspannung des Motors um den Winkel $\psi_M + \psi_G$ nach, d. h. die Drehfelder der beiden Ständer sind räumlich um diesen Winkel gegeneinander verschoben. Da nun für das Parallelschalten die Klemmenspannungen beider Maschinensätze gleiche Größe und Richtung haben

müssen, muß der Vektor U_G der zuzuschaltenden Maschine in die Richtung des der belasteten gebracht werden. Dies geschieht z. B. nach einer Ausführung der Bergmannwerke durch Änderung der räumlichen Lage des Drehfeldes in der einen Maschine und zwar durch Verdrehen des Ständers der einen Maschine gegen den Ständer der zweiten Maschine, bis U_{G_2} die gleiche Lage hat wie U_{G_1} . Nach dem Parallelschalten wird die zugeschaltete Maschine stärker erregt und der Ständer wieder zurückgedreht. Dadurch kann auch die gewünschte Belastungsverteilung erreicht werden.

Praktisch wird der Ständer der einen Maschine rund ausgeführt und mit Rollenbahnen ausgestattet, mit denen das Gehäuse auf Stahlrollen aufliegt. Zur Drehung wird die entsprechend ausgebildete Antriebsvorrichtung von einem Elektromotor angetrieben.

Drei derartige Motorgeneratoren sind von den Bergmannwerken für die Moskauer Staatszentrale geliefert worden¹. Das Schaltbild ist in Abb. 194 in einfacher Darstellung gezeichnet.

Besonders zu erwähnen ist für diese Umformergattung, daß die Synchronmotoren auch hier

noch zur Lieferung von Blindstrom für die Verbesserung des Netzleistungsfaktors herangezogen werden können. Des weiteren gilt hinsichtlich der sonstigen Arbeitsweise der Synchronmaschinen alles bereits bei diesen Erwähnte in gleichem Maße.

Für den unter b) genannten Fall der Kupplung zweier Netze mit eigenen Kraftwerken ist der Synchron-Synchron-Frequenzumformer nicht ohne weiteres geeignet, weil auf beiden Seiten Frequenzschwankungen eintreten können, die dann die auf S. 257 bereits erwähnte Leistungsschwankung hervorrufen. Ist hier der Maschinensatz in seiner Leistung nicht groß genug gegenüber der beiderseitigen Kraft-

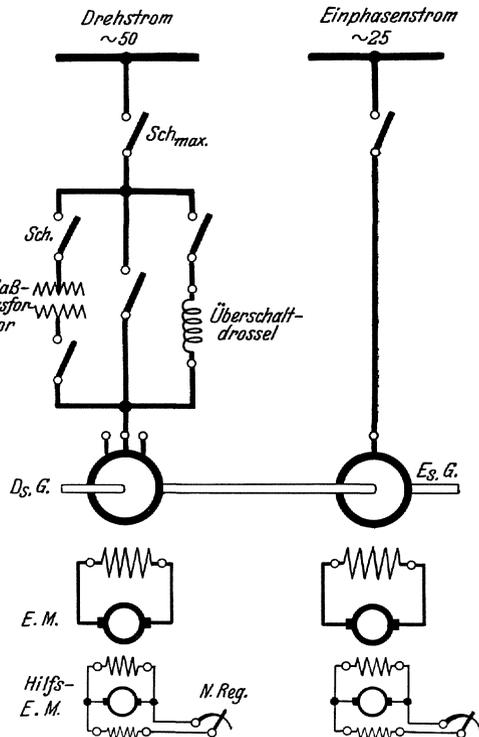


Abb. 194. Schaltbild für einen Synchron-Synchron-Frequenzumformer.

¹ Motorgeneratoren zur Periodenumformung für die erste Moskauer Staatszentrale in Moskau. Bergmann-Mitt. 1927, Nr. 3, S. 75.

werksleistung und damit befähigt zur Aufrechterhaltung einer der beiden Netzfrequenzen, so ist ein einwandfreier Betrieb nicht durchzuführen. Es wird daher für diesen Fall der Synchron-Frequenzumformer kaum zur Anwendung kommen können.

c) **Der Asynchron-Synchron-Umformer.** Dieser Maschinensatz wird gebildet aus einem Asynchronmotor und einem Synchrongenerator entweder nur mechanisch gekuppelt oder auch elektrisch verbunden. Zunächst soll der Umformersatz nur in der **mechanischen Kupplung** behandelt werden.

Für den Fall a) liegt die Asynchronmaschine als Motor am Netz der umzuformenden Frequenz und die Synchronmaschine gibt Strom mit der neuen Frequenz ab. Dabei ist zu beachten, daß die Drehzahl des Motors von der synchronen sowohl im Leerlauf als auch unter Belastung um die Schlüpfung s abweicht. Da diese Drehzahl bestimmend ist für die Synchronmaschine, kann eine feste sekundäre Frequenz nicht gewährleistet werden. Es ist:

$$p_{Sy} = \frac{v_{Sy} \cdot 60}{n_{ASy}}.$$

Daraus ergibt sich ohne weiteres, ob eine gewünschte sekundäre Frequenz und mit welchen Schwankungsgrenzen erreicht werden kann. Infolge dieser Frequenzschwankungen auf der sekundären Seite, zu denen gegebenenfalls noch die Frequenzschwankungen aus dem Primärnetze hinzukommen, wird ein befriedigender Betrieb nicht gewährleistet werden können. Die besonderen guten Eigenschaften des Asynchronmotors gegenüber dem Synchronmotor (große Stabilität gegen Frequenz- und Spannungsschwankungen, einfaches Anlassen) können für diese Zwecke in der mechanischen Kupplung der beiden Maschinen nicht ausgenutzt werden.

Für den Fall b) der Netzkupplung ist schon aus den Angaben zu Fall a) zu ersehen, daß diese einfache Maschinenzusammensetzung ebenfalls unbrauchbar ist. Wendet man aber zur Regelung der Drehzahl des Asynchronmotors einen der Regelsätze an, wie sie auf S. 96 beschrieben worden sind, so gewinnt nunmehr die Asynchronmaschine eine ganz andere Bedeutung, da dieser Regelsatz eine verlustlose Drehzahlregelung gestattet. Von den verschiedenen Regelsatzausführungen sind für die Frequenzumformung mit gleichzeitiger Leistungsregelung nur diejenigen anwendbar, die sowohl einen über- als auch einen unterschynchronen Betrieb und damit selbstverständlich auch einen synchronen Betrieb zulassen. Mit der Ausgestaltung des Asynchronmotors in dieser Form ist die Frequenzumformung und die Erfüllung der sonst noch an sie zu stellenden Bedingungen betrieblich in durchaus befriedigender Weise zu lösen.

Die Gegenüberstellung der Arbeitsweise des Asynchronmotors mit Läuferregelung und Regelsatz allgemein zeigt Abb. 195. Die Linie n_s gibt die synchrone Drehzahl an. Würde der Asynchronmotor mit Läuferregelung arbeiten, so würde seine Drehzahl nach den Linien $a_1 a_1$, $a_1 a_2$, $a_1 a_3$ bis $n = 0$ verlaufen. Die Nutzleistung ist dann $= N_{2,1}$ oder $N_{2,2}$ und die im Läuferregler vernichtete Leistung N_{s_1} oder N_{s_2} .

Die Nutzleistung liegt also je nach der geregelten Drehzahl in der schraffierten Fläche. Wird dagegen ein besonderer Drehzahl-Regelsatz benutzt, so wird die Drehzahl des Asynchronmotors von $a_1 a_1$ nach bb oder cc angenähert parallel zur Kennlinie der Grunddrehzahl $a_1 a_1$ verschoben und dann die gesamte dem Motor zugeführte Leistung verwertbar. Nur der Vollständigkeit wegen sei erwähnt, daß zu dieser Parallelverschiebung der Drehzahlkennlinie auch noch durch entsprechende Ausgestaltung des Regelsatzes eine gleichzeitige Schwenkung ähnlich der Schwenkung $a_1 a_1$ oder $a_1 a_3$ vorgenommen werden kann, um das Lastverhältnis zu beeinflussen. Diese Arbeitsweise übertragen auf den Asynchron-Synchron-Frequenzumformer zeigt das Diagramm der Abb. 196.

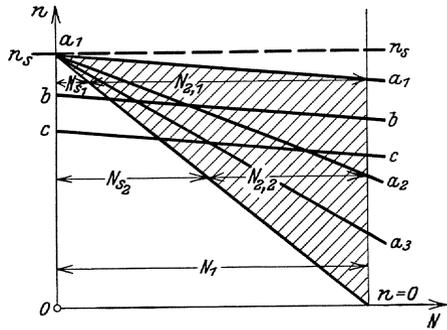


Abb. 195. Leistungs- und Drehzahlverlauf des Asynchronmotors mit Läuferregler und Regelsatz.

Die Synchronmaschine z. B. als Einphasenmaschine zur Abgabe von Leistung für eine Bahnanlage mit $16\frac{2}{3}$ Herz läuft mit unveränderter synchroner Drehzahl nach der Kennlinie $n_s n_s$. Das ist auch die Drehzahl für den Asynchronmotor mit auf synchron eingeregelter Drehzahl im Leerlauf. Dann ist die Energieübertragung Null (Punkt A). Die Drehzahl der Asynchronmaschine verläuft dabei nach der Kennlinie aa . Die betriebliche Eigenart des Regelsatzes liegt nun wie bereits gesagt darin, daß der Verlauf der Drehzahlkennlinie verschoben, die Drehzahl also praktisch verlustlos auf bestimmte Werte eingestellt werden kann. Wird die Drehzahlkennlinie nach bb verlegt, wobei die Leerlaufdrehzahl nunmehr dem Punkte A_1 entspricht, so gibt der Asynchronmotor an die mit unveränderter Drehzahl laufende Synchronmaschine die Leistung $N = OF$ ab. Wird die Drehzahlkennlinie nach cc , also unter die Leerlaufdrehzahl verschoben, so gibt jetzt umgekehrt die Synchronmaschine als Motor an die Asynchronmaschine die Leistung $N = OG$ ab und letztere arbeitet als Generator. Die Richtung der Energielieferung hat gewechselt. Das setzt aber voraus, daß in beiden Fällen die Drehstrom- und die Einphasenstromfrequenz unverändert sind. Schwanken diese Frequenzen, so muß die Drehzahlkennlinie

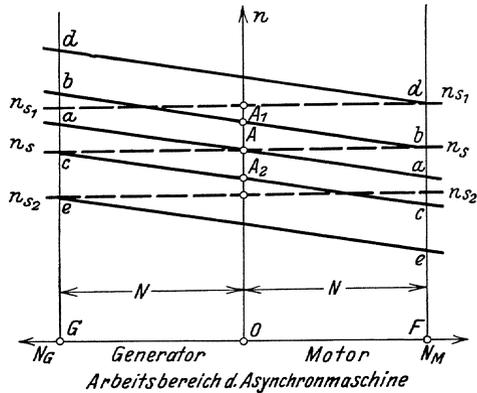


Abb. 196. Leistungs- und Drehzahlverlauf des Asynchronmotors mit Regelsatz für den Asynchron-Synchron-Frequenzumformer.

Die Drehzahlkennlinie verschoben, die Drehzahl also praktisch verlustlos auf bestimmte Werte eingestellt werden kann. Wird die Drehzahlkennlinie nach bb verlegt, wobei die Leerlaufdrehzahl nunmehr dem Punkte A_1 entspricht, so gibt der Asynchronmotor an die mit unveränderter Drehzahl laufende Synchronmaschine die Leistung $N = OF$ ab. Wird die Drehzahlkennlinie nach cc , also unter die Leerlaufdrehzahl verschoben, so gibt jetzt umgekehrt die Synchronmaschine als Motor an die Asynchronmaschine die Leistung $N = OG$ ab und letztere arbeitet als Generator. Die Richtung der Energielieferung hat gewechselt. Das setzt aber voraus, daß in beiden Fällen die Drehstrom- und die Einphasenstromfrequenz unverändert sind. Schwanken diese Frequenzen, so muß die Drehzahlkennlinie

nach oben oder nach unten weiter verschoben werden, sofern die Energielieferung in beiden Richtungen verlangt wird, und zwar um die Summe der in beiden Netzen gleichzeitig auftretenden Frequenzschwankungen (dd oder ee).

Der Drehzahlregler für den Regelsatz wird zumeist für selbsttätiges Arbeiten z. B. als Eil- oder Schnellregler gewählt und gestattet dann eine zuverlässige Einhaltung des gewünschten Betriebsverlaufes.

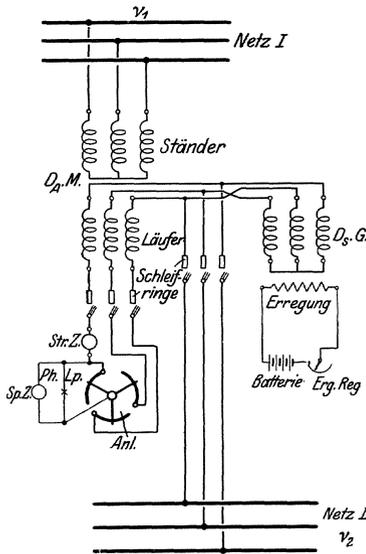


Abb. 197. Schaltbild für einen Asynchron-Synchron-Frequenzumformer (elektrische Kupplung).

Der Ständer des Asynchronmotors $D_A \cdot M$ liegt am Netze mit der höheren Frequenz ν_1 , während der Läufer an das Netz mit der niedrigeren Frequenz ν_2 und außerdem an die Ankerwicklung des Synchrongenerators $D_S \cdot G$ angeschlossen ist.

Wie aus den Angaben beim Drehstrom-Asynchronmotor und bei der Kaskadenschaltung hervorgeht, ist ein Asynchronmotor imstande, die Frequenz umzuformen. Werden mit 1 die einzelnen Größen des Ständers und mit 2 die entsprechenden des Läufers bezeichnet, so verhalten sich:

die induzierten EMKe:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\nu_2 \cdot w_2}{\nu_1 \cdot w_1}, \quad (115)$$

und die Ströme:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 \cdot w_1}{m_2 \cdot w_2}. \quad (116)$$

Die induzierten EMKe sind demnach gleich dem Verhältnisse der Produkte aus Frequenz ν und Windungszahl w , während die Ströme umgekehrt gleich den Windungszahlen aller Phasen sind. Aus Gl. (115)

¹ Schumacher, R., Dr. Ing.: Eine große deutsche Frequenzumformeranlage. ETZ H. 11, S. 245. Schaar, R.: Ein Frequenzumformer von bemerkenswerten Abmessungen für die norwegischen Staatsbahnen. Siemens-Zeitschrift 1927 Februar.

Es würde zu weit führen, hier die einzelnen Regelsätze nochmals zu behandeln. Welche Art von Regelsatz für die jeweils vorliegenden Bedingungen zu wählen ist, bedarf besonderer Feststellungen, die in erster Linie der Maschinenkonstrukteur zu treffen hat.

Derartige Frequenzumformer sind bereits mehrfach im Betriebe und haben sich bewährt¹.

Die elektrische Kupplung der Asynchronmaschine mit der Synchronmaschine hat bisher, soviel bekannt, für die Zwecke der Frequenzumformung keine praktische Verwendung gefunden. Trotzdem soll sie hier der Vollständigkeit wegen noch mit erwähnt werden. Abb. 197 zeigt das Schaltbild für den Fall b).

Der Ständer des Asynchronmotors $D_A \cdot M$ liegt am Netze mit der höheren

und (116) folgt das Verhältnis der Läuferleistung zur Ständerleistung:

$$\frac{m_2 \cdot E_2 \cdot I_2}{m_1 \cdot E_1 \cdot I_1} = \frac{\nu_2}{\nu_1}. \quad (117)$$

Es ist dieses Verhältnis also nicht gleich 1, sondern gleich der Läuferfrequenz zur Ständerfrequenz. Wird ferner mit p_1 die Polpaarzahl der Asynchronmaschine und mit p_2 diejenige der Synchronmaschine bezeichnet, so war nach Früherem:

$$\nu_2 = \frac{p_s \cdot n}{60} = \nu_1 - \frac{p_1 \cdot n}{60},$$

und nach Gl. (47) bei der Kaskadenschaltung:

$$n = \frac{60 \cdot \nu_1}{p_1 + p_2}.$$

Durch Umrechnung findet man die Läuferfrequenz:

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{p_2}{p_1 + p_2}.$$

Entspricht nun ν_1 der Frequenz des einen Netzes und ν_2 derjenigen des zweiten Netzes, so arbeitet die Asynchronmaschine in folgender Weise:

Ist $\nu_2 < \nu_1$, so wird nur der $\frac{\nu_2}{\nu_1}$ verhältnisgleiche Teil der dem Ständer zugeführten elektrischen Leistung nach Abzug der Verluste sekundär in elektrische Leistung umgesetzt, während der verbleibende Teil $\frac{\nu_1 - \nu_2}{\nu_1}$ als mechanische Leistung am Läufer zur Verfügung steht. Er kann also zum Antriebe der zweiten Maschine dienen und wird durch diese unter Abzug der Verluste wiederum in elektrische Leistung umgewandelt. Die Asynchronmaschine arbeitet dabei zum $\frac{p_2}{p_1 + p_2}$ ten Teile als Transformator und zum $\frac{p_1}{p_1 + p_2}$ ten Teile als Motor. Sie ist für die ganze zu übertragende elektrische Leistung zu bemessen, während die zweite Maschine nur klein ausfällt.

Ist $\nu_2 > \nu_1$, so ist die Läuferleistung größer als die Ständerleistung. Es muß also dem Läufer z. B. durch einen besonderen Motor mechanische Leistung zugeführt werden. Es wird dann der $\frac{\nu_2}{\nu_1}$ te Teil der umzuwandelnden Leistung vom Ständer abgenommen, also vom Läufer auf diesen übertragen. Der verbleibende $\frac{\nu_1 - \nu_2}{\nu_1}$ te Teil muß von der zweiten Maschine als Motor laufend geliefert werden.

In Abb. 198 und 199 ist dieser Leistungsverlauf sinnbildlich zur Darstellung gebracht. Je nach den Leistungsverhältnissen in den betreffenden Netzen kann die Zusatzmaschine an das eine oder das andere Netz geschaltet werden. So ist in Abb. 198a das primäre Netz günstiger und die Zusatzmaschine liegt an diesem, während in Abb. 198b das sekundäre Netz auch mit Rücksicht auf das Anlassen vorteilhafter ist. Darum ist die Zusatzmaschine an dieses geschaltet und erhält ihre Leistung zum Antriebe der Asynchronmaschine aus dem sekundären Netze. Das gleiche gilt für die Gegenüberstellung der Abb. 199a und b.

Diese Schaltung des Frequenzumformers gestattet also die Verwendung einer nur verhältnismäßig kleinen Zusatzmaschine, wird infolgedessen billiger und im Wirkungsgrade günstiger.

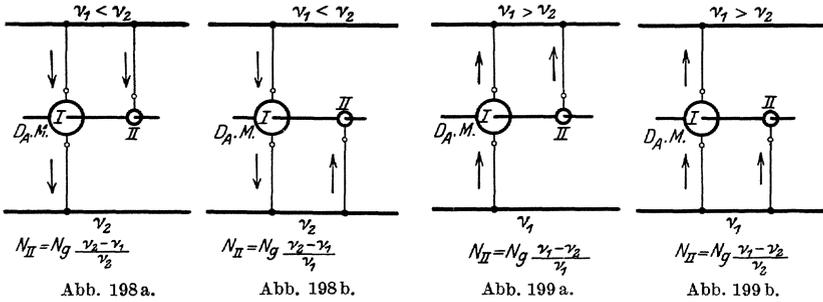


Abb. 198 und 199. Arbeitsweise der Asynchron-Synchron-Frequenzumformer mit elektrischer Kupplung.

Nach diesen grundlegenden Erörterungen soll nun die Schaltung und Arbeitsweise dieses Frequenzumformers in bezug auf die auf S. 256 erwähnten Betriebsfälle a) und b) behandelt werden.

Die Inbetriebsetzung dieses Frequenzumformers hat in folgender Form zu geschehen. Die Schleifringe der Läuferwicklung, die mit der Ankerwicklung der Synchronmaschine hintereinandergeschaltet ist, werden mit einem Anlasser *Anl.* (Abb. 197) verbunden und das sekundäre Netz wird abgeschaltet. Der Ständer der Asynchronmaschine liegt am primären Netze entweder unmittelbar oder über einen Transformator, falls die Netzspannung herabtransformiert werden muß. Mit dem Abschalten der Anlaßstufen läuft der Motor an. Gleichzeitig ist der Synchrongenerator zu erregen, und zwar so stark, bis die synchrone Drehzahl des Maschinensatzes erreicht wird, die unterhalb der synchronen Drehzahl des Asynchronmotors liegt. Über die erstere kann der Antriebsmotor nicht hinauslaufen, weil die Synchronmaschine auf den Anlasser über die Läuferwicklung Strom gibt. Stimmen die Phasen der EMKE des Netzes und der Synchronmaschine überein, so sinkt der Strom in den in Kaskade geschalteten Wicklungen auf den geringsten Wert, was an einem Stromzeiger erkannt werden kann. In diesem Augenblicke sind die Schleifringe und der Anlasser kurzzuschließen und das sekundäre Netz einzuschalten, sofern dasselbe keine eigene Stromquelle hat, also der Fall a) vorliegt. Auch eine Phasenlampe *Ph.Lp.* in Parallelschaltung zum Anlasser *Anl.* kann als weiteres Hilfsmittel benutzt werden.

In dieser Weise kann der Frequenzumformer eine selbständige sekundäre Frequenz hergeben. Der Betrieb ist einwandfrei möglich und auch stabil.

Wird der Synchrongenerator reichlich gewählt, so kann er zum Ausgleich von Blindströmen, die sowohl im Primärnetze und dem Asynchronmotor als auch im Sekundärnetze vorhanden sind, herangezogen werden. Darauf ist aber bei der Bestimmung der Maschinengröße besonders Rücksicht zu nehmen.

Kommt der Fall b) in Frage, wird also das Sekundärnetz von einer selbständigen Stromerzeugungsanlage gespeist, dann werden die Verhältnisse recht verwickelt. Es bedarf einer sehr sorgfältigen Untersuchung seitens der Maschinenkonstruktoren, ob ein einwandfreier Betrieb mit dieser Art des Frequenzumformers zu erreichen ist. Ganz besonders ist das von der Arbeitsweise der Antriebsmaschinen der Kraftwerksgeneratoren abhängig, die mit statischen Reglern versehen sein müssen, um bei Belastungsschwankungen die Drehzahlregelung der Antriebsmaschinen und damit die Lastverteilung auf den Frequenzumformer richtig zu besorgen. Es würde zu weit führen, auf diese Verhältnisse noch näher einzugehen.

J. Spannungswandlung bei Gleichstrom.

a) **Motorgenerator.** Soll Gleichstrom einer gegebenen Spannung in Gleichstrom mit anderer Spannung umgewandelt werden, so benutzt man hierzu entweder Akkumulatoren oder Motorgeneratoren. Erstere sind wegen des geringeren Wirkungsgrades, der Bedienung, Beaufsichtigung, Ladung usw. für diese Zwecke weniger zu empfehlen, zumal sie

auch noch einen besonderen Raum erfordern; sie werden daher nicht ständig, sondern nur vorübergehend z. B. für den Nachtbetrieb verwendet. Kurz sei bemerkt, daß man eine Akkumulatorenbatterie zur Teilung der Spannung in Dreileiteranlagen indessen häufiger vorfindet. Hierüber, sowie über die Akkumulatoren an sich ist im IV. Bande Ausführlicheres zu finden. Wirtschaftlicher sind die Motorgeneratoren, wenn es sich um eine dauernde Gleichstromspannungswandlung handelt, wenn also ein Gleichstromnetz nicht nur zeitweise von einem anderen mit unterschiedlicher Spannung mit Strom versorgt werden soll.

In Abb. 200 ist das Schaltbild eines solchen Gleichstrom-Gleichstrom-Motorgenerators mit Fremderregung des Generators gezeichnet. Es werden zwei Maschinen miteinander gekuppelt, von denen die eine die verlangte Spannung mit der gewünschten Stromstärke abgibt, also als

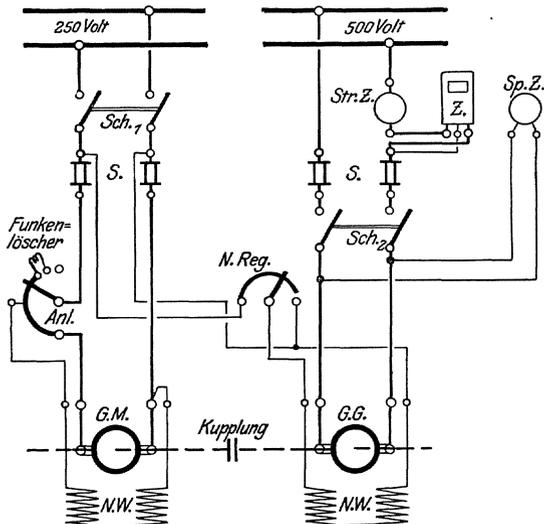


Abb. 200. Schaltbild der Gleichstromspannungswandlung mittels Motorgenerators.

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 Leistung 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 stets auf unveränderter Höhe, dann empfiehlt sich Fremderregung, um Spannungsänderungen infolge von Drehzahl-schwankungen hervorgerufen durch die wechselnde Leistungsabgabe 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 gewöhnlichem Betriebe wählt man indessen häufig und mit gutem Ergebnisse auch die Selbsterregung. Die der Abb. 200 zugrunde gelegten Spannungen erlauben die Benutzung von zwei-poligen 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 Spannungswandlung. Wesentlich vorteilhafter ist die folgende zuerst von der E. A. G. vorm. Schuckert & Co., Nürnberg, angegebene Schaltung der sog. teilweisen Spannungswandlung. Das Schaltbild zeigt Abb. 201. Soll z. B. die Spannung von 500 V auf 250 V dauernd geändert 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 umzuwandelnden und der vorhandenen Spannung, also $500 - 250 = 250$ V, 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 Spannungswandlung von 500 auf 250 V bei beispielsweise 25 kW ist der Generator also nicht für 100 A, sondern nur für 50 A und 250 V, und der Motor gleichfalls für 50 A zu bemessen. Der sekundäre Strom, der in diesem Falle entsprechend der verlangten Leistung von 25 kW 100 A beträgt, setzt sich bei der Schaltung nach Abb. 201 zusammen aus 50 A, erzeugt vom Generator *G.G.*, und 50 A, die zum Betriebe des Motors *G.M.* dienen, während von der Spannung von 500 V beim Durchgange durch den Motor 250 V verbraucht werden, und sie dadurch auf die verlangte sekundäre Höhe von 250 V gebracht wird. Um die Addition der Stromstärken zu erhalten, ist es notwendig, einen Pol des vorhandenen Netzes mit dem des Generators zu verbinden, und zwar ist das in Abb. 201 der Pluspol. Aus dieser Strom- und Spannungsverteilung geht hervor, daß bei dieser Form der teilweisen Umwandlung wesentlich kleinere Maschinen benutzt werden können als bei der Verwendung von Motorgeneratoren. So zeigt das Beispiel, daß bei der Umwandlung 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 Maschinensatzes 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 dieser Schaltung 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 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 gewöhnlichen 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 Spannungswandlung angewendet wird. So würde der Wirkungsgrad des Maschinensatzes bei dem gewählten Beispiele in der Ausführung als Motorgenerator etwa 83 vH und bei teilweiser Umwandlung etwa 90 vH betragen. Diesen Vorzügen gegenüber besitzt aber die Schaltung auch einen Nachteil darin, 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 Schaltgeräte, Leitungen usw. auf der Sekundärseite notwendig macht.

Die teilweise Spannungswandlung kann mit den gleichen Vorzügen und Nachteilen naturgemäß auch für die umgekehrte Umwandlung der Spannungen verwendet werden.

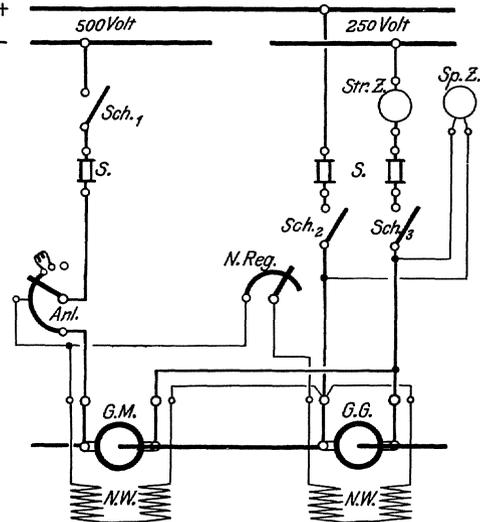


Abb. 201. Schaltbild der teilweisen Gleichstromspannungswandlung.

Dritter Abschnitt.

Die Transformatoren¹.

45. Die Arbeitsweise des Transformators (Umspanners) im allgemeinen.

Soll Wechselstrom einer gegebenen Spannung und Frequenz in solchen einer anderen — höheren oder niedrigeren — Spannung, aber der gleichen Frequenz umgewandelt oder transformiert (umgespannt) werden, so bedient man sich hierfür im Gegensatz zur Gleichstromspannungswandlung eines ruhenden Gerätes, eines sog. Transformators. Das besondere konstruktionstechnische Merkmal des Transformators ist demnach, daß er ohne mechanische Bewegung elektrische Leistung in elektrische Leistung umwandelt. Erst mit der 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 nicht möglich ist, sondern auch die Höhe der Spannung an sich und die Leistung bieten für die praktische Herstellung der Transformatoren keinerlei Schwierigkeiten mehr. So sind heute die Großkraftübertragungsanlagen fast sämtlich in ihren Hauptstrecken mit 100000 V (100 kV) im Betriebe und für Laboratoriums- und Prüfzwecke sind Transformatoren bis 1000000 V und darüber bereits gebaut worden. Unter Berücksichtigung größter Leistungen und Entfernungen werden in Deutschland in jüngster Zeit auch Anlagen für 200 kV gebaut, um den wirtschaftlichen Zusammenschluß der großen Landesstromversorgungen² und Verbindung mit ausländischen billigen und betriebswirtschaftlich günstigen Energiequellen (in der Hauptsache Wasserkraftwerken) herbeizuführen. Erfahrungen aus dem praktischen Betriebe über die Benutzung dieser höchsten Spannung (200 kV und mehr) liegen in ausreichendem Maße indessen noch nicht vor.

¹ In Deutschland wählt man neuerdings statt des Wortes „Transformator“ die Bezeichnung „Umspanner“ und spricht weiter von Umspannanlagen, Umspannwerken u. dgl. Mit Rücksicht auf die VDE-Vorschriften soll indessen die Bezeichnung „Transformator“ beibehalten werden.

² In Deutschland: Die Elektrowerke A.G., das Rheinisch-Westfälische E.W., die A.G. Sächsische Werke, das Bayernwerk, die Preußische Elektrizitäts A.G., das Badenwerk u. a. m.

Ungeklärt für derartig höchste Spannungen ist zur Zeit noch die Betriebssicherheit der zugehörigen Geräte, wie Schalter und Meßtransformatoren (Meßwandler) hinsichtlich Isolation und Kurzschlußsicherheit. Ferner überschreiten, soweit durch Rechnung und Versuch bisher festgestellt worden ist, die Verluste in der Fernleitung durch Ausstrahlung und Ableitung unter Umständen die wirtschaftliche Grenze, wenn der elektrische Strom nicht zu sehr geringen Erzeugungskosten hergestellt werden kann, z. B. bei Ausnutzung der Gase in großen Hüttenwerken und Grubenkokereien, der Abfallkohlen auf denselben, billiger und leicht zu fassender Wasserkräfte, Rohölagern usw. Auch die wirtschaftliche Ausbeutung der Kohle durch Verschmelzung ist hier zu nennen. Auf die Einzelbehandlung aller einschlägigen Fragen, zu denen schließlich auch die Spannungsregelung gehört, wird indessen erst in den betreffenden Abschnitten des II. bis IV. Bandes näher eingegangen werden.

Der Wechselstromtransformator beruht nun auf dem physikalischen Vorgange, 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 — die primäre oder Leistung empfangende — an eine Wechselstromquelle anschließt. Wesentlich verstärkt wird die induzierte EMK, wenn die Spule auf einen Eisenkörper (Abb. 202) aufgebracht, wenn sie also z. B. auf einen aus Eisenblechen hergestellten Ring aufgewickelt wird, weil dann 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 für die induzierte EMK verlorengeht. Man nennt dieses Austreten der Kraftlinien die Streuung. Versieht man nun nach Abb. 202 den Eisenring noch mit einer zweiten Wicklung — der sekundären oder Leistung abgebenden —, 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_1 die primäre, E_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-Maxwellschen Induktionsgesetze:

$$E_1 = 4,44 \cdot \nu \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volt}, \quad (118a)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot \nu \cdot w_2 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \quad ,, \quad (118b)$$

Die Division dieser beiden Gleichungen ergibt:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = u, \quad (119)$$

oder in Worten: die von demselben Kraftflusse in den Wicklungen induzierten EMK verhalten sich wie die Windungszahlen. Dieses Verhältnis u nennt man das Übersetzungsverhältnis.

nis des Transformators. Dasselbe ist infolge des Spannungsabfalles in den Wicklungen bei Vollbelastung ein anderes als bei Leerlauf, und es muß infolgedessen auf diesen Umstand bei der Festsetzung der Sekundärspannung (Unterspannung) bzw. bei der Bestellung eines Trans-

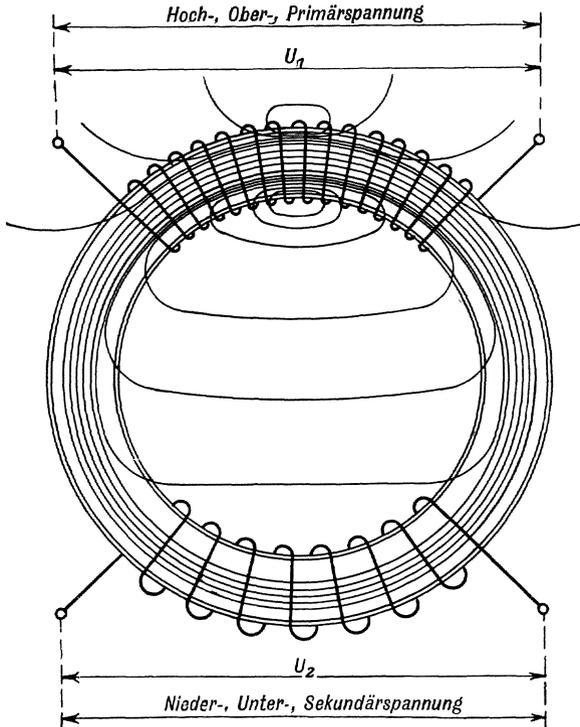


Abb. 202. Einfache Darstellung eines Wechselstromtransformators.

formators ganz besonders Rücksicht genommen werden. In der Regel wird ein Transformator so gewickelt, daß eine bestimmte Sekundärspannung bei Leerlauf abgegeben wird. Dann ist also die Sekundärspannung bei Vollast niedriger als bei Leerlauf.

Setzt man mit praktisch hinreichender Genauigkeit die Klemmenspannungen U_1 bzw. U_2 gleich den induzierten EMKs, so ist auch:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = u, \quad (120)$$

und daraus folgt:

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} \cdot U_1 = \frac{1}{u} \cdot U_1, \quad (121)$$

bzw. nach dem oben Gesagten bei Vollast:

$$U_2 = E_2 - e_\varphi, \quad (122)$$

(e_φ = gesamter Spannungsabfall im Transformator).

Gl. (121) zeigt, daß also mittels eines solchen Gerätes Wechselstrom einer gegebenen Spannung und Frequenz in solchen gleicher Frequenz, aber anderer Spannung transformiert werden kann.

Man bezeichnet die vorhandene Spannung im Kraftwerke oder an der Zuführungsleitung zu einem Transformator als die Primärspannung, die transformierte Spannung als die Sekundärspannung, oder man spricht je nach der Höhe der Spannung von Ober- oder Hoch- und Unter- oder Niederspannung, bzw. wenn z. B. bei einem Überland-

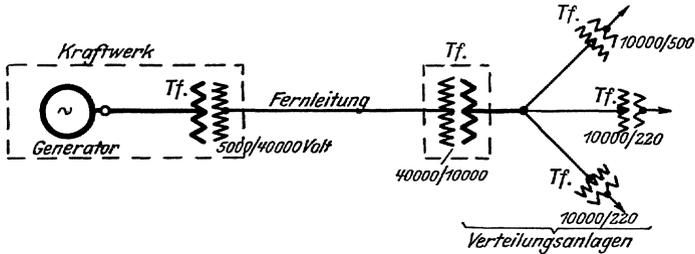


Abb. 203. Allgemeine Transformatoranlage mit Hoch-, Mittel- und Niederspannung.

werke dreifache Transformierung (Abb. 203) stattfindet, von Hoch- (5000/40000), Mittel- (40000/10000) und Niederspannung (10000/500 bzw. 220 Volt)¹.

¹ Normen für Betriebsspannung elektrischer Starkstromanlagen sind vom VDE festgelegt, die hier des besonderen Interesses wegen kurz wiedergegeben werden.

§ 1. Als Betriebsspannung wird die Spannung bezeichnet, die in leitend zusammenhängenden Netzteilen an den Klemmen der Stromverbraucher im Mittel vorhanden ist. Als Stromverbraucher gelten außer Lampen, Motoren usw. auch Primärwicklungen von Transformatoren.

§ 2. Als Betriebsspannung gelten folgende Werte:

Gleichstrom.

V	Verwendungsgebiet
110	normal für alle Fälle.
220	„ „ „ „
440	„ „ „ „
550	für Bahnen.
750	„ „
1100	„ „
1500	„ „
2200	„ „
3000	„ „

Drehstrom von 50 Hertz.

V	Verwendungsgebiet
125	bei Neuanlagen nur, wenn die Anwendung von 220 V erhebliche Nachteile hat.
220	normal für alle Fälle.
380	„ „ „ „
500	bei Neuanlagen nur für solche industriellen Betriebe, bei denen die Anwendung von 380 V erhebliche Nachteile hat.
3000	bei Neuanlagen nur für solche industriellen Betriebe, bei denen die Anwendung von 6000 V erhebliche Nachteile hat.

(Fortsetzung der Fußnote s. S. 272.)

Ist der Transformator eingeschaltet, der sekundäre Stromkreis aber 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 I_0 , obgleich sich beide theoretisch nicht decken.

Wird der sekundäre Stromkreis durch einen äußeren Widerstand geschlossen d. h. belastet, dann fließt in ihm ein Strom I_2 entsprechend der Belastung, und zwar ist:

$$U_2 \cdot I_2 = U_1 \cdot I_1,$$

also:

$$I_1 = \frac{U_2}{U_1} \cdot I_2 = \frac{1}{u} \cdot I_2, \quad (123)$$

oder entsprechend der Gl. (121):

$$I_2 = u \cdot I_1. \quad (124)$$

Die Leistung des Transformators ist bei Einphasenstrom:

$$\left. \begin{aligned} N_{T,r} &= U_1 \cdot I_1 = 4,44 \cdot \nu \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot I_1 \cdot 10^{-8} \text{ VA} \\ &= U_2 \cdot I_2 = 4,44 \cdot \nu \cdot w_2 \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot 10^{-8} \text{ ,, } \end{aligned} \right\} \quad (125)$$

und bei Mehrphasenstrom, wenn mit m die Phasenzahl und mit U_p die Spannung zwischen zwei Phasen (Phasenspannung) bezeichnet

Fortsetzung der Fußnote von S. 271: Drehstrom von 50 Hertz.

V	Verwendungsgebiet
5000	bei Neuanlagen nur, wenn der Anschluß an ein bestehendes 5000 V-Netz wahrscheinlich ist.
6000	normal für alle Fälle.
10000	bei Neuanlagen nur, wenn der Anschluß an ein bestehendes 10000 V-Netz wahrscheinlich ist.
15000	normal für alle Fälle,
30000	„ „ „ „
50000	bei Neuanlagen nur, wenn die Verwendung von 60000 V erhebliche Nachteile hat,
60000	normal für alle Fälle,
100000	„ „ „ „
150000	„ „ „ „
200000	„ „ „ „
300000	„ „ „ „

Die starkgedruckten Spannungen werden in erster Linie empfohlen sowohl für Neuanlagen als auch für umfangreiche Erweiterungen.

Einphasenstrom von 16½ Hertz.

Für Neuanlagen sollen nur starkgedruckte Werte aus der Drehstromzahlen-tafel gewählt werden.

wird, allgemein:

$$N_{T,r} = m \cdot U_p \cdot I = 4,44 \cdot m \cdot \nu \cdot w \cdot \Phi \cdot I \cdot 10^{-8} \text{ VA}, \quad (126)$$

oder:

$$= \frac{m \cdot U_p \cdot I}{1000} \text{ Kilovoltampere (kVA)},$$

bzw. bei Drehstrom:

$$\frac{3 \cdot U_p \cdot I}{1000} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}{1000},$$

worin U die verkettete Spannung bezeichnet.

Die in Voltampere oder Kilovoltampere ($\text{kVA} = \frac{\text{Voltampere}}{1000}$) angegebene Leistung wird die scheinbare genannt, und nur diese muß für die Größenbestimmung eines Transformators angegeben werden. Die wirkliche Leistung (Wirkleistung) findet man aus der scheinbaren durch Multiplikation mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi$.

Da der Transformator im Leerlaufe den Strom I_0 aufnimmt, muß ihm demnach auch in diesem Betriebszustande eine gewisse elektrische Energie zugeführt werden, die Leerlaufenergie:

$$\text{bzw.:} \quad \left. \begin{aligned} N_{T,r_0} &\cong U_1 \cdot I_0 \\ &\cong m \cdot U_p \cdot I_0 \end{aligned} \right\} \quad (127)$$

Wie die Gl. (125) und (126) zeigen, ist die Leistung einer bestimmten Transformatorgröße abhängig von der Frequenz des zugeführten Stromes. Soll daher ein Netz mit einer anderen als der bisherigen Frequenz oder ein für die Frequenz $\nu = 50$ gewickelter Transformator mit einer anderen Frequenz betrieben werden, so kann man bei kleineren Leistungen im allgemeinen annehmen, daß sich die Leistung des Transformators übereinstimmend mit der Frequenz ändert. Für größere Transformatoren trifft das nicht mehr ganz zu. Die nebenstehende Zahlentafel 15 gibt die Leistungsänderung bei einer anderen als der üblichen Frequenz $\nu = 50$ an.

Auf die Theorie des Transformators und seine Berechnung soll nicht näher eingegangen werden. Dafür

steht eine gute Fachliteratur¹ zur Verfügung. Lediglich der Vollständigkeit wegen soll daher nur kurz das allgemeine Vektordiagramm für einen Einphasentransformator erläutert werden unter der Voraussetzung, daß der Kraftfluß unverändert bleibt und nach einer Sinuskennlinie verläuft.

Auf der Ordinatenachse (Abb. 204) wird die zur Überwindung der induzierten EMK — $E = E_2$ in der Primärwicklung erforderliche

Zahlentafel 15.

Abweichende Frequenz	Leistung in vH der Leistung bei $\nu = 50$
60 Hertz	etwa 110
45 „	„ 95
42 „	„ 90
40 „	„ 85
25 „	„ 55

¹ Arnold, E. u. I. L. la Cour: Die Wechselstromtechnik Bd. 2. Die Transformatoren. Aron, C.: Der Transformator. Vidmar, M.: Die Transformatoren. — Der Transformator im Betrieb.

EMK $E_1 = \overline{OA}$ abgetragen. Der Magnetisierungsstrom (oder auch Leerlaufstrom) $I_0 = \overline{OC}$ eilt dann dem Kraftflusse Φ , aufgetragen auf der positiven Abszissenachse, um den Winkel α nach. Die in der

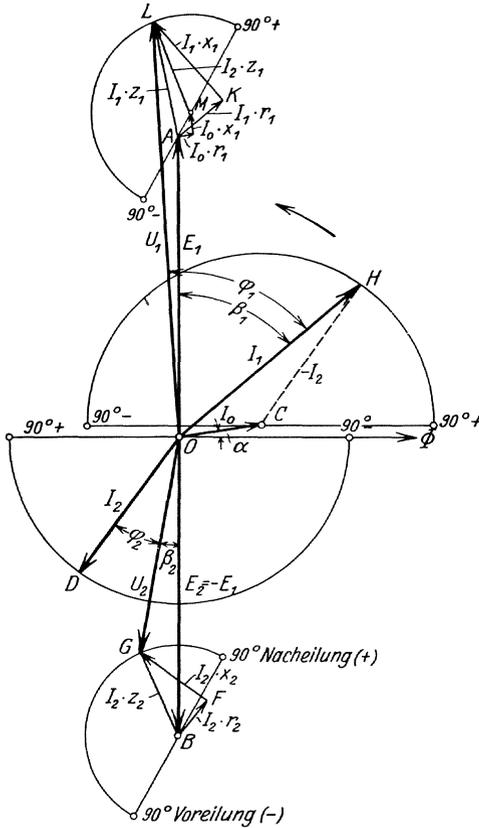


Abb. 204. Vektordiagramm des Einphasentransformators.

Der primäre Strom I_1 ergibt sich aus der geometrischen Addition von I_0 und I_2 zu \overline{OH} . Er schließt mit der induzierten EMK E_1 den Phasenwinkel β_1 ein. Der primäre Ohmsche Spannungsverlust $I_1 \cdot r_1 = \overline{AK}$ und der induktive Spannungsverlust $I_1 \cdot x_1 = \overline{KL}$ geben geometrisch zu E_1 addiert die primäre Klemmenspannung $U_1 = \overline{OL}$, die mit I_1 den Phasenwinkel φ_1 bildet.

Aus diesem Diagramm ist ohne Schwierigkeit zu erkennen, wie sich die Spannungsabfälle $I_2 \cdot z_2 = \overline{BG}$ und $I_1 \cdot z_1 = \overline{AL}$ bei veränderlichem I_2 also also veränderlicher Belastung sekundär und gleichbleibendem oder ebenfalls veränderlichem sekundärem Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$ ändern

Sekundärwicklung induzierte EMK $E_2 = -E_1 = \overline{OB}$ fällt in die negative Richtung der Ordinatenachse, eilt also der primären EMK um 180° vor¹. Ist die Sekundärseite mit einem Strom $I_2 = \overline{OD}$ belastet, der gegenüber der sekundären Klemmenspannung U_2 um den Winkel $\varphi_2 = \overline{DOG}$ phasenverzögert sein soll, so schließt I_2 mit der induzierten EMK E_2 den Winkel $\varphi_2 + \beta_2$ ein, wobei β_2 der innere Phasenverschiebungswinkel ist. Der Strom I_2 hat in der sekundären Wicklung einen Ohmschen Spannungsverlust $I_2 \cdot r_2 = \overline{BF}$ in Richtung des Stromes I_2 und einen induktiven Spannungsverlust $I_2 \cdot x_2 = \overline{FG}$ um 90° gegen den Strom I_2 phasenverzögert zur Folge, so daß nunmehr die Klemmenspannung $U_2 = \overline{OG}$ kleiner ist als die induzierte EMK E_2 und mit I_2 den Phasenwinkel φ_2 einschließt.

¹ Alle sekundären Werte sollen auf die Primärseite bezogen sein, ein besonderer Bezeichnungsunterschied indessen nicht gemacht werden, da es sich nur um eine grundsätzliche Darstellung handelt.

und welche Werte dann die sekundäre und primäre Klemmenspannung annehmen. Maßstäblich läßt sich das Diagramm nicht zeichnen, weil die Spannungsabfälle zu klein gegenüber den Spannungswerten sind. Für die Erkenntnis der primären und sekundären Spannungsverhältnisse eines Transformators ist diese diagrammatische Darstellung jedoch wiederum klar und einfach.

In Abb. 204 ist noch der besondere, praktisch häufig vorkommende Fall gezeichnet, daß die Belastung, also $I_2 = \overline{OD}$ unveränderlich bleibt, der Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$ sich indessen ändert ($\sphericalangle DOG = \varphi_2$), und zwar von $\cos \varphi_2 = 0$ nacheilend (+) bis $\cos \varphi_2 = 0$ voreilend (—). Dann bewegt sich der Punkt D auf einem Halbkreis mit dem Radius \overline{OD} um O und die Klemmenspannung mit dem Punkte G auf einem Halbkreise um den Punkt B mit dem Radius $I_2 \cdot z_2 = \overline{BG}$. Der Strom I_1 ändert ebenfalls Größe und Richtung, die sich ergibt, wenn man um C mit dem Radius $\overline{CH} = I_2$ einen Halbkreis schlägt. Für die Klemmenspannung $U_1 = \overline{OL}$ ergibt sich Größe und Richtung, wenn man an die EMK E_1 im Punkte A den Spannungsabfall $I_0 \cdot z_1 = \overline{AM}$ anträgt und dann mit $I_2 \cdot z_1 = \overline{ML}$ um M einen Halbkreis schlägt. Man kann aus diesem Diagramm leicht ersehen, wie sich auch die Primär- und die Sekundärspannungen bei wechselndem Leistungsfaktor ändern (hier allerdings nur bildlich dargestellt), bzw. welche Regelungen auf beiden Spannungsseiten notwendig werden.

Da die Leistung des Transformators stets in kVA angegeben wird, bedeutet das, daß für seine Belastung nur die Ströme I_2 und I_1 maßgebend sind, denn nur diese werden der Berechnung der Wicklungen zugrunde gelegt. Aus der Leistungsgleichung für Drehstrom:

$$I_2 = \frac{\text{kW} \cdot 1000}{U_2 \cdot \sqrt{3} \cos \varphi_2}, \quad (128)$$

und:

$$I_2 = \sqrt{I_{W_2}^2 + I_{B_2}^2} \quad (129)$$

folgt, daß der Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$ besonders zu beachten ist.

Die Aufstellung des Diagramms für einen Drehstromtransformator zur allgemeinen Beurteilung der verschiedenen Zusammenhänge wird nach diesen Erläuterungen ohne Mühe sein.

46. Allgemeine Gesichtspunkte für die Bestimmung der Transformatorenleistung¹.

Hier und im folgendem wird bei der Behandlung ähnlicher Fragen unterschieden werden zwischen Transformatoren, die in den Kraftwerken und Haupttransformatorenanlagen verwendet werden (Kraftwerks- bzw. Haupttransformatoren) und solchen, die im Netz für die

¹ Der VDE hat in den RET eine Reihe von Nennleistungen festgesetzt, die tunlichst berücksichtigt werden sollten. Für Leistungen bis 100 kVA und Spannungen bis 20 kV werden von allen deutschen Lieferfirmen sog. Einheitstransformatoren gebaut.

Gewinnung der Gebrauchsspannung zur Aufstellung kommen (Netztransformatoren).

Die Einzelleistung der Kraftwerkstransformatoren richtet sich nach der Leistung der Generatoren, der Zahl der abgehenden Hauptleitungen, der zu transformierenden Spannung usw. Es wird diese Frage daher erst bei der Behandlung der Kraftwerke im IV. Bande näher erörtert werden.

Die Größe der Haupt- und Netztransformatoren hängt — besondere Fälle ausgenommen — von dem Anschlußwerte in kVA, der Eigenart (Lampen, Motoren, Landwirtschaft, besondere Industrien), der Betriebsart¹ (gleichmäßiger oder starken Schwankungen unterworfenen Betrieb) und der Betriebsdauer (Dauerbetrieb, aussetzender Betrieb) der einzelnen Stromverbraucher oder zusammengeschlossener Gebiete ab.

Handelt es sich nur um einen Transformator für ein Dorf, eine kleine Gemeinde mit mehr oder weniger landwirtschaftlicher Eigenart, so richtet sich die Höhe der Leistung nach dem Anschlußwerte der zu speisenden Beleuchtung und der motorischen Betriebe, wobei letztere in der Regel stark überwiegen. Unter Anschlußwert ist der gesamte Wert aller angeschlossenen elektrischen Anlagenteile in kW bei einem mittleren Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$ zu verstehen. Dieser Anschlußwert wird dank der immer stärker zunehmenden Anwendung des elektrischen Stromes für alle Zwecke des Haushaltes, Gewerbes und der Landwirtschaft fortgesetzt steigen. Bestimmte Zahlen können daher nicht angegeben werden. Man muß vielmehr sehr genaue Feststellungen an Ort und Stelle vornehmen, sofern Erfahrungswerte aus anderen ähnlichen Anlagen nicht bereits vorliegen, um nicht schon nach wenigen Betriebsjahren den erstmalig eingebauten Transformator durch einen wesentlich größeren ersetzen zu müssen. Das ist auch für die Raumbemessung des Transformatorhäuschens zu beachten. Unzweckmäßig ist es aber wiederum, von vornherein einen zu großen Transformator aufzustellen, weil Anschaffungskosten und Betriebsverluste dann in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zu den Stromeinnahmen stehen. Ist der Anschlußwert einigermaßen vollständig ermittelt, so wird man in der Mehrzahl der Fälle die Transformatorenleistung mit 75 vH dieses Anschlußwertes bemessen können und erhält so erfahrungsgemäß für längere Zeit ausreichende Reserve, sofern nicht unerwartet größere Abnehmer hinzukommen.

Da weiter für landwirtschaftliche Betriebe nur während der Dreschzeit mit größerer Belastung zu rechnen ist, bauen die deutschen Lieferfirmen sog. landwirtschaftliche Typen, die stärker überlastet werden können. Der VDE bestimmt in den RET für eine solche Betriebsart, daß die Landwirtschaftstypen während etwa 500 h im Jahre eine tägliche Überlastung von 100 vH während 12 Stunden zulassen muß. Ein besonderer wirtschaftlicher Vergleich ist auf S. 289 durchgearbeitet.

¹ Für die Bestimmung der Transformatorleistung an sich bzw. des Transformatormodells nach der Betriebsart sind in den RET ebenfalls fest umrissene Unterschiede festgelegt.

Die Netztransformatoren in Städten müssen besonders sorgfältig bemessen werden, weil für sie die Winterbelastung in der Hauptsache bestimmend ist und diese von Jahr zu Jahr häufig bedeutende Steigerung aufweist. Unmittelbar mit der Transformatorleistung hängt die Sicherung der Transformatoren gegen Überlastung zusammen. Sind die Höchststromschalter auf der Oberspannungsseite der zulässigen Überlastung der einzelnen Transformatoren entsprechend eingestellt, letztere aber schon an ihrer Belastungsgrenze und kommen plötzliche Überlastungen oder Kurzschlußübertragungen aus entfernten Netzteilen vor, so können Schalterauslösungen an Netzstellen eintreten, an denen sie nicht vorkommen dürften, und unliebsame, unter Umständen sogar schwerwiegende Betriebsstörungen sind die Folge. Hier heißt es daher, ständige Beobachtung durchführen und besser die Transformatoren größer wählen, um unabhängiger von der Schalterauslösung zu sein. Der Betrieb größerer städtischer Netze hat gezeigt, daß die Höchstbelastung solcher städtischen Netztransformatoren nicht über 75 vH ihrer Nennleistung steigen sollte. Anderenfalls sollen sie durch größere Einheiten ersetzt werden. Die mit der größeren Leistung verbundenen höheren Verluste, insbesondere induktiver Natur, bei schwacher Belastung und im Leerlauf dürfen hier keine wesentliche Rolle besonders dann nicht spielen, wenn für die Ober- und Unterspannung Kabel vorhanden sind. Die Kapazität dieser genügt in vielen Fällen, um den Leistungsfaktor bezogen auf das Kraftwerk günstig zu beeinflussen, was bei Überlandkraftwerken infolge der als Freileitungen ausgeführten Verteilungsanlagen jedenfalls bei mittleren Spannungen nicht der Fall ist. Vorteile wirtschaftlicher Art durch bessere Ausnutzung der Transformatoren sind auch in städtischen Netzen noch zu erreichen, wenn ein sicher arbeitender Wahlschutz verwendet wird, doch läßt sich letzterer selten anders als auf der Oberspannungsseite einbauen, hat damit also andererseits wieder gewisse Einschränkungen. Näheres ist im IV. Bande im einzelnen erläutert.

Für industrielle Anlagen wird sich die Größe der Transformatoren leichter bestimmen lassen. Mit Rücksicht auf Aushilfe bei Störungen und die Beweglichkeit bei Erweiterungen wird die verlangte Transformatorenleistung oft auf zwei oder drei Transformatoren zu verteilen sein. Die dadurch entstehenden Mehrkosten dürfen zu der gewonnenen Betriebssicherheit wiederum in keinem unwirtschaftlichen Verhältnis stehen. Durch Gegenüberstellung der Anschaffungskosten, der Wirtschaftlichkeit und der Betriebssicherheit wird sich die zweckmäßigste Aufteilung der Gesamtleistung auf mehrere Transformatoren verhältnismäßig leicht finden lassen. Zu unterscheiden ist dabei nach der Art des industriellen Betriebes entsprechend den RET zwischen:

- a) Dauerbetrieb, bei dem die Betriebszeit so lang ist, daß die dem Beharrungszustand entsprechende Endtemperatur, d. h. die besonders festgesetzten Grenzen für Temperatur und Erwärmung erreicht werden. Dabei muß die Nennleistung beliebig lange Zeit eingehalten werden können;
- b) Dauerbetrieb mit kurzzeitiger oder aussetzender Belastung;
- c) kurzzeitiger oder aussetzender Betrieb.

Bei der Mannigfaltigkeit der Betriebe ist es naturgemäß nicht möglich, bestimmte Richtlinien für die Leistungsbemessung zu geben. Erfahrung und Geschick des entwerfenden Ingenieurs zusammen mit dem eingehenden Studium der jeweils vorliegenden Betriebsverhältnisse werden hier bestimmend sein. Im folgenden soll, wo notwendig, nur der Dauerbetrieb mit der Nennleistung vorausgesetzt werden.

Die Transformatoren-Einzelleistung für die Haupttransformatoren in großen Fernkraftübertragungsanlagen zu bestimmen und auf mehrere Einheiten zu verteilen, erfordert ganz besonders sorgfältige Feststellungen auf Grund der Anschlußwerte der einzelnen Versorgungsgebiete, wobei in entsprechendem Maße auf den Zuwachs Rücksicht zu nehmen ist. Dann aber spielt weiter die Betriebssicherheit in diesen Anlagen die Hauptrolle. Es sollte unter Berücksichtigung der in Notfällen zulässigen Überlastung (S. 279) einzelner Transformatoren stets so viel Leistung für die einzelnen Gebiete oder in den Abschnitts-Transformatorenwerken vorhanden sein, daß beim Ausfall eines Transformators auch auf längere Zeit — da die Instandsetzung unter Umständen Monate ausmachen und bei großen Anlagen Ersatz nicht immer verfügbar sein kann — die notwendige Leistung noch mit Sicherheit zur Verfügung steht, selbst bei einer gewissen Überlastung der noch vorhandenen Transformatoren. Schon hier sei kurz bemerkt, daß gegebenenfalls durch verstärkte Kühlung die Belastungsfähigkeit eines Transformators gesteigert werden kann. Weiteres wird im nachfolgenden besprochen werden. Reserven zu halten, die allgemein verfügbar und von Ort zu Ort verschiebbar sind, wird sich in großen Überlandanlagen nicht ermöglichen lassen, weil die Unterspannung, die Kurzschlußspannung, die Primärspannung und damit das Übersetzungsverhältnis oftmals wesentliche Abweichungen zeigen. Daher wird heute auf eine solche überall verwendbare Reserve fast stets verzichtet. Sie hat sich nicht als praktisch erwiesen.

Ein anderer Gesichtspunkt sei schließlich noch erwähnt, für die Transformierung der Hochspannung auf eine Mittelspannung möglichst einheitliche Transformatoren in allen elektrischen und konstruktiven Verhältnissen zu wählen so z. B. für alle Stellen, an denen 100 auf 50 kV oder 30 auf 15 kV transformiert wird. Wenn auch hier die Leistungen beim ersten Netzausbau sehr unterschiedlich sein können, so kann ein solches Vorgehen doch in der Zukunft mit der Entwicklung der Versorgungsgebiete manche sehr beachtliche Vorteile bieten. Abweichungen in den Spannungsverhältnissen sekundär müßten in diesem Falle durch getrennte Zusatztransformatoren ausgeglichen werden.

47. Belastung, Überlastung, Temperatur und Erwärmung.

Die Belastung der Transformatoren wird in der Mehrzahl aller Anlagen innerhalb eines 24stündigen Betriebstages zwischen einem niedrigsten und einem höchsten Werte schwanken. Die größte Belastung im Dauerbetriebe, bei dem die Betriebszeit so lang ist, daß die dem Beharrungszustande entsprechende Endtemperatur erreicht wird, für

die der Transformator berechnet ist, darf nicht überschritten werden. Es werden in diesem Betriebszustande die einzelnen Baustoffe bis an die mögliche Grenze ausgenützt, d. h. die auftretenden Temperaturen erreichen ihren Höchstwert. Vorausgesetzt wird dabei, daß die Kühlmitteltemperatur (S. 351) bei Luftkühlung $+ 35^{\circ} \text{C}$ und bei Wasserkühlung $+ 25^{\circ} \text{C}$ nicht überschreitet. Irrig ist die Annahme, daß ein Transformator stärker als zulässig belastet werden darf, wenn die Kühlmitteltemperatur unter den angegebenen Werten liegt. Hierauf begründete Überlastungen kommen vor, sind aber für den Transformator sehr schädlich und können seine Lebensdauer an sich, wie auch die guten Eigenschaften des Öls bei Öltransformatoren wesentlich beeinträchtigen. Die RET enthalten keine Angaben über die Größe und Dauer von Überlastungen nach vorausgegangener Vollast oder Halbblast. Soll z. B. ein Öltransformator in der obersten Ölschicht im Dauerbetriebe eine Temperatur von 95°C als Grenztemperatur nicht überschreiten, und liegt die Kühlmitteltemperatur z. B. bei Wasserkühlung im Winter bei $\pm 0^{\circ} \text{C}$, so darf daraus nicht geschlossen werden, daß der Transformator nun so stark bzw. über längere Zeit überlastet werden kann, bis 95°C Öltemperatur in der obersten Ölschicht erreicht sind.

Die Zulässigkeit von Überlastungen ist abhängig von dem Temperaturgefälle zwischen Wicklungen und Öl, wobei die Öltemperatur entsprechend der Höhe der einer Überlastung vorausgegangenen normalen Dauerbelastung mit bestimmter Leistung zu berücksichtigen ist. Das Temperaturgefälle ist abhängig von den Kupferverlusten, die mit dem Quadrat der Stromstärke wachsen. Starke Überlastung kann daher dieses Temperaturgefälle so groß machen, daß nach kurzer Zeit die Wicklungstemperatur, die verhältnismäßig schnell auf ihren Höchstwert anwächst, weit über der zulässigen Grenze liegt, während die langsam ansteigende Temperatur des Öls noch weit unter dem Grenzwerte liegt. Die Folge davon ist eine Schwächung oder Zerstörung der Wicklungsisolation und damit eine außerordentliche Gefährdung des Transformators.

Ist der Transformator nicht dauernd vollbelastet, sondern treten während nur verhältnismäßig kurzer Tageszeiten Spitzenbelastungen auf, die eine Überlastung des Transformators bedeuten, so wird im allgemeinen eine solche Belastung von den Lieferfirmen zugestanden. Wie weit man hierbei gehen darf, ist allgemein schwer festzulegen. Es hängt dieses ganz von der Vorbelastung ab, die der Transformator über eine bestimmte Zeit vor Eintritt der Überlastung aufzuweisen hatte. Andernfalls muß mit Rücksicht auf geringste Stromerzeugungskosten, also geringstes Anlagekapital einerseits und bestmögliche Ausnützung der vorhandenen Betriebsmittel andererseits, sowie aus der Betriebsforderung, möglichst wenig zu schalten und zu regeln, eine bestimmte Überlastbarkeit der Transformatoren verlangt werden. Sonderfälle ausgenommen, sollten aus diesen Gründen etwa folgende Vorschriften erfüllt werden:

Nach etwa 6- bis 8stündiger Belastung mit halber Last soll die zulässige Leistungssteigerung, ohne daß die Temperaturerhöhung die

für dauernde Vollast geltenden Werte überschreiten darf, betragen dürfen:

5 Minuten lang	100 vH
10 „ „	60 „
1 Stunde „	30 „
3 Stunden „	15 „

ferner im Anschluß an dauernde Vollbelastung, sofern die Überlastungen nur selten vorkommen etwa an besonderen Belastungstagen oder bei Störungen:

während 24 Stunden um	30 vH
10 „ „	50 „
1 Stunde „	100 „

Die Siemens-Schuckert-Werke geben für ihre größeren normalen Transformatoren die in der Zahlentafel 16 zusammengestellten Werte für die Abhängigkeit der Erwärmung von der Belastung an.

Zahlentafel 16. Zulässige Überlastung für Öltransformatoren mit natürlicher Luftkühlung bei einer maximalen Lufttemperatur von 35° C. Betriebsmäßige Überlastungen; höchste Übertemperatur im Kupfer 70° C.

Dauerlast in vH der Nennleistung	Betriebsdauer in Stunden bei nachfolgender prozentualer Mehrbelastung im Anschluß an nebenstehende Dauerlasten						
	20 vH	30 vH	50 vH	75 vH	100 vH	125 vH	150 vH
50	<i>d</i> ¹	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	3	1
60	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	5¼	1¼ ₁₂	½	⅓
75	<i>d</i>	<i>d</i>	2½	½	¼	⅓	—
80	<i>d</i>	5¼	1¼	½	⅓	—	—
90	2¼	1¼	½	⅓	—	—	—

Überlastungen bei seltenem Vorkommen; höchste Übertemperatur im Kupfer 90° C.

Dauerlast in vH der Nennleistung	Betriebsdauer in Stunden bei nachfolgender prozentualer Mehrbelastung im Anschluß an nebenstehende Dauerlasten						
	20 vH	30 vH	50 vH	75 vH	100 vH	125 vH	150 vH
50	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	4¼
60	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	6½	2⅓	1
75	<i>d</i>	<i>d</i>	24	2¼	1	½	⅓
80	<i>d</i>	<i>d</i>	6¼	1½	¾	⅓	¼
90	24	6	2	¾	½	⅓	—

Ganz allgemein für die Belastungsfähigkeit eines Transformators ist weiter mitbestimmend der Leistungsfaktor, mit welchem die angeschlossenen Anlagen arbeiten, der also an den Sekundärklemmen des Transformators vorhanden ist. Tagsüber wird dieser Leistungsfaktor — größere industrielle Anlagen oder Stromversorgungsgebiete vorausgesetzt — infolge der stärkeren Stromlieferung für motorische Zwecke schlechter sein und etwa bei $\cos \varphi_2 = 0,5$ bis 0,7 liegen. Abends zeigt er durch das Überwiegen der Beleuchtung oder infolge Stillstandes der Kraftbetriebe bessere Werte zwischen 0,8 bis 0,9 und mehr. Wie be-

¹ *d* = dauernd.

reits auf S. 275 kurz gesagt, wird die Transformatorenleistung stets in kVA vom Konstrukteur angegeben. Die Belastung der Wicklungen, damit ihre zulässige Erwärmung, ist somit nur von der Höhe des Stromes abhängig, der aus Gl. (130) für Drehstrom zu bestimmen ist:

$$I_2 = \frac{\text{kW} \cdot 1000}{U_2 \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi_2} . \quad (130)$$

Der Betrieb hat also den Transformator nur nach der sekundären Stromstärke zu fahren und Überlastungen nur nach der Höhe des Stromes zu beurteilen. Infolgedessen ist für jeden Transformator als Betriebsmeßgerät eindeutiger und sicherer ein Strommesser als ein Leistungsmesser zusammen mit einem $\cos \varphi$ -Anzeiger.

Von betriebswirtschaftlicher Seite aus ist schließlich zu fordern, daß die Grundbelastung eines Transformatorenwerkes einen Teil der vorhandenen Transformatoren möglichst voll oder mit Rücksicht auf plötzlichen Ausfall eines Transformators mit etwa 75 vH ihrer Leistung beansprucht, um an Verlusten zu sparen, an Betriebssicherheit für einen Störfall zu gewinnen und häufiges Zu- und Abschalten zu vermeiden. Das spricht weiter dafür, daß in den Einzelleistungen parallel arbeitender Transformatoren in einem Werke kein zu großer Unterschied gemacht werden sollte, zumal dann besonders nicht, wenn auf eine ständige Bedienung und Beaufsichtigung möglichst verzichtet werden soll.

48. Kurzschlußspannung, Spannungsänderung und Wirkungsgrad¹.

Unter Kurzschlußspannung e_k wird die Spannung verstanden, die bei kurzgeschlossenener Sekundärwicklung an die Primärwicklung angelegt werden muß, damit sie den Nenn-Primärstrom aufnimmt. Sie wird in Prozenten der Nenn-Primärspannung ausgedrückt. Für gewöhnlich beträgt diese Kurzschlußspannung e_k etwa 3 bis 4 vH. Für alle größeren Transformatoren, die an ausgedehnte Fernkraftübertragungsanlagen mit großen Kraftwerken angeschlossen werden, erhält diese Kurzschlußspannung eine besondere Bedeutung. Wie im IV. Bande bei der Berechnung der Kurzschlußleistung an bestimmten Stellen eines ausgedehnten Großkraftübertragungsnetzes im einzelnen behandelt kann bei sehr großen Maschinenleistungen oder infolge des Zusammenschlusses mehrerer Kraftwerke eine so große Kurzschlußleistung entstehen, daß ein Kurzschluß an einer schwachen Netzstelle, z. B. einem alten Schalter einer Anschlußanlage unter Umständen katastrophale Zerstörungen herbeiführen kann. Es sind solche Fälle leider schon häufiger vorgekommen und haben schwere Wirkungen im Gefolge gehabt. Zur Verhütung solcher Gefahren werden Drossel-

¹ Von den elektrischen Größen in der RET sollen hier Kurzschlußspannung, Spannungsänderung und Wirkungsgrad besonders behandelt werden, weil sie für den Betrieb von erhöhter Bedeutung sind und der entwerfende Ingenieur entsprechende Vorschriften von vornherein berücksichtigen muß.

spulen auf der Sekundärseite der Netztransformatoren angewendet, deren Reaktanz so groß gewählt wird, daß im Falle eines zwei- oder dreipoligen Kurzschlusses nur eine bestimmte Kurzschlußleistung auftreten kann. Um nun Drosselspulen zu vermeiden, die Platz, Geld und Verluste bedingen, wird ihre Wirkung der Transformatorwicklung übertragen dadurch, daß die Reaktanz dieser künstlich, also über den normal in der Wicklung an sich vorhandenen Wert erhöht wird, denn die Reaktanzspannung ist angenähert gleich der Kurzschlußspannung. Man wählt daher für solche Fälle die Kurzschlußspannung höher als oben angegeben. Sehr große Transformatoren werden heute mit einer $e_k = 6$ bis 15 vH und darüber ausgeführt. Geben die Verhältnisse genügende Unterlagen, so ist nicht willkürlich, sondern rechnerisch festzustellen, welche Kurzschlußleistung z. B. bei kleinen, an ein großes Netz anzuschließenden Abnahmestellen zu erwarten ist, und daraus ist dann die dem Transformator zu gebende Kurzschlußspannung zu ermitteln. Liegen mehrere Transformatoren parallel, so sinkt der Wert der Gesamtkurzschlußspannung nach dem bekannten Gesetz paralleler Widerstände. Liegen bei mehrfacher Transformierung Transformatoren hintereinander, so addieren sich ihre Reaktanzen, wozu weiter die Reaktanzen der Leitungstrecken kommen. Wird dieses nicht beachtet, so kann die Kurzschlußspannung für einen bestimmten Transformator zu hoch gewählt werden, und daraus ergibt sich dann eine unter Umständen betrieblich sehr unangenehme Beeinflussung der Spannungsregelung, weil die Spannungsänderung im Transformator von Leerlauf bis Vollast zu groß wird. Andererseits können durch eine solche Begrenzung der Kurzschlußleistung mit Hilfe der Transformatoren oftmals große Ausgaben für die Auswechslung älterer vorhandener Schalter u. dgl., sowie für den Umbau einer alten Schaltanlage vermieden und Störungsquellen für den Gesamtbetrieb sicher ausgeschaltet werden. Über den Einfluß der Kurzschlußspannung auf den Parallelbetrieb von Transformatoren untereinander wird auf S. 301 verwiesen.

Mit Spannungsänderung e_φ eines Transformators wird die Erhöhung der Sekundärspannung bei einem bestimmten Leistungsfaktor bezeichnet, die bei Übergang von Nennbetrieb (Vollastbetrieb) auf Leerlauf auftritt, wenn Primärspannung und Frequenz ungeändert bleiben. Sie wird in Prozenten der Nenn-Sekundärspannung ausgedrückt. Sie kann nach Gl. (131) für bestimmte Leistungsfaktoren berechnet werden, wenn die Kurzschlußspannung e_k und die Spannungsänderung e_r bei induktionsfreier Belastung in Prozenten der Nenn-Sekundärspannung bekannt sind. Diese beiden Werte sind von den Lieferfirmen stets anzugeben.

Es ist:

$$e_\varphi = \sqrt{e_k^2 - e_r^2} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} + e_r \cdot \cos \varphi_2, \quad (131)$$

$\cos \varphi_2$ = Leistungsfaktor des Anschlusses auf der Sekundärseite des Transformators.

Aus Gl. (131) ist zu ersehen, daß e_φ einmal besonders stark abhängig ist von e_k und weiter von dem Leistungsfaktor $\cos \varphi_2$, mit wel-

chem¹ der Transformator sekundär beansprucht wird. In Abb. 205 ist für einen 10000 kVA Drehstromtransformator e_{φ} in Kennlinien zusammengestellt unter der Annahme verschiedener Kurzschlußspannungen und Leistungsfaktoren. Man sieht, wie stark die Spannungsänderung mit größerem e_k in die Erscheinung tritt.

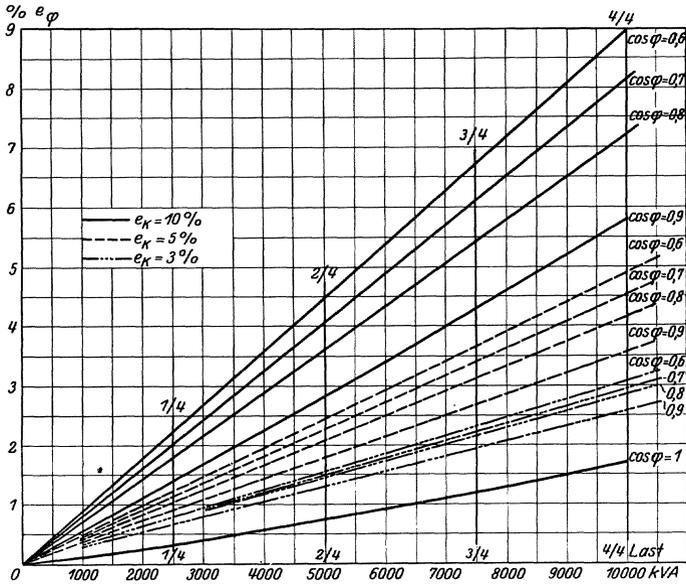


Abb. 205. Spannungsänderung bei einem 10000 kVA Drehstromtransformator in Abhängigkeit von der Belastung bei verschiedener Kurzschlußspannung und verschiedenem Leistungsfaktor.

In ausgedehnteren Netzen kann die Spannung an den Hauptsammelschienen der Kraftwerke nicht mehr ständig den wechselnden Belastungen jeder Abnahmestelle entsprechend geregelt werden, sondern es wird im wesentlichen nach besonderen Fahrplänen gefahren, die nur die Jahres- und Tageszeiten, letztere nach Morgen, Mittag, Nachmittags, Abendspitze und Nacht berücksichtigen. Haben die Netztransformatoren zu starke Spannungsänderungen, so kann die dem Verbraucher zugeführte Spannung in unzulässigen Grenzen schwanken. Dann wird der Einbau besonderer Spannungsregelvorrichtungen erforderlich. Man muß daher fortgesetzt — namentlich bei Erweiterungen — rechnerische Prüfungen vornehmen, mit welcher Kurzschlußspannung neue Transformatoren auszuführen sind und wie sich dann bei gutem und schlechtem Leistungsfaktor die Spannungsregelung ohne Zusatzmittel gestaltet. Hierin werden oft wesentliche Fehler gemacht. Bei der Berechnung der Leitungen im II. Bande ist hierauf ganz besonders eingegangen.

Wie sich die einzelnen Wechselstrommotoren gegenüber zu starken Spannungsschwankungen verhalten, ist im I. Abschnitt ausführlich besprochen worden.

Der Wirkungsgrad η_{Trf} eines Transformators ist in Prozenten ausgedrückt:

$$\eta_{Trf} \text{ vH} = \left. \begin{aligned} &= \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}} \cdot 100 \\ &= \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1} \cdot 100; \end{aligned} \right\} \quad (132)$$

den Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ auf der Primärseite des Transformators kann man mit hinreichender Genauigkeit gleich $\cos \varphi_2$ setzen, denn der induktive Spannungsabfall im Transformator beträgt nur wenige Prozente. Es kann also die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung innerhalb des Transformators, zumal $\cos \varphi_2$ an und für sich zumeist nur oberflächlich berechnet und dann nach der ungünstigeren Seite abgerundet wird, praktisch vernachlässigt werden.

Der Wirkungsgrad der heutigen Transformatoren ist sehr gut; er erreicht auch bei kleinen Leistungen im Mittel Werte von etwa 97 bis 98 vH bei induktionsfreier Vollbelastung. Er ist somit besser als derjenige jeder anderen zur Transformierung bzw. Umformung dienenden Einrichtung. Bei induktiver Belastung sinkt η_{Trf} nur um ein Geringes unter den vorgenannten Wert.

Ist der Wirkungsgrad eines Transformators im betriebswarmen Zustande bei Vollast, $\cos \varphi_2 = 1$ und Frequenz = 50 bekannt, und sind weiter die Leerlauf- und Wicklungsverluste angegeben, so kann der Wirkungsgrad für andere Belastungen und andere Leistungsfaktoren aus Gl. (133) festgestellt werden:

$$\eta_{Trf} \text{ in vH} = 100 - \frac{100 (V_{Cu} + V_{Fe})}{N_{Trf} + V_{Cu} + V_{Fe}}. \quad (133)$$

Hierin bezeichnet:

V_{Cu} den Wicklungsverlust in kW bei der jeweiligen Belastungshöhe,

V_{Fe} den Leerlaufverlust (Eisenverlust) in kW,

N_{Trf} die Belastung in kW = kVA $\cdot \cos \varphi$ (Belastungshöhe).

Beispiel: Transformatorleistung 1000 kVA, $V_{Cu} = e_r = 1,52$ vH, $V_{Fe} = 3,85$ kW. Es soll der Wirkungsgrad bei $\frac{3}{4}$ Last und $\cos \varphi_2 = 0,7$ bestimmt werden:

$$N_{Trf} = 1000 \cdot 0,75 \cdot 0,7 = 525 \text{ kW},$$

$$V_{Cu} = \frac{1,52}{100} \cdot 1000 \cdot \frac{3^2}{4^2} = 8,55 \text{ kW},$$

$$V_{Fe} = 3,85 \text{ kW}.$$

$$\eta_{\frac{3}{4}} = 100 - \frac{100 (3,85 + 8,55)}{525 + 3,85 + 8,55} = 97,74 \text{ vH}.$$

Da die Transformatoren in solchen Anlagen, in denen dauernd Strom zur Verfügung stehen muß (Elektrizitätswerke, Überlandwerke), 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 er-

höht. Dieser Umstand muß bei Aufstellung einer Wirtschaftlichkeitsberechnung genügend beachtet werden. Man tut das durch Ermittlung des Jahreswirkungsgrades.

Es ist zunächst allgemein:

$$\eta_{j, Trf} = \frac{\text{abgegebene Leistung in kW im Jahre}}{(\text{abgegebene Leistung} + \text{Verluste}) \text{ in kW im Jahre}} \quad (134)$$

Dieser Transformator-Jahreswirkungsgrad kann die Wahl eines Transformatormodells unter Umständen maßgebend bestimmen, wie die nachstehende Rechnung zeigen wird, zumal dann, wenn die Zeit bzw. Stundenzahl, die der Transformator voll- oder annähernd vollbelastet im Betriebe ist, gegenüber der Jahresstundenzahl bei dauernd eingeschaltetem Transformator gering ist.

Die Verluste im Transformator setzen sich zusammen aus den Leerlaufverlusten (Eisenverluste) V_{Fe} und den Wicklungsverlusten (Kupferverlusten) V_{Cu} . Die Leerlaufverluste sind bei jeder Belastung, also sowohl bei Vollbelastung als auch bei Leerlauf, praktisch gleich, während sich die Wicklungsverluste $I^2 \cdot R$ mit dem Quadrat der Stromstärke ändern, also bei Halblast nur $\frac{1}{4}$, bei Viertelast nur $\frac{1}{16}$ des Vollastverlustes betragen. Der Wicklungsverlust berechnet sich aus dem Spannungsabfall nach Gl. (135):

$$V_{Cu} \text{ (kW)} = \frac{e_r}{100} \cdot N_{Trf} \text{ (in kVA)} \cdot (\text{Belastungshöhe})^2 \quad (135)$$

Es liegt nun in der Hand des Konstrukteurs¹, 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 kleiner und die Wicklungsverluste größer zu machen oder umgekehrt. Ist der Transformator für gemischte Kraftübertragungsanlagen bestimmt, demnach dauernd eingeschaltet, aber nur selten stark oder vollbelastet, so wird man die Wicklungsverluste, da sie nur während der Zeit der Belastung auftreten, größer und die Leerlaufverluste kleiner nehmen, weil letztere, wie gesagt, dauernd vorhanden sind und die Leerlaufzeit gegenüber der Belastungszeit wesentlich ins Gewicht fällt. Umgekehrt werden bei Haupttransformatoren für industrielle Anlagen, die nach Stillsetzen der Motoren gleichfalls primär ausgeschaltet werden, die Wicklungsverluste klein und die Eisenverluste größer zu wählen sein. Die Transformatoren werden dann zwar teurer, haben aber einen etwas besseren Wirkungsgrad.

Wie unterschiedlich unter Umständen der Jahreswirkungsgrad beim Vergleich von Transformatoren mit verschiedenen Einzelverlusten, aber gleichem Betriebswirkungsgrade ausfallen können, wird die nachfolgende Rechnung zeigen.

In Abb. 206 ist eine heute bei gleichzeitiger Speisung von Licht- und Kraftanlagen aus einem Überlandwerke häufig anzutreffende Kennlinie für den durchschnittlichen Jahresverlauf der Belastung und

¹ Lindner, E.: Der „billigste“ Transformator. Bergmann-Mitteilungen 1927.

in Abb. 207 eine solche für den Transformator eines neuzeitig eingerichteten industriellen Werkes dargestellt. In Abb. 208 und 209 sind aus diesen Kennlinien die einzelnen Belastungsgrößen über ihrer Jahresdauer aufgetragen. Bei der Ermittlung der Betriebsstundenzahl t_B , während welcher die Wicklungsverluste der Höhe der Leistung ent-

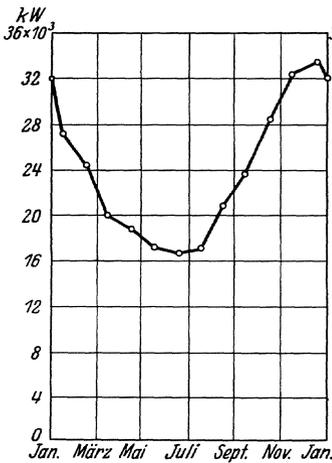


Abb. 206. Jahresbelastungsverlauf eines Überlandwerkes.

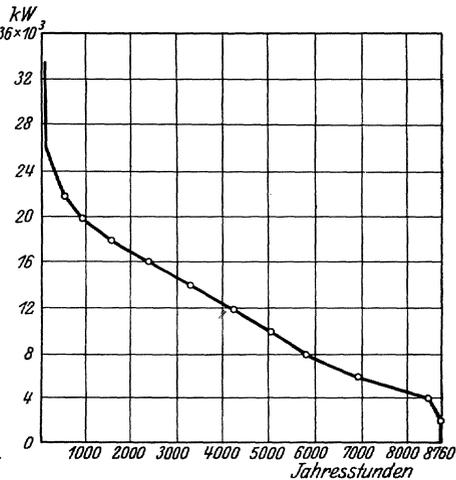


Abb. 208. Jahresbenutzungsstunden der Belastung zu Abb. 206.

sprechen aufgetreten sind, wird man den Kennlinienverlauf nach Abb. 208 und 209 berücksichtigen müssen, obgleich hier naturgemäß so außerordentliche Verschiedenheiten aus der stets wechselnden Betriebsart

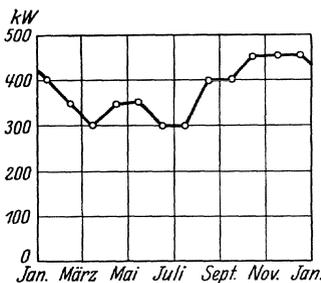


Abb. 207. Jahresbelastungsverlauf eines Industrierwerkes.

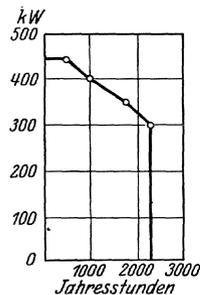


Abb. 209. Jahresbenutzungsstunden der Belastung zu Abb. 207.

der Abnehmer und der fortgesetzten Steigerung des Strombezuges eintreten können, daß auch nur einigermaßen richtige Werte kaum anzugeben sind. Ein Kriterium für die Jahresausnützung einer Anlage, hier also eines Transformators, gestatten die Jahresbenutzungsstunden t_L der Höchstleistung :

$$t_L = \frac{\text{Gesamte Jahresarbeitsmenge in kWh}}{\text{aufgetretene Höchstleistung in kW}} \cdot$$

Man könnte also ohne wesentlichen praktischen Fehler diese Jahresbenutzungsstunden der Höchstleistung der Berechnung des Jahreswirkungsgrades zugrunde legen und würde dann beim Vergleich verschiedener Transformatoren mit unterschiedlichen Wicklungs- und Leerlaufverlusten stets den gleichen Fehler machen. Will man für wirtschaftliche Zwecke besondere Sorgfalt anwenden, so können die Kennlinien nach Abb. 208 bzw. 209 zugrunde gelegt werden. Eimer¹ hat durch Integration verschiedener Jahresbelastungskennlinien der Form nach Abb. 208 ermittelt, daß die mittlere jährliche Dauer τ des vollen Energieverlustes (nur Stromwärmeverluste berücksichtigt) gegenüber der mittleren jährlichen Dauer der vollen Belastung t_L nach der Kennlinie Abb. 210 verläuft. Aus dieser ergibt sich bei:

$$\begin{aligned}
 t_L &= 0 \quad 2900 \quad 4350 \quad 5800 \quad 8700 \\
 \tau &= 0 \quad 1740 \quad 2900 \quad 4640 \quad 8700 \\
 \text{oder} \\
 k = \frac{\tau}{t_L} &= 0 \quad 0,6 \quad 0,665 \quad 0,80 \quad 1,00
 \end{aligned}$$

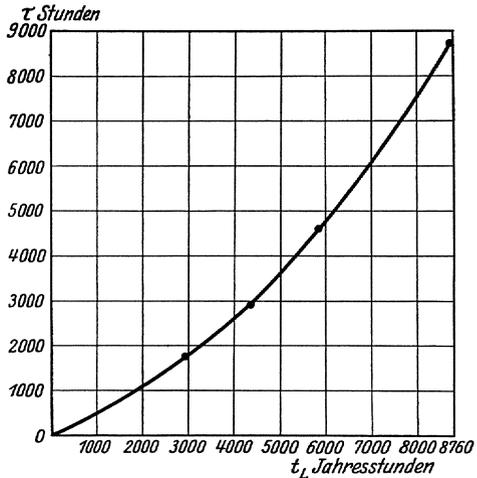


Abb. 210. Mittlere jährliche Volllast-Verluststundenzahl in Abhängigkeit von der Jahresvolllaststundenzahl.

Bezeichnet man diesen Berichtigungswert mit k , so ist $\tau = k \cdot t_L$, und es ergibt sich nunmehr der Jahreswirkungsgrad eines Transformators zu:

$$\eta'_{T_{rf}} = \frac{N_{T_{rf}} \cdot t_L}{N_{T_{rf}} \cdot t_L + V_{Cu} \tau + V_{Fe} \cdot t_j} \tag{136}$$

Für industrielle Anlagen ist k entweder besonders zu ermitteln oder unberücksichtigt zu lassen, wenn der Transformator nach Arbeitsschluß abgeschaltet wird.

In Zahlentafel 17 sind die technischen Daten für drei Drehstromtransformatoren gleicher Leistung und Übersetzung, auch sonst übereinstimmender Werte zusammengestellt. Die Kurzschlußspannungen sind ebenfalls gleich, aber die Leerlauf- und Wicklungsverluste und damit auch die Spannungsabfälle weichen voneinander ab. Die Transformatoren sind für ein großes Überlandwerk bestimmt. Der Vergleich der Wirkungsgrade bei $1/1$ Last und $\cos \varphi = 0,8$ zeigt keine wesentlichen Unterschiede, die für die Wahl des einen oder anderen Transformators von ausschlaggebender Bedeutung wären. Die Abweichungen des Jahreswirkungsgrades berechnet auf der Grundlage der Vollbelastung bei $\cos \varphi = 0,8$ und 3500 Jahresbenutzungsstunden derselben sind indessen bereits beachtlich. Wird der Anschaffungspreis für alle drei

¹ Eimer, Dr. H.: Die wirtschaftlich günstigste Spannung für Fernübertragung mittels Freileitungen. Berlin: Julius Springer.

Transformatoren gleich angenommen, was in der Praxis zutreffen wird, wenn erstklassige Ausführungen durch Großfirmen vorausgesetzt werden, so ist lediglich der Verlust zu beurteilen. Dieser ist in Prozenten der Jahresarbeitsmenge in Zahlentafel 17 ebenfalls angegeben. Die Wirkungsgradunterschiede sind betriebswirtschaftlich betrachtet in diesen Fällen ohne Bedeutung. Selbst wenn sie kapitalisiert auf den Beschaffungspreis bezogen werden, so gewinnt lediglich der Transformator III nach dieser Richtung insofern an Bedeutung, als sein Beschaffungspreis um 12500 RM. niedriger sein müßte als der des Transformators II. Trotz des Ergebnisses der in der Zahlentafel 17 verglichenen Transformatoren sollte die Feststellung des Jahreswirkungsgrades für verschiedene Jahresbelastungstunden t_L für größere Anlagen nicht unterbleiben.

Erwägungen in der gleichen Weise sind unter Berücksichtigung der Art der Antriebsmaschinen der Stromerzeuger anzustellen. So wird man bei Dampfturbinen und teuren Kohlenpreisen besser die Leerlaufverluste der Transformatoren gering wählen, weil die Stromerzeugungskosten hoch sind, und die ständig zu deckenden Verluste demnach so weit wie irgend möglich vermindert werden müssen, während bei geringen Selbstkosten der kWh 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, werden Abmessungen und damit Anschaffungspreis kleiner, wenn 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. 326 bis 343 eingehender behandelt werden.

Für den Vergleich eines Einheitstransformators mit einem solchen der Landwirtschaftstypen soll schließlich noch ein Beispiel durchgerechnet werden, das zeigt, wie in dieser Beziehung zu verfahren ist.

Beispiel: Der Anschlußwert einer Dorfgemeinde erfordert die Aufstellung eines 30 kVA Transformators. Zum Vergleich steht ein 30-kVA-Einheitstransformator zu einem solchen der Landwirtschaftsbauform mit vorübergehender 100 vH Überlastungsfähigkeit. Die jährliche Benutzungsdauer der Transformator-Vollleistung kann mit 600 Stunden angenommen werden und zwar:

a) 980 Stunden Abendbeleuchtung (Sonnenuntergang bis 21 Uhr) mit 10 vH Vollbelastung; $980 \cdot 0,1 = 98$ Benutzungsstunden;

b) 240 Stunden Morgenbeleuchtung (6 Uhr bis Sonnenaufgang) mit 5 vH Vollbelastung; $240 \cdot 0,05 = 12$ Benutzungsstunden;

c) keine Nachtbelastung, aber ständige Bereitschaft von 21 bis 6 Uhr;

d) 140 Stunden des gesamten Kraftanschlusses ohne Dreschmotor unter der Voraussetzung, daß der Kraftanschlußwert 50 vH der Vollbelastung des Transformators beträgt; $140 \cdot 0,5 = 70$ Benutzungsstunden;

e) 420 Stunden Dreschbetrieb bei Vollbelastung des Transformators; $420 \cdot 1 = 420$ Benutzungsstunden. Summe a) bis e) 600 Stunden der Vollenleistung des Transformators.

Der Leistungsfaktor der Abnahme soll unberücksichtigt bleiben. Technische Daten der Transformatoren:

	Einheitstransformator 30 kVA, 15000/400/230 V Stern/Zickzackschaltung	Sondertransformator 15/30 kVA, 15000/400/230 V Stern/Zickzackschaltung
Leerlaufsverlust	0,28 kW	0,165 kW
Wicklungsverlust bei $\cos \varphi = 1$	0,87 kW	0,72 kW
Preis R.M.	2170,—	2170,—
Wirtschaftlicher Vergleich.		
a)	$980 \cdot 0,87 \cdot 0,1^2 = 8,526$ kWh	$980 \cdot 0,72 \cdot 0,1^2 = 7,056$ kWh
b)	$240 \cdot 0,87 \cdot 0,05^2 = 0,522$ „	$240 \cdot 0,72 \cdot 0,05^2 = 0,432$ „
c)	$140 \cdot 0,87 \cdot 0,5^2 = 30,450$ „	$140 \cdot 0,72 \cdot 0,5^2 = 25,200$ „
d)	$420 \cdot 0,87 \cdot 1^2 = 365,400$ „	$420 \cdot 0,72 \cdot 1^2 = 302,400$ „
Jahres-Wicklungsverlust	= 404,898 kWh	= 335,088 kWh
Jahres-Leerlaufsverlust	$8760 \cdot 0,28 = 2452,800$ „	$8760 \cdot 0,165 = 1445,400$ „
Gesamt-Jahresverlust	= 2857,698 kWh	1780,488 kWh
somit höherer Verlust	= 1077,210 „	—
Gesamt-Verlustrausgabe bei 30 Pf.		
Durchschnitts-Strompreis	R.M. 857,31	534,15
Verlustunterschied	R.M. 323,16	—

Der Transformator der Sonderreihe ist demnach bei gleichem Beschaffungspreise betriebswirtschaftlich wesentlich günstiger. Rechnet man den Ausgabenunterschied als Kapitalersparnis, so würde bei 14 vH diese Summe einem Anlagekapital von R.M. 2300,— entsprechen. Demzufolge könnte etwa schon nach 1 Jahr ein zweiter Transformator aus den Ersparnissen beschafft werden.

49. 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. Beim Mehrphasentransformator 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 wissenswert sind. Ohne

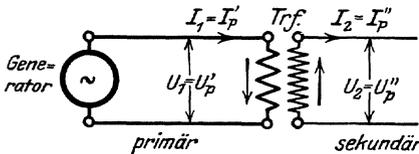


Abb. 211. Innere Schaltung des Einphasentransformators.

auf besondere theoretische Ableitungen¹ einzugehen, soll das Wesentliche der einzelnen Schaltungen kurz gekennzeichnet werden.

a) Der Einphasentransformator.

Über die allgemeine Schaltung der Wicklung des Einphasentransformators (Abb. 211) ist, soweit es den entwerfenden Ingenieur angeht, nichts Besonderes zu erwähnen. Die Phasenspannung U_p ist gleich der Klemmenspannung U , und der die Leitungen durchfließende Strom I unterscheidet sich nicht von dem Phasenstrom I_p ; das gilt

¹ Siehe Arnold, E. und J. L. la Cour: Die Wechselstromtechnik Bd. 2.

natürlich sowohl für den primären, als auch für den sekundären Teil. Es ist also:

$$I_1 = I'_p \text{ bzw. } I_2 = I''_p, \\ U_1 = U'_p \quad ,, \quad U_2 = U''_p.$$

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 die unverkettete und die verkettete Schaltung Anwendung finden.

Bei der unverketteten Schaltung (Abb. 212) sind die beiden Phasen vollständig voneinander unabhängig; sie bilden also zwei ganz getrennte Stromkreise. Phasenstrom I_p und Phasenspannung U_p sind gleich dem Leitungsstrom I bzw. der Klemmenspannung U , also für jede Phase:

$$I_1 = I'_p \text{ bzw. } I_2 = I''_p, \\ U_1 = U'_p \quad ,, \quad U_2 = U''_p.$$

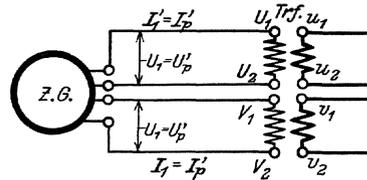


Abb. 212. Innere Schaltung des Zweiphasentransformators (unverkettete Schaltung).

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 praktisch unabhängig hiervon ist. Diesen Vorzügen der gegenseitigen Unabhängigkeit stehen die Nachteile gegenüber, daß vier Leitungen notwendig sind, wodurch die Anlagekosten für das Leitungsnetz und die Schalter, Sicherungen, Meßgeräte, Zähler sehr hoch ausfallen. Werden aus der Zweiphasenschaltung zwei selbständige Einphasenanlagen betrieben (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, 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 der Zweiphasenanlage größer sind als bei der Dreiphasenschaltung.

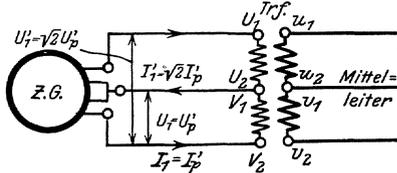


Abb. 213. Innere Schaltung des Zweiphasentransformators (verkettete Schaltung [V-Schaltung]).

Verkettet man die beiden Stromkreise des Transformators primär und sekundär in der Form, daß man die Wicklungsenden der beiden Phasen U_2 und V_1 bzw. u_2 und v_1 (Abb. 213) zusammenschaltet, so gilt trotzdem hinsichtlich der Unabhängigkeit der beiden Phasen voneinander das gleiche wie bei der unverketteten Schaltung. Diese Schaltung

nennt man die offene Dreieck- oder V-Schaltung. Wenn hier auch der Nachteil des vierten Leiters primär und sekundär vermieden wird, so ist die Schaltung dennoch nur bedingt brauchbar, 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 die letztere um den $\sqrt{2}$ -fachen Betrag höher als die erstere. Ferner unterscheiden sich 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.

Es ist daher für Abb. 213.

$$\begin{aligned}
 U_1 &= U'_p \quad [\text{zwischen } U_1(u_1) \text{ u. } U_2(u_2) \text{ u. } V_1(v_1) \text{ u. } V_2(v_2)] & U_2 &= U''_p, \\
 U'_1 &= \sqrt{2} \cdot U'_p & [\text{zwischen } U_1(u_1) \text{ und } V_2(v_2)] & & U'_2 &= \sqrt{2} \cdot U''_p, \\
 I_1 &= I'_p & \text{in jedem Außenleiter} & & I_2 &= I''_p, \\
 I'_1 &= \sqrt{2} \cdot I'_p & \text{im Mittelleiter} & & I'_2 &= \sqrt{2} \cdot I''_p.
 \end{aligned}$$

Schaltet man infolge der höheren Spannung zwischen die Außenleiter z. B. alle Motoren größerer Leistung, weil die Stromstärke um $\sqrt{2}$ kleiner und demzufolge der Leitungsquerschnitt geringer wird, so müßten Einphasenmotoren benutzt werden, die in vielen Fällen nicht erwünscht sind. Diese Schaltung hat den weiteren Nachteil, daß infolge der höheren Mittelleiterstromstärke je besondere Schaltgeräte für Außenleiter und Mittelleiter notwendig werden und zwar für verschiedene Stromstärken eingestellte selbsttätige Schalter, verschieden bemessene Sicherungen, Meßwandler usw., und ferner der Querschnitt für den Mittelleiter stärker ausfällt als für die Außenleiter.

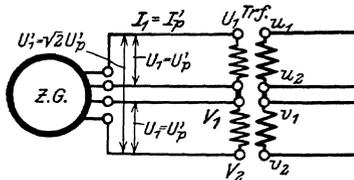


Abb. 214. Innere Schaltung des Zweiphasentransformators (verkettete Schaltung mit 4 Leitungen).

Eine Verkettung der Phasen kann schließlich noch nach Abb. 214 vorgenommen werden, die indessen keine besonderen Vorzüge gegenüber den Schaltungen nach Abb. 212 und 213 aufweist.

Wegen der geschilderten Nachteile und in der Hauptsache, weil die Zweiphasenmotoren gegenüber den Drehstrommotoren sowohl im Preise wie in den Abmessungen und in ihrer Arbeitsweise (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 kaum mehr gebaut, wie überhaupt diese Stromart nur so lange in Gebrauch war, bis der Drehstrom erfunden wurde, der dann die Zweiphasenschaltung vollständig verdrängt hat.

c) Der Dreiphasen- oder Drehstromtransformator. Die inneren Schaltungen der Primär- und Sekundärwicklung eines Dreiphasen-

transformators sind in einfachster Form in Abb. 215 und mit Angabe der Strom- und Spannungsverhältnisse in Abb. 216 bis 218 dargestellt.

Man unterscheidet für die Primär- und Sekundärwicklungen getrennt: die Dreieck-, die Stern- und die Doppelstern- oder Zickzackschaltung. Diese Grundschaltungen primär und sekundär werden den jeweiligen Betriebsverhältnissen entsprechend benutzt. Bei der Dreieckschaltung sind die Wicklungsenden so miteinander verbunden, daß die Spannungsvektoren in der in der Wechselstromtechnik üblichen vektoriellen Darstellung 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 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, wie Abb. 215 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 Abb. 215 z. B. Dreieck-Dreieck oder Stern-Stern), letztere als eine gemischte Schaltung (in Abb. 215 z. B. Dreieck-Stern- oder Stern-Doppelstern). Die Sternschaltung gibt weiter die Möglichkeit, einen vierten Leiter zu benutzen, der an den Nullpunkt angeschlossen wird. Dann erhält

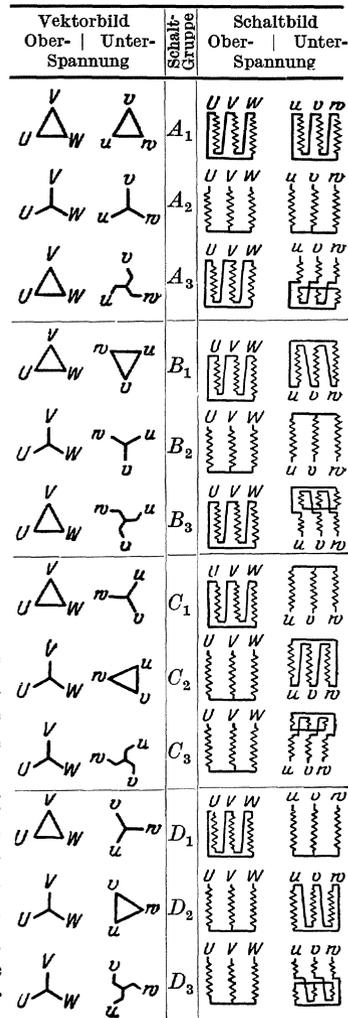


Abb. 215. Einfache Darstellung der verschiedenen inneren Schaltungen bei Drehstromtransformatoren.

¹ Der bequemeren Vorstellung wegen sind auch die Wicklungen in Abb. 215 bis 218 entsprechend gezeichnet, während die praktische Anordnung der Eisenkerne im Transformator keineswegs in Form eines Dreieckes oder Sternes erfolgen muß. So zeigt Abb. 238 einen Drehstromtransformator in Stern-Sternschaltung der Wicklungen, bei dem die Eisenkerne nebeneinander stehen.

man nach Abb. 218 zwei Spannungen und zwar die Spannung zwischen je zwei Phasen (die verkettete Spannung) U und die Spannung zwischen Phase und Nullpunkt, die Phasenspannung U_p , die um $\sqrt{3}$ kleiner ist als die verkettete Spannung ($U_p = \frac{U}{\sqrt{3}}$). Dieser große Vorteil wird für die Transformatoren, die auf Gebrauchsspannung (z. B. 220 V) transformieren, in weitestgehendem Maße ausgenutzt. Wird die Unterspannung zu $U = 380$ V zwischen den Phasen gewählt, so beträgt die zweite Spannung zum Nullpunkte $U_p = 220$ V. Erstere dient dann zum Anschluß von Motoren, letztere für die Beleuchtung und alle kleinen Gebrauchsgereäte. Für die Transformatoren in den Kraftwerken und Haupttransformatorenwerken bis zur Mittelspannung als Primärspannung, an die also keine unmittelbare Stromkleinverteilung angeschlossen ist, kommt der vierte Leiter nicht in Frage. Es wird sich daher die Beurteilung der einzelnen inneren Schaltungen für die Vierleiterschaltung nur auf die Netztransformatoren zu erstrecken haben, die Gebrauchsspannung abgeben.

Für die Wahl der einen oder anderen inneren Schaltung sind sowohl die Betriebs- als auch die Bauverhältnisse maßgebend und zwar sind für erstere zu nennen:

weitestgehende Unabhängigkeit der sekundären Spannung zwischen den einzelnen Phasen von ungleicher Belastung, wozu als Grenzfälle zu rechnen sind einphasiger Erdschluß oder Leitungsbruch und zweiphasiger Kurzschluß; keine Gefährdung der Anschlußanlagen durch Spannungserhöhungen bei Unterbrechung einer Phase (Erdschluß oder Leitungsbruch).

Der Konstrukteur andererseits ist nach Höhe von Spannung und Stromstärke, Wicklungsanzapfungen u. dgl. an die Forderung geringsten Preises bei bester Baustoffausnutzung gebunden.

Für die **Haupttransformatoren** werden! als innere Schaltung gewählt die:

Dreieck-Dreieckschaltung . . .	Schaltgruppe A_1
Stern-Sternschaltung	„ A_2
Dreieck-Sternschaltung	„ C_1
Stern-Dreieckschaltung	„ C_2

Alle vier Schaltgruppen zeigen in elektrischer Beziehung bei ungleicher Phasenbelastung einschließlich der oben gekennzeichneten Grenzfälle — gleichbleibende Primärspannung vorausgesetzt — keine wesentlichen Unterschiede, so daß sie nach dieser Richtung als gleichwertig bezeichnet werden können. Die theoretische Untersuchung im einzelnen ergibt, daß bei ungleicher Phasenbelastung die Spannungsabfälle in den Transformatorwicklungen kleiner sind als bei gleichbelasteten Phasen, wenn die Belastungen an sich für beide Fälle die gleiche Höhe haben. Es können zwar größere Spannungsunterschiede zwischen den Phasen auftreten, weil die Spannung der einen Phase sinken, die der anderen steigen kann, doch bewegen sich diese Unterschiede nicht in Grenzen, die für den Betrieb und die angeschlossenen Verbraucher, insbesondere die Lampen und Kleingeräte, unzulässig sein können, sofern

der dann an sich unzulässige Betriebszustand schnellstens beseitigt wird. Bei längerer Dauer der Grenzfälle allerdings können die Spannungserhöhungen zur Zerstörung der angeschlossenen Lampen und Kleingeräte führen. Diese Spannungsunterschiede hängen im wesentlichen von der Höhe der Impedanz der Transformatorwicklungen ab, also von der dem Transformator gegebenen Kurzschlußspannung. Sie können sich im ungünstigsten Falle etwa um den prozentualen Wert dieser Kurzschlußspannung zur Klemmenspannung bewegen.

Als sonstige Unterschiede der vier Schaltgruppen sind besonders folgende zu nennen:

Bei der Dreieck-Dreieckschaltung (Schaltgruppe A_1 , Abb. 216) müssen die Primär- und Sekundärwicklungen für die volle Phasenspannung isoliert werden. Das hat gegenüber der Sternschaltung einen größeren Aufwand an Isoliermaterial zur Folge, wodurch der Preis des Transformators erhöht wird. Infolgedessen wird diese Schaltung vom Konstrukteur nur selten angewendet. Andererseits hat die Schaltgruppe A_1 den betrieblichen Vorzug, daß bei Unterbrechung einer Phase alle drei Leitungen sekundär unter Spannung bleiben. Bei Störungen in einer Transformatorphase können daher Umschaltungen auf andere Transformatoren vorgenommen werden, ohne den Betrieb zwischenzeitlich ganz zu unterbrechen. Der Transformator arbeitet dann in der sog. V- oder offenen Dreieckschaltung. Weiter hat die Dreieckschaltung betrieblich den Vorteil, daß höhere Harmonische der Spannungs-kennlinie, die sich besonders auf Einankerumformer sehr störend bemerkbar machen (S. 200), keine Wirkung nach außen haben; der Ausgleichsstrom verläuft innerhalb der geschlossenen Dreieckwicklung.

Bei der Stern-Sternschaltung (Schaltgruppe A_2 , Abb. 217) ist die Isolation der Wicklungen bei gegebener

Klemmenspannung nur für den $\frac{1}{\sqrt{3}}$ kleineren Betrag zu bemessen. Daher wird diese Schaltgruppe besonders bei Hochspan-

nungstransformatoren vom Konstrukteur bevorzugt. Der Nullpunkt der Wicklungen kann für Erdungszwecke, zum Anschluß von Überspannungsschutzapparaten für die Ableitung statischer Ladungen auf den Freileitungen und für Petersenspulen benutzt werden, ein Vorteil, der ganz besonders zu beachten ist. Diese Nullpunktserdung gewinnt weiter an hervorragender Bedeutung für die Höchstspannungsanlagen, worüber der II. Band alles Nähere enthält. Tritt eine Störung in einer Primär- oder Sekundärwicklung ein, so muß der Trans-

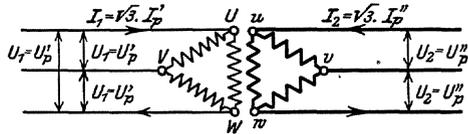


Abb. 216. Drehstromtransformator mit Dreieck-Dreieckschaltung.

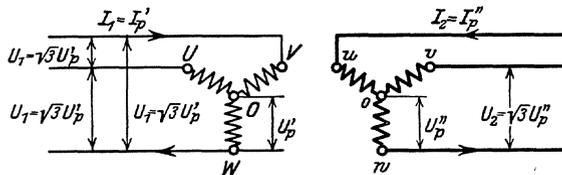


Abb. 217. Drehstromtransformator mit Stern-Sternschaltung.

formator sofort abgeschaltet werden, weil er dann als Einphasentransformator mit den beiden gesunden Phasen in Hintereinanderschaltung arbeiten würde und infolge der Überlastung der gesunden Wicklungen weiter gefährdet werden könnte.

Bei hohen Spannungen, bei denen Induktivität und Kapazität der Zuführungsleitungen bereits besonders stark in die Erscheinung treten, hat die Stern-Sternschaltung den weiteren Nachteil, daß bei nicht reinem Sinusverlauf der Maschinenspannung die höheren Harmonischen stärker in die Erscheinung treten und den guten Lauf von Einanker- und Kaskadenumformern stören können bzw. zusätzliche Verluste in Umformern, Transformatoren und Motoren zur Folge haben, die betriebstechnisch und betriebswirtschaftlich gegebenenfalls nicht ohne Beachtung bleiben dürfen. Bei sehr hohen Spannungen ist daher diese Schaltung nicht immer die technisch beste. Die besonders auf die dritte Harmonische zurückzuführenden unangenehmen elektrischen und betrieblichen Nebenerscheinungen können durch eine dritte, in Dreieck geschaltete Wicklung (Tertiärwicklung) wesentlich gemildert werden. Ein solcher Dreiwicklungstransformator wird auf S. 304 besprochen.

Die Dreieck-Sternschaltung (Schaltgruppe C_1) kommt für die Kraftwerkstransformatoren häufiger zur Anwendung. Für die Haupt-Netztransformatoren ist sie dann empfehlenswert, wenn es sich um Anschlüsse handelt, die hinsichtlich der Beleuchtung und Kleingeräte ganz besonders stark überwiegen und durch die Art und Zeit der Benutzung einzelner großer Anlageteile eine starke Verschiedenheit in der Phasenbelastung herbeiführen können. Das sind alle Überland- und städtischen Werke größerer Ausdehnung. Sonst ist als Vorteil lediglich der der Dreieckwicklung hinsichtlich der höheren Harmonischen zukommende zu nennen. Der Nachteil der höheren Isolation und des dadurch bedingten höheren Preises bleibt naturgemäß ebenfalls bestehen.

Die Stern-Dreieckschaltung (Schaltgruppe C_2) schließlich wird für die Kraftwerkstransformatoren weniger, für die Haupt-Netztransformatoren vielfach benutzt. Ihre Vorteile und Nachteile sind aus dem bisher Gesagten unschwer festzustellen und bedürfen daher keiner Wiederholung.

Am vorteilhaftesten ist je nach der Benutzung im Kraftwerk oder im Netz — bei letzterer dann, wenn die Leitung als Freileitung ausgeführt ist — die Schaltung, bei welcher die Oberspannungswicklung in Stern, die Unterspannungswicklung in Dreieck geschaltet ist, weil dann der Nullpunkt auf der Oberspannungsseite zum Anschluß einer Petersenspule benutzbar ist und die Dreieckwicklung die günstige Wirkung hinsichtlich der höheren Harmonischen besitzt.

Die Netztransformatoren mit Transformierung auf Gebrauchsspannung. In ausgedehnteren Drehstromnetzen mit gemischter Stromlieferung für Beleuchtungs-, Klein- und Großkraftzwecke läßt sich nicht erreichen, daß die drei Phasen stets vollständig gleichmäßig belastet sind. In der Regel bestehen zu allen Tageszeiten recht bedeutende Unterschiede

in der Phasenbelastung. Für diese Belastungsverhältnisse als die betrieblich ungünstigeren soll nun festgestellt werden, welche innere Schaltung des Transformators am vorteilhaftesten ist. Des leichteren Verständnisses wegen wird von der reinen Sternschaltung, die für gewöhnlich benutzt wird, wenn keine besonderen Gründe vorliegen, ausgegangen. Wenn dabei von der Vierleiterschaltung erst später gesprochen wird, so bezweckt dieses, zunächst die elektrischen Verhältnisse in einfachster Form zu klären, um auf sie dann zurückgreifen zu können. Bei allen Untersuchungen wird vorausgesetzt, daß der Transformator primär an ein Netz mit gleichbleibender Spannung angeschlossen ist.

Liegt die Belastung nur zwischen den Phasen u und v (Abb. 217), so ist die Schaltung sekundär einphasig, und die Spannung U_2 entspricht etwa der doppelten Phasenspannung U_p'' abzüglich des Spannungsabfalles in den nun hintereinander geschalteten Wicklungen uo und ov . Die Wicklungen werden demnach von einem Einphasenstrome durchflossen, der bei gleichbleibender Belastung höher ist als der normale, und der einen großen Spannungsabfall in der Wicklung zur Folge hat. Die Leistungsaufnahme des Transformators primär ist naturgemäß abhängig von der sekundären Belastung und zwar bedingt durch die Rückwirkung der sekundären Amperewindungen auf den primären Stromkreis. Da nun in der Wicklung ow kein Strom fließt, also von dieser auch keine Amperewindungen erzeugt werden, muß die primäre Wicklung OW ebenfalls stromlos bleiben. Dazu kommt, 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 ungleicher 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 Ungleichheit in der Belastung recht bedeutend voneinander abweichen.

Da in der Mehrzahl der Fälle an die Transformatoren auch Beleuchtungsstromkreise angeschlossen sind, ist ohne weiteres einzusehen, daß die Stern-Sternschaltung für Anlagen mit überwiegender Beleuchtung dann nicht geeignet ist, wenn starke Ungleichheiten in der Phasenbelastung zu befürchten sind und diese nicht durch Umschaltung einzelner Stromkreise, z. B. besonderer Gebäude oder Stadtteile, oder durch andere Einrichtungen im eigenen Betriebe wenigstens zum größten Teile behoben werden können. Es muß natürlich in Beleuchtungsanlagen gleichbleibende Spannung bei allen Belastungsverschiedenheiten gewährleistet sein, da anderenfalls, wie bereits gesagt, neben der Unannehmlichkeit des flackernden oder in der Stärke wechselnden Lichtes auch die Lebensdauer der Glühlampen stark beeinflußt wird.

Bei der Vierleiterschaltung auf der Unterspannungsseite ähnlich Abb. 218 bleibt die Spannungsverteilung bei ungestörter Sekundäranlage in praktisch brauchbaren Grenzen (Abweichung etwa $\pm 1\text{vH}$

vom Nennwerte der Spannung), wenn der Strom im Nulleiter nicht mehr als 10 vH des Stromes in den Außenleitern beträgt. Ist dagegen —

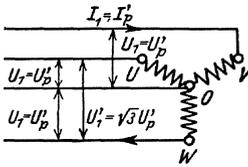


Abb. 218. Drehstromtransformator mit Stern-Sternschaltung und beiderseitigem Nulleiter.

wiederum als Grenzfall — nur eine Phase gegen Null belastet, so wirken die Ströme in der Oberspannungswicklung der beiden unbelasteten

nach Abb. 219. Für diesen Belastungsfall ist die Stern-Sternschaltung nicht mehr brauchbar.

Die reine Sternschaltung ist nur dann für Vierleiternetze zulässig, wenn entweder auch primär der Nullpunkt mit der Maschine durch eine besondere Leitung verbunden ist (Abb. 218), oder besondere

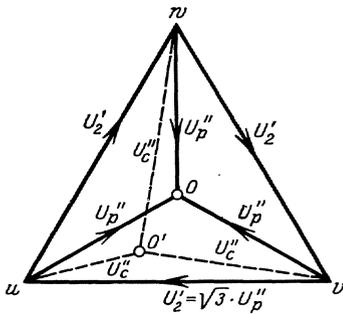


Abb. 219. Spannungsverlagerung bei Sternschaltung und ungleicher Phasenbelastung.

sog. Ausgleichstransformatoren verwendet werden (Abb. 220), oder schließlich bei Kerntransformatoren wie bereits gesagt eine Belastung des Nullpunktes mit höchstens 10 vH des

Vollaststromes nicht überschritten wird. Bei Manteltransformatoren sollte sie nicht angewendet werden. Wird der primäre Nulleiter nicht gezogen, dann treten schon bei geringen Ungleichheiten in der Belastung der einzelnen Phasen die bereits gekennzeichneten

Spannungsverschiebungen auf, so daß ein befriedigender Betrieb nicht mehr durchführbar ist. Infolge der hohen Anlagekosten für die Leitungen ist der primär verlegte vierte Leiter nicht anzutreffen.

Die Ausgleichstransformatoren (Abb. 220) dagegen ermöglichen auch bei ungleichmäßiger Verteilung der Belastung auf die drei Phasen

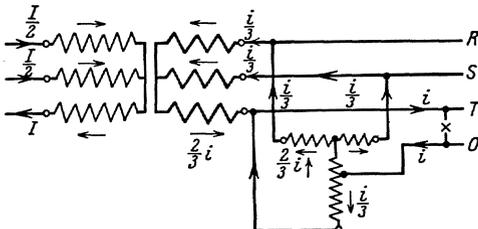


Abb. 220. Drehstromtransformator in Stern-Sternschaltung für Vierleiternetze mit Ausgleichstransformator.

Spannungsgleichheit in den Hauptleitungen gegen den Nulleiter und gestatten weiter, die reine Sternschaltung ohne primären Nulleiter, also die Transformatoren in gewöhnlicher Ausführung zu verwenden. Man kann solche

Ausgleichstransformatoren auch unmittelbar dort einbauen, wo in einem Teile der

Anlage die Vierleiterschaltung 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 Transformatorhause.

Den Nachteil der Spannungsverschiebung bei ungleicher Phasenbelastung haben auch die anderen inneren Schaltungen mit Ausnahme der Dreieck-Sternschaltung mit sekundärem Nulleiter (Abb. 221) und der Stern-Doppelsternschaltung (Abb. 222).

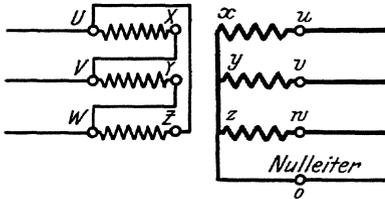


Abb. 221. Drehstromtransformator in Dreieck-Sternschaltung mit Nulleiter sekundär.

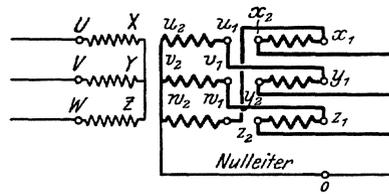


Abb. 222. Drehstromtransformator in Stern-Doppelsternschaltung mit Nulleiter sekundär.

Wird bei der Dreieck-Sternschaltung nach Abb. 221 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 für Beleuchtungsanlagen infolgedessen besonders brauchbar. 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 Nullpunktanschluß muß daher immer die Belastung des Mittelleiters möglichst genau bekannt sein, da sich hiernach die Größe des Transformators richtet.

Bei der Stern-Doppelsternschaltung (Zickzackschaltung, Abb. 222) ist die Wicklungshälfte u_1u_2 mit der Wicklungshälfte y_1y_2 hintereinander geschaltet und zwar in einer solchen Form, daß die Endspannung den Wert $\frac{U}{2} \cdot \sqrt{3}$ hat. Versieht man auch hier den Nullpunkt mit einer besonderen Leitung und belastet nur die Phase $x_1x_2w_1w_2o$, 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 Spannungsnulldpunkt der Schaltung. Es kann infolgedessen trotz ungleicher Belastung keine Spannungsverschiebung eintreten.

Wie bereits oben erwähnt, ist die Dreieck-Sternschaltung mit Rücksicht auf die Spannungsverschiebungen bei ungleicher Belastung günstig. Sie wird daher bei größeren Transformatoren zur Speisung von Vierleiternetzen gerne angewendet und ist der Stern-Doppelsternschaltung in elektrischer Hinsicht gleichwertig. Nachteilig ist, 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 Baustoffaufwande entspricht. Benutzt man an Stelle der Sternschaltung sekundär die Doppelstern- oder Zickzackschaltung, 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, weil die Spannungen, die bei gleicher Windungszahl bei einfacher Sternschaltung U_s und bei Doppelsternschaltung U_z seien, sich verhalten wie:

$$\frac{U_s}{U_z} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155.$$

Es ist also bei Zickzackschaltung die Windungszahl für die 1,155fache Spannung bei vollem Strome zu bemessen. Aus elektrischen Gründen wird zur Speisung von Verteilungsnetzen mit viertem Leiter diese Schaltung besonders bei kleineren Transformatoren jedoch trotzdem benutzt.

d) Das Parallelarbeiten. Für das Parallelarbeiten von Transformatoren untereinander sind verschiedene Betriebsformen zu unterscheiden und zwar:

Parallellauf nur primär,

Parallellauf nur sekundär,

Parallellauf primär und sekundär unmittelbar über Sammelschienen (Sammelschienenparallellauf).

Parallellauf primär und sekundär über zwischenliegende Leitungsstrecken (Netzparallellauf).

Liegen die Transformatoren nur primär parallel in Abb. 223 die Kraftwerks- und in Abb. 224 auch die Hauptumspanwerkstransforma-

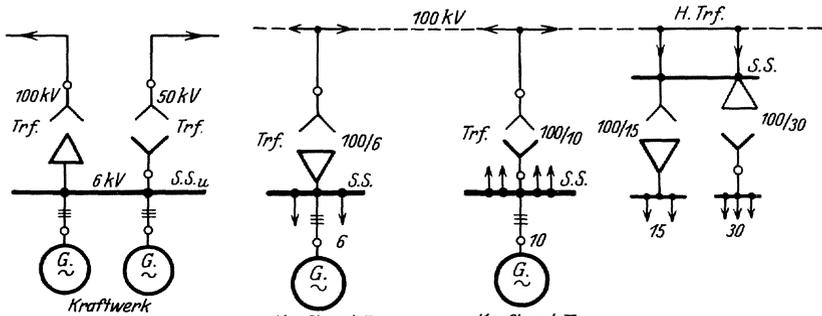


Abb. 223.

Abb. 224.

Abb. 223 und 224. Parallelarbeiten von Transformatoren.

toren, so sind besondere Bedingungen nicht zu erfüllen. Primär- und Sekundärwicklungen können in ihrer inneren Schaltung je nach den vorliegenden Verhältnissen gewählt werden. Die zukünftige Netzgestaltung darf dabei aber nicht außer acht bleiben, weil bei Schaltungsabweichungen später ein Parallelarbeiten unter Umständen nicht möglich ist und dann Zusatztransformatoren erfordert.

Bei Parallellauf nur sekundär (in Abb. 224 die Kraftwerkstransformatoren) müssen nur die sekundären Wicklungen übereinstimmende innere Schaltung erhalten, während das bei den primären Wicklungen nicht notwendig ist.

Wird der Sammelschienenparallellauf gefordert, so müssen alle Transformatoren folgenden Bedingungen entsprechen, um ein einwandfreies Parallelarbeiten zu erreichen:

- gleiches Übersetzungsverhältnis bei Leerlauf,
- gleiche Kurzschlußspannung,
- Phasenübereinstimmung,
- gleiche Schaltgruppe.

Ist das Übersetzungsverhältnis ungleich, so fließen Ausgleichströme, die einen der Transformatoren mehr belasten, und die ihrer Größe nach abhängig sind von der Höhe des Spannungsunterschiedes und der Abweichung der Kurzschlußspannungen.

Der Unterschied in den Kurzschlußspannungen soll höchstens 5 vH um einen bestimmten Mittelwert betragen¹. Anderenfalls ist die volle Ausnutzung der Transformatorleistungen nicht möglich, und es müssen Drosselspulen zum Transformator mit geringerer Kurzschlußspannung zugeschaltet werden (Abb. 225).

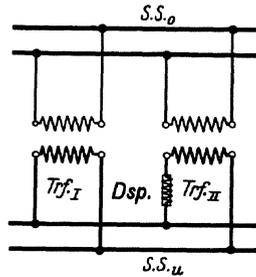


Abb. 225. Schaltung mit Drosselspule zur Erhöhung der Kurzschlußspannung.

Stimmen die Phasen nicht überein, d. h. ist der Stromlauf in den Wicklungen der parallelgeschalteten Transformatoren falsch, so entspricht das einem unmittellbaren Kurzschluß der betreffenden Transformatoren, der unter Umständen zur vollständigen Zerstörung derselben führen kann. In Abb. 226 bis 228 ist der gleichsinnige und ungleichsinnige ober- und unterspannungsseitige Wicklungsanschluß für zwei Einphasentransformatoren im Sammelschienenparallellauf gezeichnet. In Abb. 226 ist der Anschluß richtig, die Wicklungen sind in der Ober- und Unterspannung gleichsinnig. Der Anschluß nach Abb. 227 ist falsch. Die Wicklungen der Oberspannungen (UV) sind gleichsinnig, die der Unterspannung (uv) ungleichsinnig. Diese Schaltung ergibt Kurzschluß. In Abb. 228 ist durch Vertauschen des Unterspannungsanschlusses bei einem Transformator die Phasengleichheit wiederhergestellt und daher Parallellauf möglich. Es könnte auch ein Oberspannungsanschluß vertauscht werden. Obgleich die Unterspannungswicklungen in Abb. 228 ungleichsinnig sind, ist der Anschluß doch richtig, weil auch die Oberspannungswicklungen ungleichsinnig sind.

Bei den Drehstromtransformatoren ist eine große Zahl von Wicklungsarten möglich, daher sind die einzelnen Gruppen in Abb. 215 unterschieden.

¹ Jellewski, v.: Beitrag zur Frage des einwandfreien Parallellaufes von Transformatoren. ETZ 1928, H. 12, S. 485 mit Aussprache.

Transformatoren mit reiner Schaltung, also solche, die der gleichen Gruppe in Abb. 215 angehören, können einwandfrei parallel arbeiten, gegebenenfalls unter Vertauschung der Leistungsanschlüsse, solche mit gemischter aber nicht, weil die Klemmenspannungen der verschieden gewickelten Transformatoren nicht in Phase gebracht werden können. Der Parallelbetrieb zwischen Δ/λ und λ/λ geschalteten Transformatoren ist hingegen möglich, da bei beiden die Phase der Sekundärspannung um $180 \pm 30^\circ$ gegen die primäre verschoben ist.

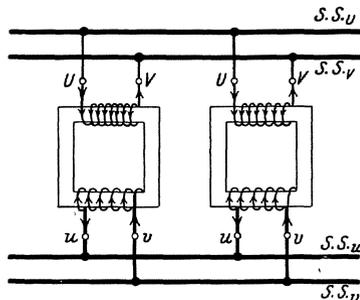


Abb. 226. Ober- und Unterspannungswicklung gleichsinnig (richtig).

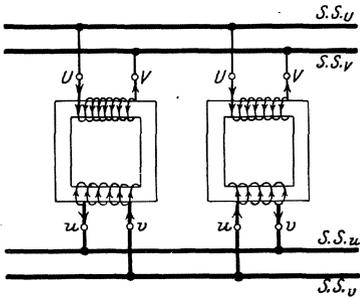


Abb. 227. Ober- und Unterspannungswicklung ungleichsinnig (falsch).

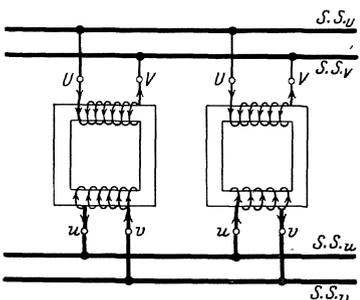


Abb. 228. Ober- und Unterspannungswicklung ungleichsinnig (richtig).

Abb. 226 bis 228. Wicklungsschaltung für Sammelschienenparallellauf bei Einphasentransformatoren.

Transformatoren mit Wicklungsarten nach verschiedenen Gruppen lassen Parallellauf nur zwischen den Gruppen C und D zu, wenn die Klemmen nach Zahlentafel 18 verbunden sind. Es ist also bei dem Entwurf von Erweiterungen bestehender Transformatoranlagen auf diese Verhältnisse genauestens zu achten.

Ein guter Sammelschienenparallellauf ist ferner gewährleistet, wenn bei verschiedenen Leistungen $N_{TrI}, N_{TrII}, N_{TrIII} \dots$ die Belastung sich jeweils auf die einzelnen Transformatoren so verteilt, daß das Verhältnis der Ströme zu den Leistungen für alle Transformatoren gleich ist, also wenn:

$$\frac{I_I}{N_{TrI}} = \frac{I_{II}}{N_{TrII}} = \frac{I_{III}}{N_{TrIII}} \text{ usw. (137)}$$

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 im allgemeinen in Sparschaltung gewickelt (S. 373), wenn die Primär- und Sekundärspannung nur wenig voneinander verschieden ist. Stimmen die Kurzschlußspannungen nicht

überein, 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 sich die Belastungsverhältnisse einstellen werden.

Zahlentafel 18.

Sammelschienen	<i>R</i> <i>S</i> <i>T</i>	<i>r</i> <i>s</i> <i>t</i>
Anschluß der	Oberspannung	Unterspannung
Schaltgruppe $C_1 C_2 C_3 \dots$	<i>U</i> <i>V</i> <i>W</i>	<i>u</i> <i>v</i> <i>w</i>
$D_1 D_2 D_3 \left\{ \begin{array}{l} \dots \\ \text{oder} \dots \\ \text{oder} \dots \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} U \ W \ V \\ W \ V \ U \\ V \ U \ W \end{array}$	$\begin{array}{l} w \ v \ u \\ v \ u \ w \\ u \ w \ v \end{array}$

Sind z. B. zwei Transformatoren von 50 und 100 kVA mit den Kurzschlußspannungen (e_k) von 3 und 2,5 vH bei Vollbelastung zu einem vorhandenen aufzustellen, der ebenfalls 100 kVA Leistung, aber nur 2 vH Kurzschlußspannung bei Vollbelastung besitzt, so darf e_k für die neuen Transformatoren nicht größer sein als 2 vH, da sich die Belastungen der parallelgeschalteten Transformatoren auf gleiches e_k einstellen, und sonst einer der Transformatoren überlastet werden würde. Werden 2,5 vH zugrunde gelegt, so würde der neue 100-kVA-Transformator vollbelastet werden können, während der vorhandene im Verhältnis 2,5:2, also um 25 vH überanstrengt werden würde.

Es ergibt sich demnach die folgende Belastungsverteilung:

100 kVA	vorhand. Transformator bei 2 vH e_k ; Leistung	100 kVA
100 „	neuer Transformator für 2 vH e_k ; Leistung . . $\frac{2}{2,5} \cdot 100 = 80$ „	
50 „	neuer Transformator für 2 vH e_k ; Leistung . . $\frac{2}{3} \cdot 50 = 33,3$ „	
		also zulässige Gesamtbelastung 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 vH überlastet werden. Dann ergibt sich:

100 kVA	vorhandener Transformator; neue Leistung . 100 $\cdot \frac{250}{213,3} = 117$ kVA
100 „	neuer Transformator; neue Leistung 80 $\cdot \frac{250}{213,3} = 94$ „
50 „	neuer Transformator; neue Leistung 33,3 $\cdot \frac{250}{213,3} = 39$ „
	abzugebende Gesamtleistung 250 kVA

Für den Netzparallellauf gelten die gleichen Bedingungen wie für den Sammelschienenparallellauf nur mit dem Unterschiede, daß die Kurzschlußspannungen um den Betrag der Reaktanz der zwischenliegenden Leitungsstrecken voneinander abweichen dürfen, der sich aus den Leitungslängen bis zur Abnahmestelle ergibt. Der einfachste Fall ist in Abb. 229 gezeichnet, für den $I_1 \cdot z_1 = I_2 \cdot z_2$ vorausgesetzt ist, worin z_1 und z_2 die Impedanzen insgesamt der Transformatoren bezogen

auf die Sekundärseite zuzüglich der Leitungsimpedanzen bezeichnen. Für die Berechnung der Stromverteilung und daraus der Impedanzen (der Ohmsche Verlust kann zumeist vernachlässigt werden) ist im II. Bande der Rechnungsgang bei zweiseitiger Speisung angegeben. Die Ströme verteilen sich derart bis zur Abnahmestelle, daß gleiche Spannungsabfälle auf beiden Leitungsstücken vorhanden sind, also:

$$I_1 \cdot z_1 = I_2 \cdot z_2, \quad I_1 + I_2 = I$$

oder:
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{z_2}{z_1}.$$

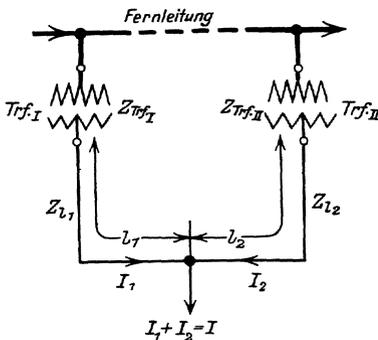


Abb. 229. Netzparallellauf von Transformatoren.

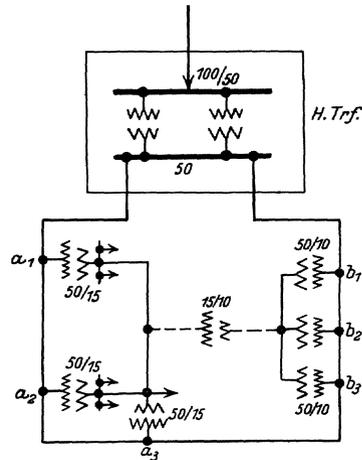


Abb. 230. Parallelbetrieb von Netzen.

In Abb. 230 ist ein größeres Verteilungsnetz gezeichnet, das von dem Haupttransformatorenwerke *H. Trf.* mit einer Ringleitung durchzogen wird. Zwei Netze mit 15 und 10 kV stellen unterspannungsseitig getrennte Belieferungsgebiete dar. Diese Transformatoren könnten also ganz nach den jeweils vorliegenden Verhältnissen gewählt werden. Soll aber im weiteren Verlaufe des Ausbaues eine Netzkupplung durch den 15/10-kV-Transformator vorgenommen werden, so werden damit alle Transformatoren primär und sekundär parallelgeschaltet. Hier zeigt sich deutlich, daß man besonders vorsichtig bei der Wahl der inneren Schaltungen vorgehen und möglichst Einheitlichkeit anstreben sollte. Andernfalls ist, wie bereits gesagt, eine solche oder ähnliche spätere Netzverbindung unter Umständen nur mit besonderen Hilfsmitteln möglich.

e) **Dreiwicklungstransformatoren.** Für einzelne Sonderfälle sind bereits mit guten Ergebnissen Transformatoren mit drei Wicklungen gebaut worden und zwar für die Primärseite eine und für die Sekundärseite zwei getrennte Wicklungen. Ein wesentlicher Grund für die Wahl dieser Bauform liegt zumeist in wirtschaftlicher Hinsicht darin, daß für zwei Leistung abgebende Spannungen nur ein Transformator aufgestellt werden soll. Die Beschaffungskosten sind naturgemäß nicht unbedeutend geringer als für zwei Transformatoren. Im 63. Kap. sind derartige Dreiwicklungstransformatoren näher beschrieben.

Die dem Transformator primär zuzuführende Leistung ist gleich der Summe der aus den beiden Sekundärwicklungen im Höchstfalle abzugebenden Leistungen. Die konstruktive Auslegung kann aber auch nach anderer Leistungsaufteilung erfolgen. Bezeichnet N_p die primäre und N_{s_1} bzw. N_{s_2} die sekundären Leistungen der Wicklungen 1 und 2, so muß sein:

$$N_p = N_{s_1} + N_{s_2},$$

oder: $N_p = N_{s_1}$, wenn $N_{s_2} = 0$,

bzw.: $N_p = N_{s_2}$, „ $N_{s_1} = 0$.

Ist z. B.: $N_{s_1} = N_{s_2} = 5000$ kVA,

so ist: $N_p = N_{s_1} = 5000$ kVA, wenn $N_{s_2} = 0$,

oder: $N_p = 5000 + 5000 = 10000$ kVA,

wenn beide Sekundärleistungen gleichzeitig voll abgegeben werden sollen. Eine andere Forderung könnte etwa derart gestellt werden, daß:

$$N_p = 10000 \text{ kVA.}$$

$$N_{s_1} = 10000 \text{ kVA,} \quad N_{s_2} = 3000 \text{ kVA.}$$

Dann würde das bedeuten, daß die Gesamtleistung N_p 10000 kVA nicht übersteigen dürfte und innerhalb dieser Leistung sekundär die Wicklung 1 mit 10000 kVA belastet werden könnte, wenn aus der Wicklung 2 keine Leistung abgegeben würde, oder nur mit 7000 kVA, wenn aus der Wicklung 2 $N_{s_2} = 3000$ kVA zu liefern wären.

Dem Konstrukteur muß daher genau bekannt sein, welche Sekundärleistungen gleichzeitig verlangt werden.

Auch für einen Dreiwicklungstransformator können verschiedene innere Schaltungen vorgenommen werden. Es ist dabei ganz besonders darauf zu achten, ob Parallelbetrieb für beide Sekundärwicklungen mit anderen Transformatoren auf Sammelschienen oder im Netz zu fordern ist. Eine häufiger angewendete Schaltung ist primär Stern, sekundär für die Hauptwicklung Stern, für die dritte Wicklung Dreieck. Diese Schaltung ist aber mit Vorsicht anzuwenden, wenn nicht die dritte, im Dreieck geschaltete Wicklung lediglich für eigene Zwecke und für die elektrische Verbesserung des Transformators (Unterdrückung der dritten Harmonischen dienen soll. Als solche eigene Zwecke sind zu nennen: Anschluß für Regelumspanner, Lieferung des Eigenbedarfes mit oder ohne Zwischenschaltung eines für Gebrauchsspannung gewickelten Transformators für Beleuchtung, Heizung, Antrieb der Kühlvorrichtungen, Anschluß einer Blindleistungsmaschine u. dgl. Dann wird die dritte Wicklung für geringe Leistung und mäßige Spannung zu bemessen sein und wird im Wicklungsaufbau unmittelbar am Kern liegen.

Ist Parallelbetrieb für Stromabgabezwecke erforderlich, so wird, wie bereits angedeutet, die Stern-Stern-Dreieckschaltung erst nach Prüfung aller Verhältnisse gewählt werden dürfen, sonst ist auf der

Dreieckseite ein Parallelarbeiten mit bereits vorhandenen, in Stern geschalteten Transformatoren nicht möglich und es muß noch ein zweiter Transformator mit der Übersetzung 1:1 und entsprechender inneren Schaltung zwischengelegt werden, um die Phasenlage richtig zu drehen. Besser ist in diesem Falle die Schaltung Dreieck-Stern-Stern gegebenenfalls mit Herausführung beider Nullpunkte. Nachteilig bei dieser Schal-

tung ist für die Dreieckswicklung auf der Primärseite neben den bereits angegebenen Verhältnissen die Unmöglichkeit, z. B. eine Petersenspule oder andere Erdschlußunterdrückungsgeräte, die am Nullpunkte liegen, anwenden zu können, was für Transformatoren in Hauptwerken nicht unbeachtet bleiben darf.

Der preisliche Vorteil des Dreiwicklungstransformators ist nicht zu verkennen. Betrieblich ist ein Hauptnachteil der, daß die beiden Unterspannungen unter der Voraussetzung gleichbleibender Oberspannung in einer durch die elektrischen Verhältnisse bedingten Abhängigkeit stehen durch die Spannungsabfälle zwischen Primär- und Sekundärwicklung, die sich nach Belastung und Leistungsfaktor richten. Das Spannungsdiagramm eines Dreiwicklungstransformators in einfacher Darstellung und in Anlehnung an Abb. 204 ist in Abb. 231 ge-

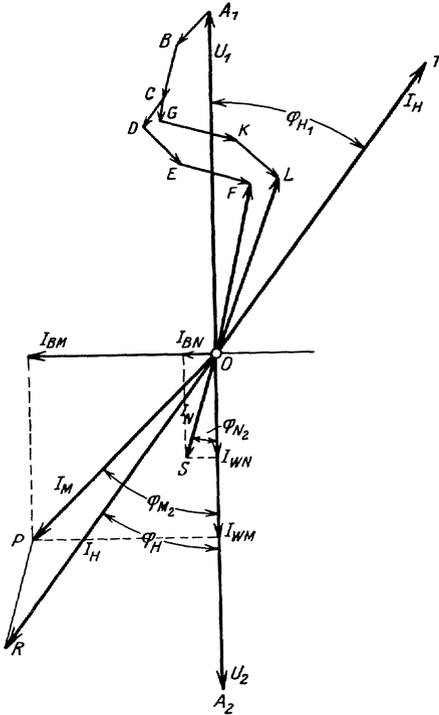


Abb. 231. Spannungsdiagramm für den Dreiwicklungstransformator.

zeichnet unter der Voraussetzung der Übersetzung 1:1:1 bei Leerlauf zwischen allen Wicklungen. Zur Unterscheidung werden die Ströme, Spannungen und Widerstände mit den Fußbuchstaben H für die Oberspannungsseite, M für die Mittelspannungsseite und N für die Unterspannungsseite bezeichnet. Die Belastungsströme I_M und I_N sollen der induzierten EMK E_2 um die Winkel φ_M bzw. φ_N nacheilen. Die induktiven Widerstände sollen in der Form der ihnen beikommenden Streuspannungen bei den betreffenden Strömen zeichnerisch behandelt werden also z. B. $I_H \cdot x_{HN}$ die Streuspannung zwischen H und N bei offener Wicklung M und dem Strome I_H ($x_{HN} = x_H + x_N$). Die Lage der Wicklungen sei vom Schenkel gerechnet N innen, M Mitte, H außen (Abb. 232). Gegeben ist ferner die primäre induzierte EMK $E_H = \overline{OA_1} = U_1$, die der klareren Darstellung wegen gleich der Primärspannung nach

Größe und Richtung gesetzt werden soll. Dann werden die Belastungsströme dargestellt durch die Vektoren $I_M = \overline{OP}$ und $I_N = \overline{OS}$. Der resultierende Strom ergibt sich zu $I_H = \overline{OR}$ und primär um 180° verschoben zu $I_H = \overline{OT}$. Von der Primärspannung $\overline{OA_1}$ werden nun der Reihe nach folgende Spannungsabfälle abgetragen, wobei auf den Sinn der Ströme zu achten ist (z. B. voreilender Belastungsstrom). Diese Spannungsabfälle sind:

für den Strom I_M : $I_M \cdot r_H \parallel I_M = \overline{A_1B},$ $I_N \cdot r_H \parallel I_N = \overline{BC},$ $I_M \cdot r_M \parallel I_M = \overline{CD},$ $I_M \cdot x_{N(HM)} \perp I_M = \overline{DE},$ $I_N \cdot x_{N(HM)} \perp I_N = \overline{EF},$	für den Strom I_N : $I_M \cdot r_H \parallel I_M = \overline{A_1B},$ $I_N \cdot r_H \parallel I_N = \overline{BC},$ $I_N \cdot r_N \parallel I_N = \overline{CG},$ $I_N \cdot x_{M(HN)} \perp I_N = \overline{GK},$ $I_M \cdot x_{N(HM)} \perp I_M = \overline{KL}.$
---	---

Die Endspannung E_M der Wicklung M ist gegeben durch die Strecke $\overline{OF} = E_M$ und die Endspannung E_N der Wicklung N durch $\overline{OL} = E_N$ bei der vorausgesetzten Belastung beider Wicklungen durch die Ströme I_M und I_N .

In Abb. 433 sind die Spannungsabfälle für einen Dreiwicklungs- transformator bei verschiedenen Belastungen und Leistungsfaktoren $\cos \varphi_2$ dargestellt, der das Übersetzungsverhältnis 100/50/10,4 kV hat, wobei die 10,4-kV-Wicklung in Dreieck geschaltet unmittelbar am Kern liegt. Die Leistungen betragen $N_p = 10000$ kVA, $N_{S1} = 10000$ kVA, $N_{S2} = 3000$ kVA.

Falk¹ hat rechnerisch festgestellt, daß hinsichtlich der Lage der drei Wicklungen zueinander mit Rücksicht auf die Beeinflussung des Spannungsabfalles der einen Wicklung durch Belastung der zweiten die Anordnung die günstigste ist, bei der die leistungsaufnehmende (primäre) Wicklung in der Mitte zwischen den beiden leistungsendgebenden

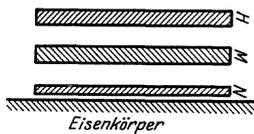


Abb. 232.

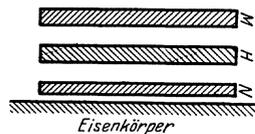


Abb. 233.

Abb. 232 und 233. Gegenseitige Wicklungslage beim Dreiwicklungs- transformator.

den Wicklungen liegt (Abb. 233). Die gegenseitigen Beeinflussungen werden bei diesem Aufbau am kleinsten. Liegt die leistungsaufnehmende Wicklung als Hochspannungswicklung z. B. außen (Abb. 232), so können sich auch Schwierigkeiten beim Parallelarbeiten zweier Dreiwicklungs-

¹ Falk, L.: Kurzschlußspannung und Spannungsabfälle in Dreiwicklungs- transformatoren, Stromverteilung in parallelgeschalteten Wicklungszweigen. ETZ 1928, H. 33, S. 1209.

transformatoren auf Sammelschienen ergeben. Das ist nicht der Fall, wenn die leistungsaufnehmende Wicklung in der Mitte angeordnet ist. Es ist daher erforderlich, daß der Konstrukteur genau über die einzelnen Betriebswünsche unterrichtet wird, damit sich später im praktischen Betriebe keine Schwierigkeiten ergeben.

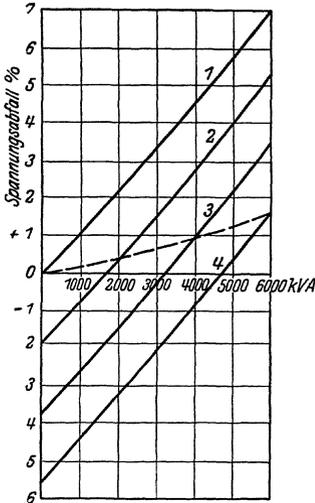


Abb. 234 a.

Lage der Wicklungen: *H—M—N*.

I_M nacheilend $\cos \varphi = 0,85$,
 I_N voreilend $\cos \varphi = 0,10$,

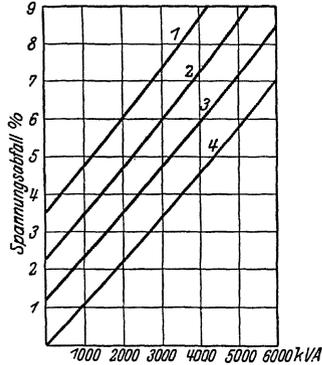


Abb. 234 b.

I_M nacheilend $\cos \varphi = 0,85$,
 I_N nacheilend $\cos \varphi = 0,85$.

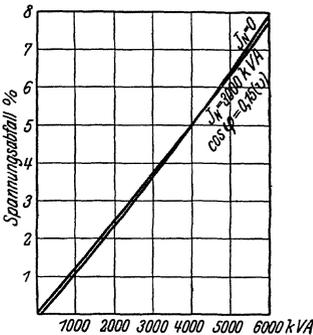


Abb. 235 a.

Lage der Wicklungen: *M—H—N*.

I_M nacheilend $\cos \varphi = 0,85$,
 I_N voreilend $\cos \varphi = 0,10$,

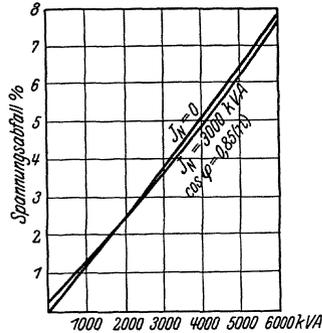


Abb. 235 b.

I_M nacheilend $\cos \varphi = 0,85$,
 I_N nacheilend $\cos \varphi = 0,85$.

1. bei unbelasteter Wicklung *N*,
2. bei 1000 kVA in Wicklung *N*,

3. bei 2000 kVA in Wicklung *N*,
4. bei 3000 kVA in Wicklung *N*.

Abb. 234 und 235. Prozentualer Spannungsabfall in der Wicklung *M* in Abhängigkeit von der Belastung in Wicklung *M* und Wicklung *N*.

Für einen Dreiwicklungstransformator, ausgelegt für folgende Verhältnisse:

- H* = 100 kV, 9000 kVA, Sternschaltung,
- M* = 50 kV, 6000 kVA, Dreieckschaltung,
- N* = 6 kV, 3000 kVA, Sternschaltung,

sind in Abb. 234 und 235 die Spannungsabfälle in vH in der Sekundärwicklung M dargestellt, wenn diese die in Abb. 232 und 233 angegebenen Lagen zur Wicklung H hat unter der Annahme verschiedener Leistungsfaktoren für die Belastung der Wicklungen M und N und verschiedener Belastungen der Wicklung N . Diese Kennlinien lassen deutlich erkennen, wie außerordentlich stark die Spannungsabfälle bei den beiden Wicklungslagen voneinander abweichen. Das ist auch zu beachten für den Parallellauf des Dreiwicklungs-Transformators sekundär mit Zweiwicklungs-Transformatoren und für die Spannungsregelung der an die Sekundärwicklungen angeschlossenen Netze.

50. Die Bauart der Transformatoren im allgemeinen.

a) Mantel- und Kerntransformatoren. Wie aus Abb. 202 und dem bisher Gesagten hervorgeht, besteht ein Transformator in der Hauptsache aus zwei getrennten Wicklungen — Ober- und Unterspannungswicklung — und einem geschlossenen, gemeinsamen Eisenkörper. Man unterscheidet hinsichtlich des konstruktiven Zusammenbaues von Wicklungen und Eisenkörper zwei besondere Formen:

den Manteltransformator
und den Kerntransformator.

Beim Manteltransformator (Abb. 236) werden die Wicklungen vom Eisenkörper umschlossen, beim Kerntransformator (Abb. 237) ist der

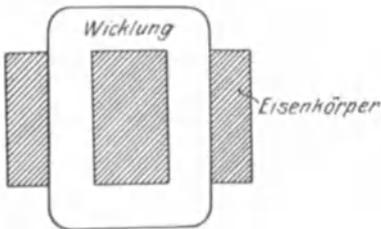
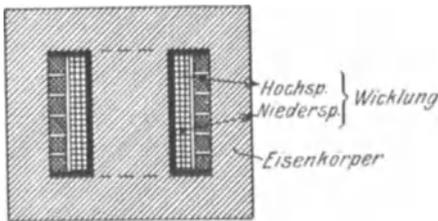


Abb. 236. Manteltransformator.

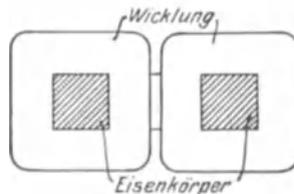
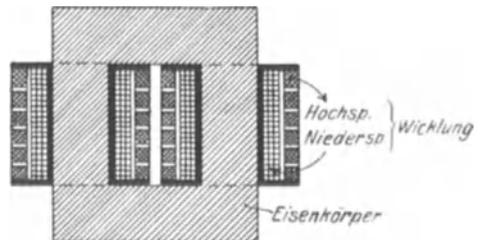


Abb. 237. Kerntransformator.

Eisenkörper von den Wicklungen umgeben, bildet also einen richtigen Kern.

Wann die eine oder andere Bauform anzuwenden ist, muß der Konstrukteur entscheiden. Im folgenden soll nur kurz angegeben werden,

welche grundsätzlichen baulichen Unterschiede bestehen. Im allgemeinen wird heute der Kerntransformator bevorzugt. Es kann indessen der Betrieb Bedingungen an die Bauform stellen, die besser vom Manteltransformator erfüllt werden.

Der Manteltransformator besitzt gegenüber dem Kerntransformator bei gleicher Leistung mehr Eisen und weniger Kupfer, könnte daher im Preise billiger sein als der Kerntransformator. Demgegenüber ist aber die wirksame Abkühlungsoberfläche des Kupfers naturgemäß geringer als beim Kerntransformator und infolgedessen muß das Kupfergewicht erhöht werden. Aus diesem Grunde ist auch das Kühlmittel (z. B. Öl) reichlicher zu bemessen. Bei großer Leistung ist ferner die Anwendung besonderer Kühlvorrichtungen früher erforderlich als beim Kerntransformator. Wicklungsanzapfungen lassen sich beim Manteltransformator konstruktiv schwieriger vornehmen als beim Kerntransformator. Der Hauptvorteil vom betrieblichen Standpunkte aus liegt darin, daß die Befestigung der Spulen gegen Lagenveränderung durch die bei Kurzschlüssen auftretenden magnetischen Kräfte beim Manteltransformator wesentlich sicherer ausgeführt werden kann als beim Kerntransformator. Das ist besonders dann beachtlich, wenn der Transformator für eine niedrige Kurzschlußspannung zu bauen ist. Daher eignet sich ersterer besser für solche Kraftbetriebe, in denen mit plötzlichen starken, stoßweisen Überlastungen und häufigen Kurzschlüssen zu rechnen ist also z. B. bei großen Motoranlagen und für Bahnzwecke. Der Leerlaufverlust ist größer.

Die Konstruktion des Kerntransformators kann allen betrieblichen Anforderungen der Fernkraftübertragung vollauf entsprechen. Sie wird daher, wie bereits gesagt, heute bevorzugt.

Die Kernform hat weiter den Vorteil einfacherer fabrikmäßiger

Zahlentafel 19¹.
Vergleich zwischen Mantel- und Kerntransformator.

Bezeichnung	Wert	Manteltransformator	Kerntransformator
Leistung	kVA	1600	1600
Übersetzung bei Leerlauf	kV	6,3/30	6,3/30
Schaltung	—	*/\	*/\
Leerlaufverlust	kW	6,85	6,70
Wicklungsverlust } bei $\frac{1}{2}$ Last $\cos \varphi = 1$	kW	20,70	18,40
Spannungsänderung } e_{φ} vH		1,29	1,15
Kurzschlußspannung } e_k vH		3,20	3,70
Wirkungsgrad bei $\frac{1}{2}$ Last und $\cos \varphi = 1$	vH	98,30	98,40
Preis	RM	24000	22000
Gewicht: Transformator	kg	4700	4530
Kessel	kg	2315	2000
Öl	kg	3080	2800
vollständig	kg	10095	9330
Abm. Höhe	mm	2880	2880
Breite	mm	1730	1470
Länge	mm	2025	2270

¹ Siehe auch Zahlentafel 22.

Herstellung und Werkstattmontage; ferner ist die Instandsetzung beim Auswechseln von Wicklungsspulen am Orte der Aufstellung des Transformators leichter möglich; die Raumbeanspruchung ist geringer. In Zahlentafel 19 sind die Daten für einen Mantel- und einen Kerntransformator für gleiche Verhältnisse zusammengestellt. Der Vergleich läßt das Gesagte deutlich erkennen.

Auch hier gilt wieder, daß bei Anfragen auf Transformatoren ein Hinweis auf die Eigenart der Anlage, für die der Transformator Verwendung finden soll, stets notwendig ist.

Hinsichtlich der wirtschaftlichen Beurteilung ist auf das S. 284 Gesagte zu verweisen.

b) Der konstruktive Aufbau. Dieser richtet sich für beide Bauformen in erster Linie nach der Größe der Leistung und der Höhe der Spannungen, insbesondere nach der Höhe der Oberspannung bei hohen Spannungen bzw. der Größe der Stromstärke bei besonders niedrigen Spannungen. Da in den Transformatorwicklungen bei Belastung Verlustwärme entsteht, erstreckt sich die konstruktive Durchbildung des gesamten Aufbaues des aktiven Transformators auf die beste Abführung dieser Verlustwärme. Je wirksamer sie gestaltet werden kann, um so besser lassen sich die Baustoffe wie Kupfer und Eisen elektrisch ausnutzen, um so geringer werden dadurch Abmessungen, Gewicht und Preis. Die für die Wicklungen benutzten Isolierstoffe dürfen auf die Dauer nur mit einer bestimmten höchsten Temperatur beansprucht werden, andernfalls sie an Sicherheit schnell verlieren. Da weiter die Ober- und Unterspannungswicklungen nicht aus je einer, sondern entsprechend der Höhe der Spannungen aus einer großen Zahl von Einzelspulen hergestellt werden müssen, die entweder neben- oder übereinander auf den einzelnen Schenkeln des Transformators aufzubringen sind, müssen zwischen den einzelnen Spulen Kanäle vorhanden sein, durch die die abzuführende Wärme abströmen kann, die also den Zutritt eines Kühlmittels ermöglichen. Diese Kanäle werden sowohl im Eisenkörper als auch zwischen den einzelnen Wicklungsspulen durch Zwischenlagen hergestellt, die die Führung des Kühlmittels in solche Bahnen zwingen, daß keine Stauung, kein Rücklauf, keine ungekühlten Stellen vorkommen. Weiter sind der gesamte Zusammenbau der Wicklungen mit Rücksicht auf unbedingte Festlage bei allen Temperaturänderungen und elektrischen Beanspruchungen durch Kurzschlüsse auch der heftigsten Art Einzelheiten, die den Transformatorenkonstrukteur fortgesetzt beschäftigen.

Schon aus diesen kurzen Betrachtungen geht hervor, daß die heutigen Betriebsverhältnisse nicht nur großer, sondern auch kleiner Anlagen an den Bau der Transformatoren sehr schwere Anforderungen stellen, damit die unbedingt zu fordernde Betriebssicherheit auf lange Jahre gewährleistet ist. Weiter geben die obigen Angaben aber auch dem Betriebsingenieur die Möglichkeit, sich namentlich bei großen Transformatoren aus der Bauart einzelner Firmen ein Urteil zu bilden über die Vorteile bzw. Nachteile dieser oder jener Lösung in der vorgesehenen Aufbauform. Es kann hier naturgemäß nicht Aufgabe sein, Konstruk-

tionseinzelheiten zu behandeln. Nur insoweit soll daher kurz noch auf weitere Einzelheiten des konstruktiven Aufbaues eingegangen werden, soweit sie für die Allgemeinbeurteilung verschiedener Konstruktionen notwendig und wünschenswert sind. Das gilt besonders für Transformatoren über etwa 5000 kVA und 50 kV Oberspannung, sowie für Vergleiche mit ausländischen Fabrikaten.

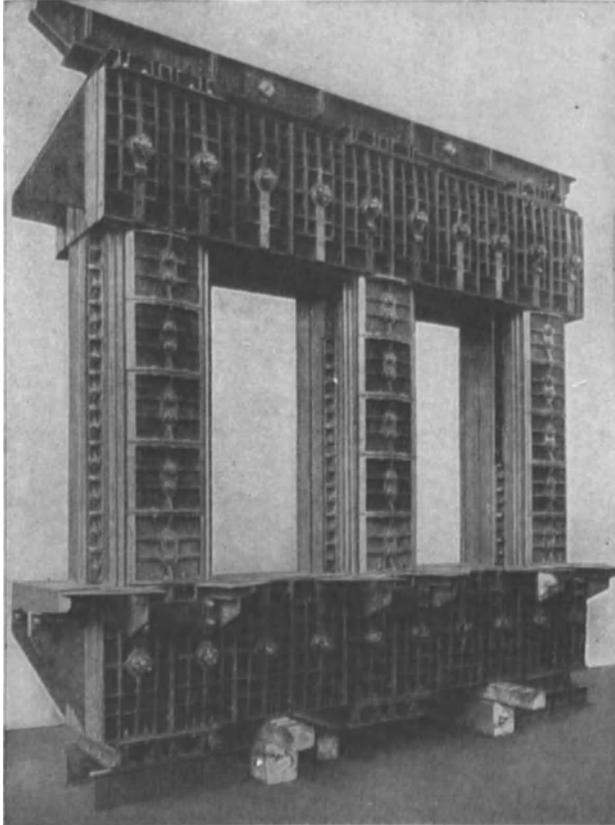


Abb. 238. Dreischenkiger Drehstromtransformator Kern für 20000 kVA, 110 kV Oberspannung.

Als Kühlmittel für den aktiven Transformator wird entweder Luft oder Öl verwendet und man unterscheidet daher zwischen:

Trockentransformator
und Öltransformator.

Der Eisenkörper. Der Eisenkörper wird geblättert, d. h. aus einzelnen Blechen zusammengesetzt; dadurch werden die Verluste durch Wirbelströme wesentlich vermindert. Als Blech wird legiertes, einseitig mit Papier beklebtes Blech mit hohem elektrischen Widerstande (Transformatorblech) benutzt, weil von der Beschaffenheit desselben sowohl

die Eisenverluste (Hysterese) als auch die Wirbelstromverluste und demnach der Wirkungsgrad, ferner auch die Lebensdauer des Transformators selbst abhängen. Das Blech darf seine besonderen guten Eigenschaften nicht mit der Zeit verlieren bzw. ändern, oder wie man sagt, es darf nicht altern¹. Diese Bedingung wird heute in Deutschland von allen guten Transformatoren erfüllt.

Der Eisenkörper besteht aus den Schenkeln, die die Wicklungen tragen, und den Jochen, die den magnetischen Schluß der Kraftlinien (Abb. 238) herbeiführen. Die Schenkel erhalten einen der Kreisform angenäherten Querschnitt. Sie werden aus einzelnen Blechpaketen, die von der Mitte nach außen in ihre Breite abnehmen, zusammengesetzt und durch starke, voneinander isolierte Preßplatten

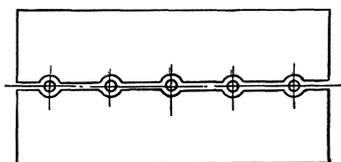


Abb. 239. Schenkelblech.

mit isolierten Bolzen zusammengepreßt.

Abb. 239 und 240 zeigen Schenkelblech und Schenkelquerschnitt eines AEG-Großtransformators².

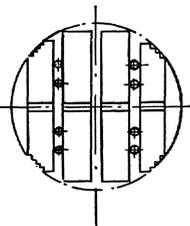


Abb. 240. Schenkelquerschnitt.

Senkrecht zur Blechebene ist in der Mitte ein Ölkanal vorgesehen, der mit parallel zur Blechebene durch Schenkel und Joche gehenden Schlitz in Verbindung steht. Der Ölumlaufl erfolgt in der Weise, daß das Öl durch die Schlitz des unteren Joches eintritt, durch den Schenkelkanal strömt und durch die oberen Jochschlitze wieder austritt. Die Preßbolzen für die Schenkelbleche liegen in der Mitte des Schenkels. Da sie durch den senkrechten Ölkanal hindurchgehen, sind die Bleche an diesen Stellen halbkreisförmig ausgespart, so daß der Ölkanal nicht an Gesamtquerschnitt verliert. Die Bolzen werden mit Papierhülsen isoliert.

Schenkel und Joche, die zusammen den Kern des Transformators bilden, werden durch starke Stahlgußtraversen und Preßstangen oder in anderer Form zusammengepreßt.

Besonders ist darauf hinzuweisen, daß die Eisensättigung bei einer bestimmten Spannung nicht zu hoch getrieben werden darf (etwa über 13000 Linien/cm), damit schädliche Einwirkungen auf die Strom- und Spannungskennlinie des zugeführten Stromes durch höhere Harmonische nicht hervorgerufen werden³.

Die Wicklungen werden aus einzelnen Spulen gebildet. In elektrischer Hinsicht wird dieses erforderlich, um hohe Lagenspannungen,

¹ Eichenberg, G. und W. Oettel: Über den Einfluß der Behandlung des Transformatoreneisens auf seine Wattverluste; *Stahleisen* Bd. 47, S. 262; *ETZ* 1928, H. 12, S. 475.

² Stern, Dr. G.: *AEG-Großtransformatoren*. *Elektrotechnische Festschrift* 1923.

³ Friedländer, E.: Die Verzerrung der Netzspannungskurve durch die Transformatoren. *Wiss. Veröff. a. d. Siemenskonzern* Bd. 7, H. 2. 1929. Biermanns: *Die Spannungskurve großer Transformatoren*. *ETZ* 1915, S. 609.

d. h. Spannungen zwischen zwei benachbarten Drahtlagen zu vermeiden, die bei Hochspannung leichter zu Durchschlägen, damit zur Bildung von kurzgeschlossenen Windungen (Kurzschlußwindungen) führen und örtliche Gefahrenquellen hervorrufen, die unter Umständen zu schweren inneren Beschädigungen des Transformators führen können (Eisenbrand). Zu hohe Lagenspannungen zwischen Ober- und Unterspannungsspulen bedingen starke Isolation, können die Wärmeabführung beeinträchtigen und auch zu Überschlägen zwischen beiden Wicklungen führen, womit das Niederspannungsnetz außerordentlich gefährdet werden kann. Über die äußeren Schutzmittel gegen einen solchen Spannungsübertritt wird später gesprochen werden.

Die Unterteilung der Wicklungen hat weiter den Vorteil, daß der induktive 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.

Lage und Zahl der Ölkanäle bestimmen die Güte einer Bauform wesentlich, wenn der Ölumlauf der natürlichen, durch die Erwärmung vorgeschriebenen Bahn ungehindert folgen kann, und dabei die einzelnen Spulen möglichst allseitig vom Öl umspült werden. Muß die abzuführende Wärmemenge mehrere Isolationsschichten durchdringen, so kann das zu unzulässigen Wärmestauungen und Übertemperaturen Veranlassung geben. Die Wärmeabführung ist dann nicht die vorteilhafteste.

Die einzelnen Spulen werden entweder nebeneinander oder übereinander angeordnet. Im ersten Falle spricht man von einer Röhrenwicklung, im zweiten von einer Scheibenwicklung. Bei der Röhrenwicklung soll die Unterspannungswicklung dem Eisenkern am nächsten liegen, weil sich diese leichter gegen Eisen isolieren läßt. Hiervon abgewichen wird nur, wenn die Niederspannungswicklung sehr hohe Stromstärke zu führen hat, weil dann die Schaltverbindungen zu viel Platz beanspruchen, der innerhalb der Gesamtwicklung nicht zu schaffen ist.

Schließlich hat die Wicklungsunterteilung noch den Vorteil, einzelne beschädigte Spulen leichter auswechseln zu können und dadurch an Instandsetzungszeit und -kosten zu sparen. Diesen Vorteil nutzt der Betrieb oftmals dahin aus, daß für einzelne große, schwer zu transportierende Transformatoren Reservespulen beschafft werden.

Ganz besonderer Wert muß ferner, wie bereits vorher kurz erwähnt, namentlich bei großen Transformatoren, die in ausgedehnten Netzen arbeiten, auf eine gute Spulenversteifung gegeneinander und gegen den Eisenkörper (gegen das Joch) 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 in Richtung ihrer Achsen, der Verbindungsstücke u. dgl. verursachen können. Mechanische Beschädigungen oder Zerstörungen der Spulen, Kurzschlüsse innerhalb des Transformators und damit Betriebsstörungen können daraus die Folge sein. Das erfordert weiter eine vorzügliche Jochversteifung. Auch die Formgebung der Spulen muß hierauf Rücksicht nehmen. Die kreis-

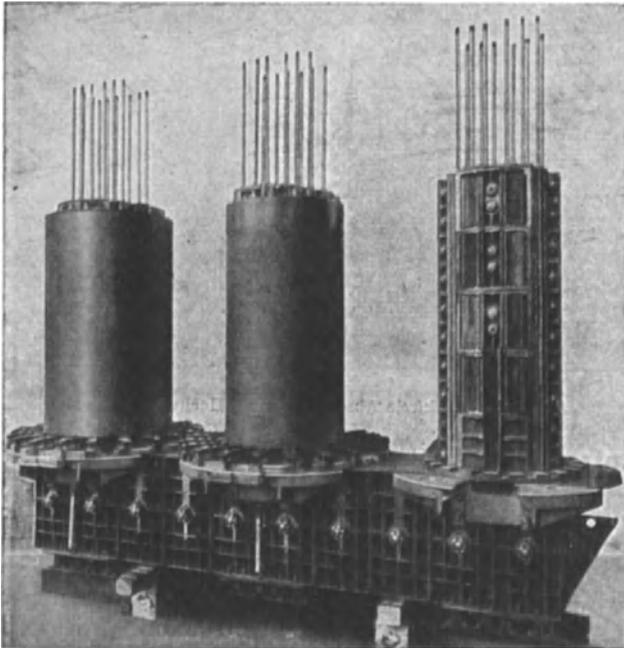


Abb. 241. Großtransformatorkern. Rechter Schenkel: ohne Wicklung. Mittlerer Schenkel: fertige innere Niedervoltspule. Linker Schenkel: Geaxzylinder über der Niedervoltspule.

förmig gewickelte Spule ist günstiger als die oval gewickelte, weil die senkrecht zur Spulenachse auftretenden Kurzschlußkräfte in ersterer nur Zug- oder Druckbeanspruchungen im Wicklungsdrahte hervorrufen, bei der ovalen dagegen auch Biegungsbeanspruchungen, die dann noch besonders starke Abstützungen notwendig machen.

Bei Großtransformatoren mit Oberspannungen über 30 kV wird der Wicklungsaufbau doppelkonzentrisch vorgenommen dargestellt, daß zwischen zwei Niedervoltwicklungen auf einem Schenkel die Hochvoltwicklung liegt. Bei dem 20000-kVA-Umspanner der AEG nach Abb. 241 besteht die Niederspannungswicklung aus zwei konzentrischen, radial einlagigen Zylinderspulen ungefähr von Schenkellänge. Die Hochvoltwicklung wird aus einer großen Zahl von einzelnen, in axialer

Richtung durch Einlagen untereinander druckfrei abgestützter Flachspulen (Abb. 242) gebildet. Zwischen Nieder- und Hochspannungswicklung werden Isolierzylinder und Ölstrecken eingeschaltet, so daß sich die Gesamtwicklung nach Abb. 243 aufbaut.

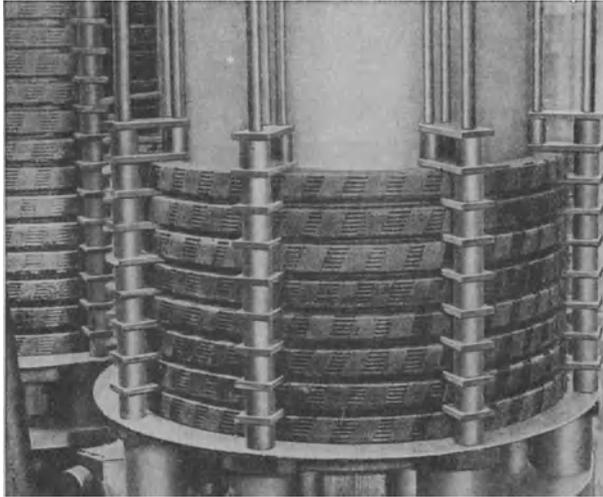


Abb. 242. Druckfreie Abstützung einer Hochvoltwicklung.

Die Anfangs- und Endspulen sowohl der Ober- als auch der Unterspannungswicklung sollen noch besonders stark isoliert sein, so daß kurzzeitig zwischen benachbarten

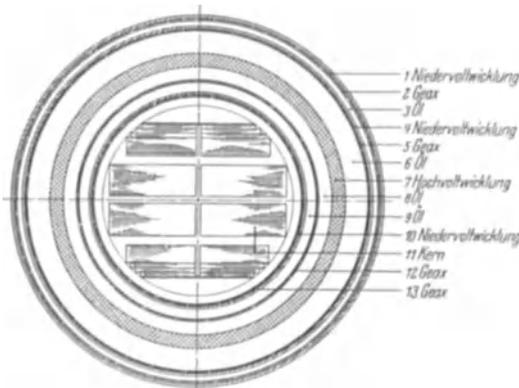


Abb. 243. Wicklungsaufbau eines 100-kV-Transformatorschenkel (AEG).

Windungen die volle Betriebsspannung auftreten kann. Diese besondere

Isolation soll einen Schutz gegen Beschädigung durch Sprungwellen bilden, der bei allen Transformatoren angewendet werden sollte. Ist die Wicklung in Stern geschaltet, so müssen auch die am Nullpunkte liegenden Spulen in gleicher Weise isoliert sein wie die Eingangsspulen.

Die AEG benutzt bei sehr hohen Spannungen noch einen besonderen Sprungwellenschutz¹ (Abb. 244). Als erste Windung, an die die Durch-

¹ DRP. 262 251.

führungsisolatoren angeschlossen sind, ist ein flacher Kupferring mit stark gerundeten Kanten ausgebildet, der die gleiche Breite hat wie die erste Hochvoltflachspule und unmittelbar über ihr liegt. Die kapazitive Koppelung aller Windungen der ersten Spule mit diesem „Ring“ ist die gleiche. Eine Sprungwelle wird also gleichmäßig und gleichzeitig vom Ringe in alle Windungen der ersten Spule eintreten, so daß die Isolation der Windungen gegeneinander von der Beanspruchung durch Sprungwellen entlastet ist. Die gleiche Anordnung wird am Nullpunkte angebracht und an den Stellen, an denen die Drahtisolation der Spulen sich ändert.

Bei sehr hoher Oberspannung (150 und mehr kV) ist mit dem Auftreten von Glimmladungen zu rechnen. Diese müssen unter allen Umständen beseitigt werden, was dadurch erreicht wird, daß

an den Wicklungen selbst, sowie an allen sonstigen Anschlußteilen, Anzapfungen u. dgl. scharfe Kanten besonders sorgfältig vermieden werden.

Die letzte Beurteilung des Aufbaues eines Transformators hat sich noch auf den vollständigen Zusammenbau und die Abführung der Spannungen zu erstrecken. Hierher gehört auch die Durchbildung von Anschlüssen für das Umschalten auf verschiedene Spannungsstufen (Abb. 302). Allgemein muß gefordert werden, daß mit Rücksicht auf das oben über die Spulenversteifung Gesagte alle Einzelteile des Transformators mechanisch so fest ineinander gefügt sind, daß eine Lockerung in erster Linie beim Transport, dann aber naturgemäß auch nach längerer Betriebszeit nicht eintritt. Alle Bolzen, Spannstücke usw. müssen gesichert sein. Lose Muttern sind schon wiederholt die Ursache schwerer innerer Beschädigungen gewesen. Die Schwingungen, in denen sich der Eisenkörper im Betriebe fortgesetzt befindet, begünstigen das Lösen von Muttern, Keilen u. dgl. Verspannungen des Eisenkörpers, die im Laufe der Zeit nachgezogen werden müssen, sollten tunlichst vermieden oder selbsttätig wirkend durchgebildet werden, weil sie sonst

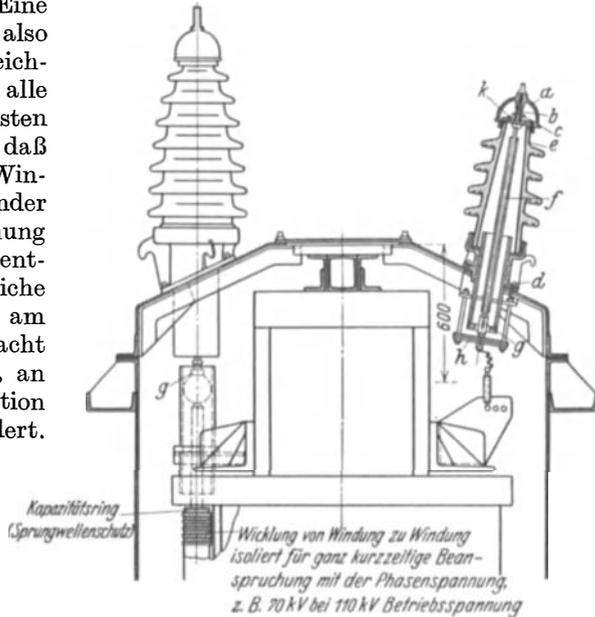


Abb. 244. Kessel- und Transformatoroberteil eines AEG 110-kV-Transformators. Sprungwellenschutz der Eingangswindungen durch Kapazitätsring. *a* Haube mit Anschlußkopf, *b* Muttern, *c* Dichtung, *d* Kappenmutter, *e* Durchführung, *f* Durchführungsbolzen, *g* Anschlußkopf, *h* Klemmbrett, *k* Entlüftungsschraube.

dem Betriebe eine Aufgabe stellen, die diesem nicht zukommt. Es kann eine solche Vorschrift nur zu leicht vergessen werden und dann unangenehme Folgen haben. Abb. 245 zeigt eine selbsttätige Nachspannvorrichtung durch Federn auf dem Joch für einen größeren Transformator des Sachsenwerkes.

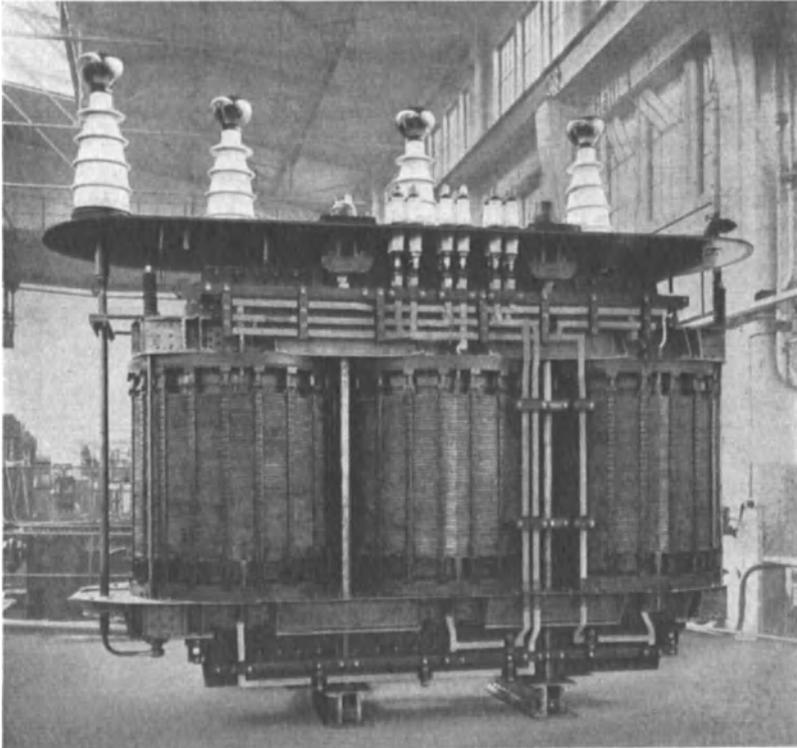


Abb. 245. Vollständiger Kern eines 15000-kVA-Transformators. 106/6,67 kV mit herausgeführten Hochspannungsnullpunkt; Joch-Federnachspannvorrichtung (Sachsenwerk).

Die Herausführung der Wicklungsenden für die Ober- und Unterspannung verlangt ebenfalls besonders bei Hochspannung sorgfältigste Beachtung (Abb. 244). Einzelheiten hierzu anzugeben würde zu weit führen. Soll der Transformator ferner umschaltbar auf verschiedene Spannungsstufen eingerichtet werden, so bedeutet das für den Konstrukteur namentlich wiederum bei Hochspannung eine oft schwer zu lösende Aufgabe. Nach den RET wird jeder Transformator für gewöhnlich mit 2 Anzapfungen ausgeführt, die etwa bei ± 4 vH bis ± 5 vH liegen. Diese Anzapfungen sollen mit Rücksicht auf größtmögliche Symmetrie tunlichst in der Mitte der Unter- bzw. Oberspannungswicklung liegen. Bei hohen Spannungen ist die oberspannungsseitige Wicklungsanzapfung zu vermeiden. Die betrieblich zu

beachtenden Gesichtspunkte für die konstruktive Durchbildung der Umschaltung werden im 55. Kap. bei der Spannungsregelung behandelt werden.

51. Die Trockentransformatoren.

Unter einem Trockentransformator ist ein solcher zu verstehen, bei welchem die Wicklungen frei zur Umgebung liegen. Die Abb. 246 zeigt einen Einphasen-, Abb. 247 einen Dreiphasen-Trockentransformator. Diese einfache Ausführung kommt nur für geringe Leistungen bis etwa 300 kVA und verhältnismäßig niedrige Spannungen bis etwa 10000 V zur Anwendung. Die für eine rasche Wärmeausstrahlung vorhandene

Abkühlungsfläche ist im Verhältnisse zur Leistung groß. Als Kühlmittel wird die umgebende Luft benutzt. Der Trocken-

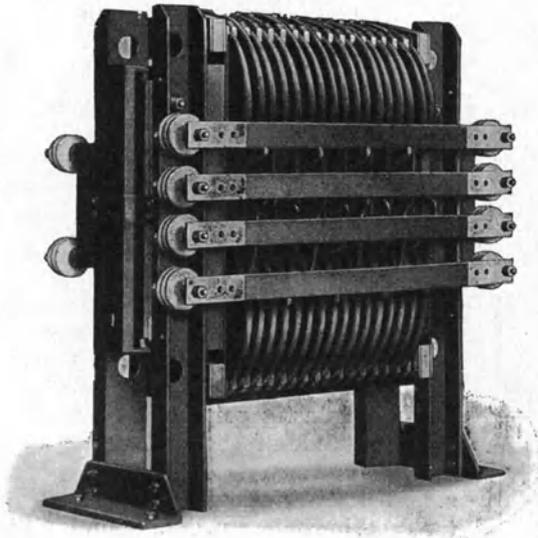


Abb. 246. Einphasen-Trockentransformator (Sachsenwerk).

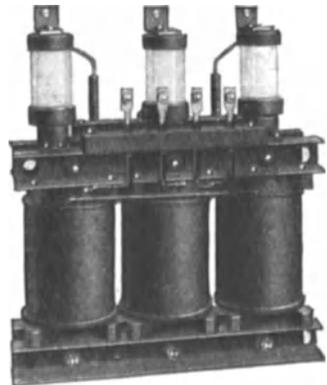


Abb. 247. Dreiphasen-Trockentransformator (Sachsenwerk).

transformator hat die Vorzüge, daß man ihn in seinem ganzen Aufbau jederzeit besichtigen und die Auswechslung von Spulen bequem und schnell vornehmen kann. Auch dann, wenn es sich darum handelt, Transformatoren öfters umzuwechseln oder an verschiedenen Stellen zu benutzen, also sie öfters zu bewegen, ist die Verwendung von Trockentransformatoren unter bestimmten Voraussetzungen am Platze. Der entwerfende Ingenieur muß jedoch von Fall zu Fall unter Berücksichtigung der Preise, Gewichte und Betriebsverhältnisse seine Entscheidung zwischen Trocken- und dem später behandelten Öltransformator treffen. Als Nachteile sind besonders folgende zu nennen. Der Feuchtigkeit zunächst darf ein solcher Transformator natürlich nicht ausgesetzt sein, weil unter derselben die Wicklungsisolation leidet; das gleiche gilt hinsichtlich unreiner Luft, weil diese ungehinderten Zutritt zu den Wicklungen hat. Alle Kühlkanäle, soweit solche über-

haupt einbaubar sind, müssen breit gehalten sein, damit Verschmutzung und Verstopfung vermieden werden bzw. leichte Reinigung möglich ist. Die Aufstellung von Trockentransformatoren kann daher nur in geschlossenen, gut gelüfteten, möglichst gleichmäßige Temperatur aufweisenden Räumen, in denen bei Temperatursturz Schwitzwasserbildung nicht eintritt, nicht aber im Freien stattfinden. Auch z. B. für die Unterbringung in Wagen (fahrbare Transformatoren S. 494) sind sie nicht geeignet, weil das Wageninnere nicht derart abgeschlossen

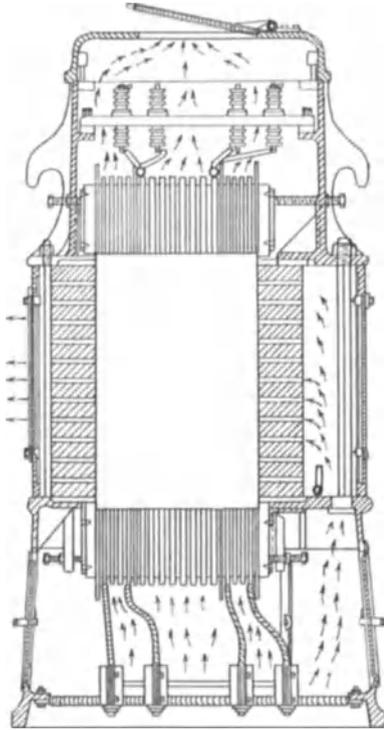


Abb. 248. Luftführung innerhalb eines fremdbelüfteten Trockentransformators.

werden kann, daß die Feuchtigkeit der Luft keinen Zutritt hat. Bei häufigerem Ausschalten kann sich namentlich in kälterer Jahreszeit oder bei Nebel Niederschlagwasser auf den Wicklungen bilden und dieses die Wicklungsisolation mit der Zeit zerstören. Selbst Schutztränkungen helfen hier nur wenig. Trockentransformatoren sollen daher möglichst immer eingeschaltet bleiben.

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 beschränkter Abmessungen nicht dauernd und zuverlässig gewährleistet z. B. bei Transformatorensäulen, unter Tage, in Kellern u. dgl., dann muß die Luftbewegung künstlich erzwungen werden entweder durch besondere Belüftungsöffnungen in den Wänden des Transformatorraumes oder durch Lüfter. Letztere können entweder den Transformatorraum an sich belüften

oder den Transformatoren unmittelbar die Frischluft zuführen. Im 53. Kap. ist diese Raumbelüftung eingehend behandelt.

Verlangen besonders gelagerte Betriebsverhältnisse, z. B. schnelle und leichte Instandsetzung von Spulen in einer schwer zugänglichen Transformatorenanlage (im Gebirge, in den Tropen), die Ausnutzung der Vorteile des Trockentransformators für größere als auf S. 319 angegebene Leistung, oder muß der Konstrukteur diese Bauform wählen, weil z. B. die Zahl der Anzapfungen oder andere Gesichtspunkte den Öltransformator nicht anwendbar erscheinen lassen (Ofentransformatoren für chemische Betriebe u. dgl.), dann können die Abkühlungsflächen des Trockentransformators unter Umständen nicht mehr für

die Abführung der Wärme ausreichen und auch die Raumbelüftung ungenügend werden. In solchen Fällen muß der Transformator künstlich durch einen Lüfter belüftet werden. Um diese Kühlung wirksam zu erreichen, wird der Transformator mit einem luftdicht schließenden Blechmantel umgeben, der den Luftstrom zwingt, die Wege zu nehmen, die für die Abführung der Wärme aus den Wicklungen und dem Eisen vorgesehen sind. Abb. 248 zeigt einen solchen Transformator. Die Luftführung ist deutlich eingezeichnet. In Amerika ist diese Ausführung noch häufig anzutreffen. Es sind dort Anlagen im Betriebe, in denen oft viele solcher Transformatoren aufgestellt sind. Die Zuführung der Frischluft erfolgt dann durch Schleuderlüfter entweder unmittelbar oder beim Vorhandensein mehrerer Transformatoren durch Kanäle. Die erwärmte Luft wird entweder ebenfalls von einem besonderen Lüfter abgesaugt, oder aber sie tritt aus den Transformatoren durch Klappen im Blechgehäuse frei in den Raum aus. Im letzteren Falle sind zum Zwecke der genügenden Belüftung des Raumes unter Verzicht auf das Öffnen der Fenster unter Umständen noch besondere Maueröffnungen oder Lüfter in den Begrenzungsmauern anzulegen.

Für die Berechnung der Kanalanlage und zur Bestimmung der Größe der Lüfter 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°C beträgt. Eine höhere Erwärmung würde auf die Zuführung ungenügender Luftmengen hinweisen, die durch zu niedrigen Druck oder durch Verstopfung der Kanäle verursacht sein könnte. Zur bequemen Reinigung des Transformators muß daher die Blechverkleidung leicht entfernbar sein. Die Abb. 249 zeigt die äußere Ansicht eines solchen Trockentransformators der Westinghouse Comp.

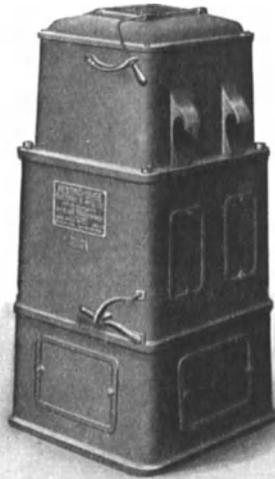


Abb. 249. Fremdbelüfteter Trockentransformator (äußere Ansicht).

52. Die Öltransformatoren.

Handelt es sich um höhere Spannungen und größere Leistungen, dann können Trockentransformatoren aus konstruktiven Gründen und auch des hohen Preises wegen nicht mehr gebaut werden, sondern man muß zu den unter b) auf S. 312 genannten Öltransformatoren übergehen. Bei dieser Bauform wird der fertig gewickelte aktive Trans-

formator in einen aus Eisenblechen zusammengenieteten oder besser geschweißten luftdicht schließenden Kessel gestellt, der vollständig mit Öl gefüllt ist (Abb. 250). Die Gründe für diese Ausführung liegen darin, daß mit steigender Spannung die Isolierung der Wicklungen gegeneinander und bei größeren Leistungen die wirtschaftliche Stoffausnutzung bzw. die damit zusammenhängende Wärmebeseitigung auf natürliche Weise selbst unter Zuhilfenahme der Lüfterkühlung immer schwieriger wird. Da nun Öl — naturgemäß aber nur solches besonderer

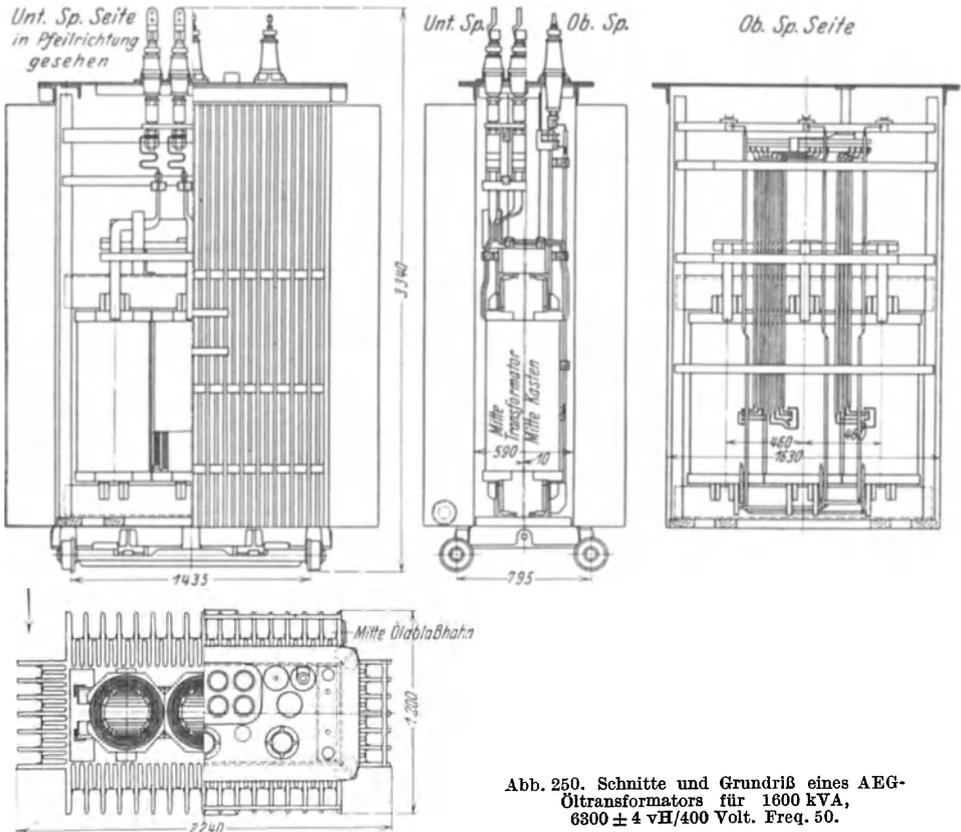


Abb. 250. Schnitte und Grundriß eines AEG-Öltransformators für 1600 kVA, $6300 \pm 4 \text{ vH}/400 \text{ Volt}$. Freq. 50.

Beschaffenheit — nicht nur eine sehr hohe Isolationsfestigkeit, 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. Transformatoren in dieser Form sind heute für die höchsten Spannungen und größten Leistungen nach jeder Richtung betriebssicher zu bauen.

a) **Das Öl.** Zunächst ist es, wie schon angedeutet, Hauptbedingung, daß das Öl ganz bestimmten Forderungen genügen muß. Als solche

sind zu nennen: sehr hoher Entflammungspunkt, damit eine Entzündung auch bei den stärksten Durchschlägen zwischen den Wicklungen oder zwischen Wicklungen und Eisen tunlichst nicht eintritt; säurefrei, damit das Kupfer, die Isolation und auch der Blechkessel nicht angegriffen werden; Dünnflüssigkeit, damit es sich leicht durch die Kanäle der Wicklungen und des Eisenkörpers bewegen kann, und schließlich Beständigkeit in diesen Eigenschaften auch bei jahrelangem Betriebe, hohen und tiefen Temperaturen und starken fortgesetzt eintretenden Temperaturschwankungen.

Die bessere Wärmeabführung mit Hilfe des den Transformator durch- und umspülenden Öles wird dadurch hervorgerufen, daß dasselbe bei eingeschaltetem Transformator in Bewegung kommt und dauernd in einen Kreislauf gebracht wird. Infolge des Temperaturgefälles zwischen dem erwärmten Transformator und den kälteren Kesselwandungen steigt das Öl an den Einzelteilen des ersteren in die Höhe und sinkt an letzteren langsam wieder herab. Dabei wird die vom Transformator erzeugte Wärme vom Öl aufgenommen, an die Kesselwandungen abgegeben und von diesen an die Umgebung ausgestrahlt. Genügen glatte Kesselwände für die Wärmeabgabe nicht mehr, dann versieht man zur Vergrößerung der Ausstrahlungsflächen die Außenseite des Blechgefäßes mit besonderen Kühlrippen (Abb. 250) oder Kühlrohren (Abb. 256).

Infolge dieser Ölisolierung und Ölkühlung können die gesamten für den Aufbau des Transformators benutzten Baustoffe wesentlich besser

elektrisch ausgenutzt werden. Der aktive Transformator erhält kleinere Abmessungen und wird billiger als ein Trockentransformator gleicher Leistung und für gleiche Spannungen. In Zahlentafel 20 sind Vergleichswerte für einen 200 kVA

Transformator als Trocken- und Öltransformator zusammengestellt. Besonders zu

beachten ist neben dem Preisunterschiede die größere Kurzschlußspannung zugunsten des Öltransformators, die geringeren Abmessungen mit kleinerem Gewicht zugunsten des Trockentransformators. Ein weiterer ganz bedeutender Vorzug des Öltransformators liegt darin, daß in elektrischer Beziehung ein derart gekühlter Transformator wesentlich unempfindlicher gegen Überlastung ist als der Trockentransformator, weil das Öl eine sehr hohe spezifische Wärme besitzt und sehr bedeutende Wärmemengen

Zahlentafel 20. Vergleich zwischen einem Trocken- und einem Öltransformator.

200 kVA, 10000/380, 220 V, Δ/\sphericalangle , $\nu = 50$, $\cos \varphi = 1$.

Bezeichnung	Trocken- trans- formator	Öltrans- formator
Wirkungsgrad η . . . vH	97,84	97,40
Spannungsänderung e_{φ} vH	1,30	2,00
Kurzschlußspannung e_k vH	1,56	3,00
Leerlaufenergie . . . W	1720	1350
Gewicht kg	1440	2000 m. Öl
Preis in vH RM	100	82
Abmessungen Länge . mm	890	905
„ Breite . mm	1170	1055
„ Höhe . mm	1530	2070

aufnehmen kann, ohne daß die Temperatur erheblich steigt. Das über die Überlastung eines Öltransformators auf S. 279 Gesagte ist hier zu beachten.

Die Schaulinie für die Erwärmung des Öles bei einem Öltransformator ist in Abb. 251 widergegeben. Man ersieht aus dem Verlaufe derselben, in welcher Zeit bei Vollbelastung die Temperatur bis auf den Wert

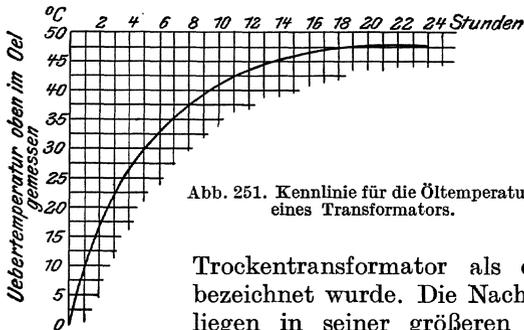


Abb. 251. Kennlinie für die Öltemperatur eines Transformators.

von 45° C Übertemperatur ansteigt. Die vom Öle bedeckten Wicklungen sind schließlich gegen die Oxydationswirkungen der Luft geschützt und können nicht mit der Zeit brüchig werden, was beim

Trockentransformator als ein besonderer Übelstand bezeichnet wurde. Die Nachteile des Öltransformators liegen in seiner größeren Raumbeanspruchung und den Schwierigkeiten bei Untersuchungen bzw. Ausbesserungen. Für die Vornahme solcher Arbeiten muß das Öl jedesmal teilweise oder ganz abgelassen und der aktive Transformator aus dem Kessel herausgehoben werden. 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 Wicklungen, sonstige Aufbauteile und das Öl die aus der Luft aufgesaugte Feuchtigkeit vollständig wieder abgegeben haben. 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

Zahlentafel 21.

Wassergehalt des Öles in vH	Durchschlagsfestigkeit in V
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

außerordentlich stark vermindert, wie das die Werte der Zahlentafel 21 zeigen. Ferner kann durch das Wasser im Öle nicht nur die Isolation der Wicklungen angegriffen und allmählich zerstört werden, sondern es besteht auch die Gefahr, daß sich Gase innerhalb des Ölkessels bilden, die unter Umständen zur Explosion führen können. Letzteres läßt sich natürlich dadurch vermeiden, daß man den Kessel mit einem Sicherheitsventile versieht. Dieses hat aber andererseits den Nachteil, daß bei nicht vollständig

dicht schließendem Ventilkegel Luft und damit Feuchtigkeit in den Kessel eindringen kann. Ein weiterer Nachteil, der gegen die Verwendung von Sicherheitsventilen spricht, ist das sog. „Atmen“ des Transformators. Geht die Belastung zurück, so kühlt sich das Öl ab, zieht sich infolgedessen zusammen, und Außenluft tritt durch Fugen u. dgl. ein. Steigt die Belastung wieder, so muß Luft austreten, und dieses

Spiel wiederholt sich fortgesetzt bei jeder Belastungsänderung. Durch Berührung mit der Luft wird aber selbst das beste Öl in heißem Zustande durch Aufnahme von Sauerstoff zersetzt und dadurch in seinen guten Eigenschaften wesentlich herabgesetzt.

Die S.S.W. haben zur Beseitigung dieser Zersetzungsgefahr also zur Verhinderung, daß die Außenluft mit dem Öle überhaupt in Berührung tritt, das heute in Deutschland fast allgemein gebräuchliche Ölausdehnungsgefäß (Ölkonservator) durchgebildet. Es wird ein zweiter, getrennt vom Transformator-kessel über diesem aufgestellter Kasten, dieses Ölausdehnungsgefäß

oder der Konservator, benutzt, der mit dem Transformator-kessel durch ein Rohr nach Abb. 252 für kleinere und nach Abb. 253 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 Verbindungs-

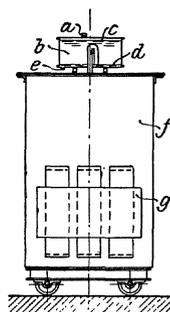


Abb. 252. Öltransformator mit Ölausdehnungsgefäß für kleine Leistungen

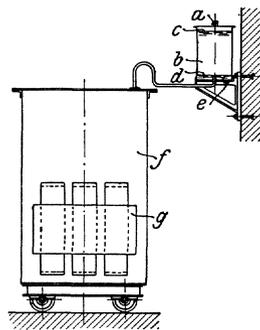


Abb. 253.

rohr, abgesehen von Änderungen des Rauminhaltes, nicht nach dem Ausdehnungsgefäß hinübertreten kann, bleibt das Öl in letzterem kalt, kommt nicht in Umlauf und bildet somit den Abschluß des heißen Öles gegen die Luft. Das kalte Öl im Ausdehnungsgefäß wird von der Luft, wie durch ausgedehnte Versuche festgestellt worden ist, praktisch nicht angegriffen. Ändert sich das Raummaß des Öles infolge stärkerer Erwärmung, dann tritt allerdings heißes Öl in das Ausdehnungsgefäß, wird dort aber, da die Ausdehnung nur langsam vor sich geht, infolge des Durchganges durch das Anschlußrohr bereits fast vollständig abgekühlt ankommen.

Um den Einfluß des Luftsauerstoffes festzustellen, wurden bei Versuchen durch S.S.W. 5 Proben desselben Öles einer 1000stündigen Erhitzung unterworfen und zwar unter Luftabschluß, bei beschränktem und bei unbeschränktem Luftzutritt. Bei der Probe, die unter Luftabschluß erhitzt wurde, war keine Veränderung des Öles zu bemerken. Die Probe, die mit beschränktem Luftzutritt erhitzt wurde, zeigte eine geringe Änderung in der Farbe des Öles. Dagegen ging bei dem Öl, zu welchem die Luft ungehindert Zutritt hatte, die anfangs gelblich grüne Farbe in Dunkelbraun über. Gleichzeitig zeigte sich die Absonderung asphaltartiger Bestandteile, die sich an der Gefäßwand festsetzten (Abb. 254). Das Ölausdehnungsgefäß bietet für den Transformator noch den weiteren sehr bedeutenden Vorteil, daß Kondenswasserbildungen innerhalb des Transformator-kessels, die dadurch hervorgerufen werden, daß infolge der schwankenden Erwärmung und der damit verbundenen

Änderung des Ölvolumens kalte Luft in den Transformator-kessel gesaugt und dort an den warmen Blechwänden bzw. dem Deckel niedergeschlagen wird, nicht stattfinden können. Durch die Verbindung zwischen Rohr und Ausdehnungsgefäß wird erreicht, daß Wasser, welches sich im Ausdehnungsgefäß etwa ansammeln sollte, nicht in das Verbindungsrohr gelangen kann, bevor der Wasserstand im Ausdehnungsgefäß eine bestimmte Höhe erreicht hat. Eine Ablassschraube am Boden des Ausdehnungsgefäßes ermöglicht, jederzeit die untere Flüssigkeitsschicht zu prüfen.

Das Ausdehnungsgefäß darf nicht zu klein bemessen werden. Für seinen Ölinhalt ist vorzuschreiben, daß bei ausgeschaltetem Transformator je nach dem Aufstellungsorte des Transformators im bedeckten Raume oder im Freien der Ölstand im Ausdehnungsgefäß selbst bei der tiefsten vorkommenden Umgebungstemperatur den Boden noch um ein bestimmtes Maß (etwa 5 bis 10 cm) bedecken muß, umgekehrt bei einer höchsten Umgebungstemperatur und vollbelastetem Transformator nach Eintritt des Dauerzustandes nicht überströmen darf. Als tiefste Temperatur für Freiluftanlagen gilt etwa -35°C , als höchste Temperatur im bedeckten Raume $+45^{\circ}\text{C}$. Ölstandsmarken sollten für die Überwachung bei verschiedenen Temperaturen nicht fehlen.

Mit Rücksicht auf den hohen Preis des Transformatoröles und die Bedingung stets einwandfreier Beschaffenheit ist — wie hier kurz eingeschaltet sein möge — empfehlenswert, eine eigene Öl-Filterpresse aufzustellen, die dann gleichzeitig auch für Reinigung des Schalteröles mit Verwendung finden kann.

Bei sehr großen Leistungen und hohen Spannungen oder wenn die Transformatoren unter ungünstigen Raum- und Temperaturverhältnissen arbeiten müssen, wie z. B. in Bergwerksanlagen unter Tage, in heißen Gegenden u. dgl., ist es oft nicht mehr möglich, den Wärmeaustausch an den Wandungen des Ölkessels lebhaft genug zu gestalten, um die erforderliche Wärmeabführung zu erzielen. Man muß dann vielmehr wiederum zu einer künstlichen Kühlung übergehen.

b) Die Kühlung der Öltransformatoren¹. Die jeweils anzuwendende Kühlform eines Öltransformators, die die nachfolgende große Mannigfaltigkeit zeigt, richtet sich wiederum nach seiner Größe, seinem Aufstellungsorte, dem Kühlmittel, das benutzt werden soll oder kann und den Beschaffungs- und Betriebskosten für die Kühlform selbst. Nach den VDE-Vorschriften wird unterschieden:

1. OS Öltransformatoren mit Selbstlüftung. Der Ölkasten wird durch Strahlung und durch natürlichen Zug gekühlt.

2. OF Öltransformatoren mit Fremdlüftung. Der Ölkasten wird mit Luft gekühlt, die durch einen Lüfter oder künstlichen Zug bewegt wird.

¹ Albrecht, C.: Kühlmittel für Öltransformatoren. Siemenszeitschrift Juli 1926; Gewecke, Dr.-Ing.: Kühlung von Transformatoren. AEG-Mitt. 1928, H. 9, S. 459; Böckmann, E.: Die Kühlung der Transformatoren. Bergmann-Mitt. 1928, H. 1.

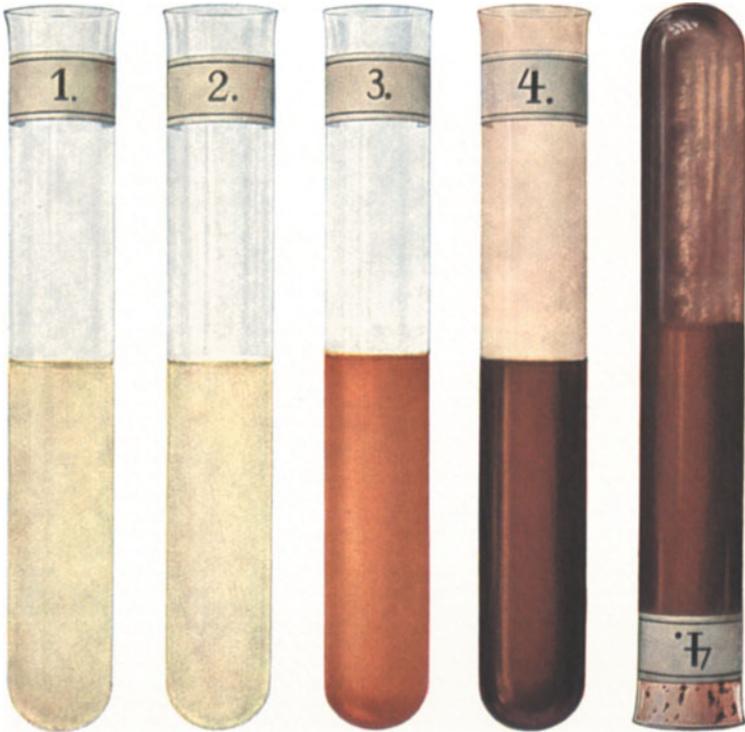


Abb. 254. Proben von Transformatorenöl.

Nr. 1: Im angelieferten Zustande,
Nr. 2, 3 und 4: 1000 Stunden auf 100° C erhitzt, und zwar:
Nr. 2: unter Luftabschluß erhitzt,
Nr. 3: bei geringem Luftzutritt erhitzt,
Nr. 4: bei vollem Luftzutritt erhitzt. Nach Umkehrung des Glases
zeigen sich die an der Glaswand anhaftenden Rückstände.

3. OFU Öltransformatoren mit Fremdlüftung und Ölumlaufl. Der Ölkasten wird durch Luft gekühlt, die durch einen Lüfter oder künstlichen Zug bewegt wird. Der Ölumlaufl erfolgt zwangsweise.

4. OWJ Öltransformatoren mit innerer Wasserkühlung. Das Öl wird durch einen Wasserkühler im Inneren des Ölkastens gekühlt.

5. OWA Öltransformatoren mit Ölumlaufl und äußerer Wasserkühlung. Das Öl wird in einem Wasserkühler außerhalb des Ölkastens gekühlt. Der Ölumlaufl erfolgt zwangsweise.

6. OSA Öltransformatoren mit Ölumlaufl und äußerer Selbstlüftung. Das Öl wird in einem Luftkühler außerhalb des Ölkastens gekühlt. Der Ölumlaufl erfolgt zwangsweise.

7. OFA Öltransformatoren mit Ölumlaufl und äußerer Fremdlüftung. Das Öl wird in einem Luftkühler außerhalb des Ölkastens gekühlt. Die Kühlluft wird durch einen Lüfter oder künstlichen Zug bewegt. Der Ölumlaufl erfolgt zwangsweise.

Als Kühlmittel kommen also nach dieser Zusammenstellung Luft und Wasser in Frage.

Der Öltransformator mit Selbstlüftung (OS) ist die übliche Bauform selbst für die größten Leistungen und Oberspannungen bis etwa 100 kV. Wie bereits angegeben, erfolgt die Wärmeabführung durch die Kesselwände, die zur Vergrößerung der wirksamen Oberfläche Kühlrippen erhalten oder aus Wellblech gefertigt werden. Die Kühlung geschieht durch die frei zutretende Luft auf natürliche Weise, also selbsttätig durch Strömung, Leitung und Strahlung (Abb. 255).

Eine andere Bauart des Kessels zeigt Abb. 256, bei welcher an Stelle der Kühlrippen Kühlrohre verwendet werden (Röhrenkessel), die in die Wandungen eines glatten Kessels eingewalzt sind und oben und unten mit dem Kesselinneren in Verbindung stehen, so daß das Öl durch diese Rohre strömt. Der Röhrenkessel ist widerstandsfähiger gegen Transportbeanspruchungen als der Wellblech- oder -rippenkessel, ergibt bei gleicher Grundfläche geringere Bauhöhe und erfordert infolge der größeren Oberfläche für die Wärmeabgabe weniger Öl.

Für Freiluftausführung kann die Wirkung der Kühlrippen oder der Rohre bei sehr großen Leistungen nicht mehr ausreichen, oder die Raumbeanspruchung des Transformators wird so groß, daß er infolge des Überschreitens des Eisenbahnlichtraumes nicht mehr versandfähig ist. Will man selbst dann die Selbstlüftung wählen, weil Wasser nicht zu beschaffen ist, so werden an Stelle der Kühlrohre Strahler (Radiatoren) angebaut (Abb. 257), die für den Versand abgenommen werden.



Abb. 255. Drehstrom-Öltransformator für Selbstlüftung mit Kühlrippenkessel und aufgebautem Ölausdehnungsgefäß.

Jeder Strahler soll am Kessel mit Ventilen für Ölzu- und -austritt angeschlossen und mit Reinigungsverschlüssen versehen sein, um ihn

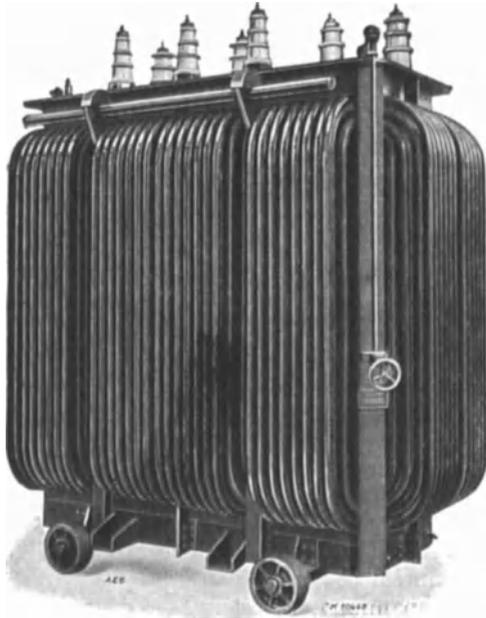


Abb. 256. Öltransformator für Selbstlüftung mit Röhrenkessel.

absperren und dann im Inneren leicht und gründlich reinigen zu können, ohne ihn nach erstmaliger Montage also abnehmen zu müssen. Letzteres ist wegen der Schwierigkeit, gute Öldichtung an den Flanschen zu erhalten, tunlichst zu vermeiden. Diese Form des Anbaues gibt dem Betrieb später wesentliche Erleichterungen für die Überwachung und Instandhaltung und gleicht dadurch die Mehrkosten aus.

Die Vorteile der Selbstlüftung liegen in der sehr geringen Wartung, der geringen Gesamt-Raumbanspruchung und den billigsten Anlagekosten.

Die Nachteile bestehen in der Hauptsache darin, daß ein Öltransfor-

mator mit Selbstlüftung nach vorhergegangener starker Belastung über längere Zeit nicht überlastet werden darf. Ferner setzt die mögliche

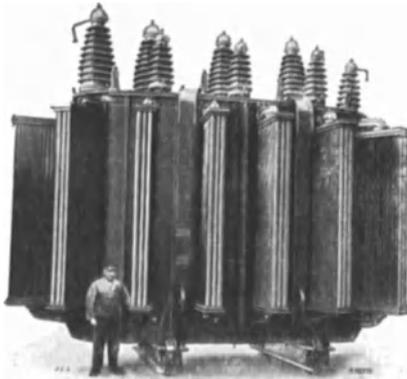


Abb. 257. Drehstromtransformator für Selbstlüftung mit Radiatorenkühlung.

Raumbelüftung bei Aufstellung des Transformators in einer Kammer nach den Angaben im 53. Kapitel der Wahl dieser Bauform eine gewisse Grenze, wenn nicht künstliche Raumbelüftung zur Anwendung kommt (künstlicher Zug), wodurch die Wartung vermehrt wird. Für Betriebe mit häufigen starken Spitzenbelastungen werden große Transformatoren etwa von 6000 kVA an mit einer Selbstkühlung kaum noch empfehlenswert sein, es sei denn, daß es sich um Freiluftausführung handelt.

Der Öltransformator mit Fremdlüftung (OF) und mit dieser und Ölumlaufl (OFU). Die Selbstlüftung kann zur Vermeidung des Nachteiles der geringeren Überlastungsfähigkeit durch eine Fremd-

lüftung ohne oder mit besonderem Ölumlauf unterstützt werden, für die eine größere Zahl von Ausführungsmöglichkeiten besteht, die kurz zusammengefaßt folgende sind:

a) Anblasen des Transformators

durch einen Lüfter. Nach Abb. 258 wird der Transformator über einer Grube aufgestellt, die an einen Lüfter angeschlossen ist. Es gilt hierfür das auf S. 321 für den Trockentransformator Gesagte in gleicher Weise. Der Öltransformator erhält unten einen Windmantel aus Blech, um den Luftstrom richtig zu führen. Bei der Bauausführung ist zu beachten, daß der Windmantel den Zutritt der Frischluft nicht hindern darf, wenn der Lüfter nicht arbeitet. Das läßt sich erreichen, wenn der Luftkanal auch die gewöhnliche Luftzuführung übernimmt.

b) Die Form unter a) kann in ihrer Wirkung verstärkt werden, wenn der Ölumlauf im Transformator durch eine angeschlossene Umwälzpumpe verstärkt wird (Abb. 259).

Die Vorteile beider Formen liegen in einer verstärkten Wärmeabseitung und damit erzielbaren wirtschaftlicheren Ausnutzung der Transformatorbaustoffe. Die Transformatoren

werden kleiner und billiger. Auch eine Leistungssteigerung bei vorhandenen Transformatoren kann durch den nachträglichen Einbau

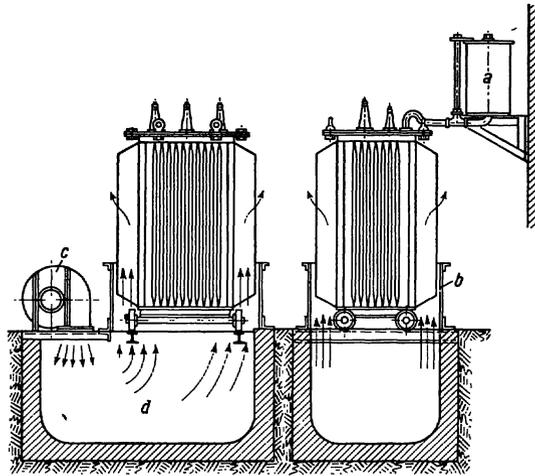


Abb. 258. Transformator mit Fremdlüftung (OF).
a Ölausdehnungsgefäß, b Lüftungsmantel, c Schleudlüfter mit Motor, d Windgrube (v_{\max} in der Grube 1,5 m/s).

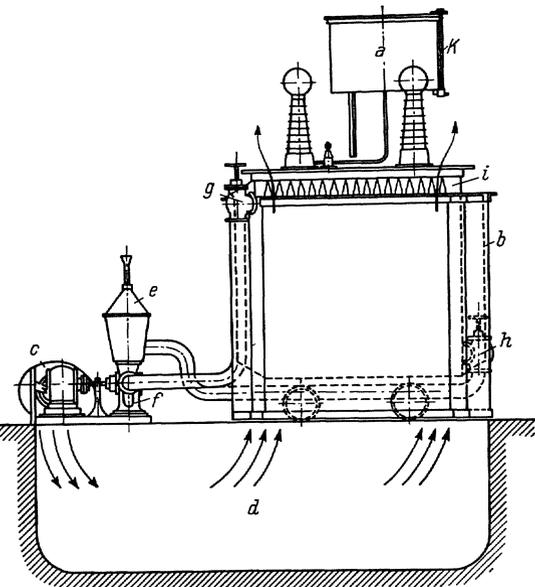


Abb. 259. Transformator mit Fremdlüftung und Ölumlauf (OFU).
a Ölausdehnungsgefäß, b Lüftungsmantel, c Schleudlüfter mit Motor, d Windgrube, e Ölabscheider, j Ölpumpe mit Motor, g Ölaustritt, h Öleintritt, i Transformator, k Ölstandszeiger.

dieser Fremdlüftung erreicht werden. Es bedarf das allerdings rechnerischer Nachprüfung durch den Konstrukteur. Wesentlich ist weiter, daß gegebenenfalls vorübergehende Spitzenbelastungen den Transformatoren in stärkerem Ausmaße zugemutet werden können, wenn die Fremdlüftung als zusätzliche Belüftung in Betrieb genommen wird.

Die Nachteile liegen einmal in der größeren Wartung der Fremdlüftungseinrichtungen und weiter in dem größeren Raumbedarf der Gesamtanlage. Man wird daher beim Vergleich der bisher behandelten

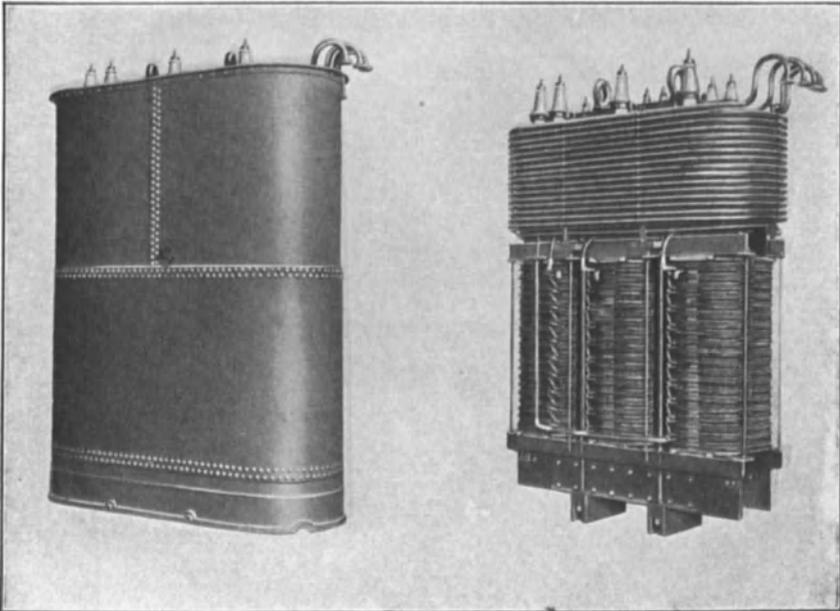


Abb. 260. Transformator mit innerer Wasserkühlung (OWI).
Kühlschlange mit Transformator zusammengebaut.

Kühlformen darauf zu achten haben, welche Gesamtkosten einschließlich Gebäudekosten, gegebenenfalls zuzüglich besonderer Wartungs- und Unterhaltungskosten entstehen.

Die Fremdbelüftung bedarf weiter besonderer Überwachungs- und Meldeeinrichtungen, über die auf S. 343 zusammenhängend gesprochen wird. Auch diese Kosten müssen bei einem Vergleich berücksichtigt werden.

Der Öltransformator mit innerer (OWJ) oder äußerer Wasserkühlung (OWA). Die Kühlform mit innerer Wasserkühlung setzt zunächst voraus, daß Wasser in genügender Menge und vor allen Dingen in brauchbarer Beschaffenheit zur Verfügung steht.

Die Bauformen des Transformators für diese Kühlung zeigen Abb. 260 und Abb. 261. Das Kühlwasser wird einer im oberen Teile im Transfor-

transformatorliegenden Kühlschlange zugeführt, was zunächst zur Bedingung hat, daß die Kühlschlange mit Rücksicht auf Kondenswasserbildung auch bei der tiefsten vorkommenden Temperatur stets noch vollständig und reichlich im Öl eingebettet liegen muß. Die Bauhöhe des Transformators wird daher sehr groß. Für die Baustoffbeschaffenheit der Kühlschlange müssen sehr scharfe Bedingungen gestellt werden, damit, selbst nach jahrelangem Betriebe kein Anfressen (Korrosion) eintritt¹. Kann Wasser auch nur in kleinster Menge ins Öl gelangen, so

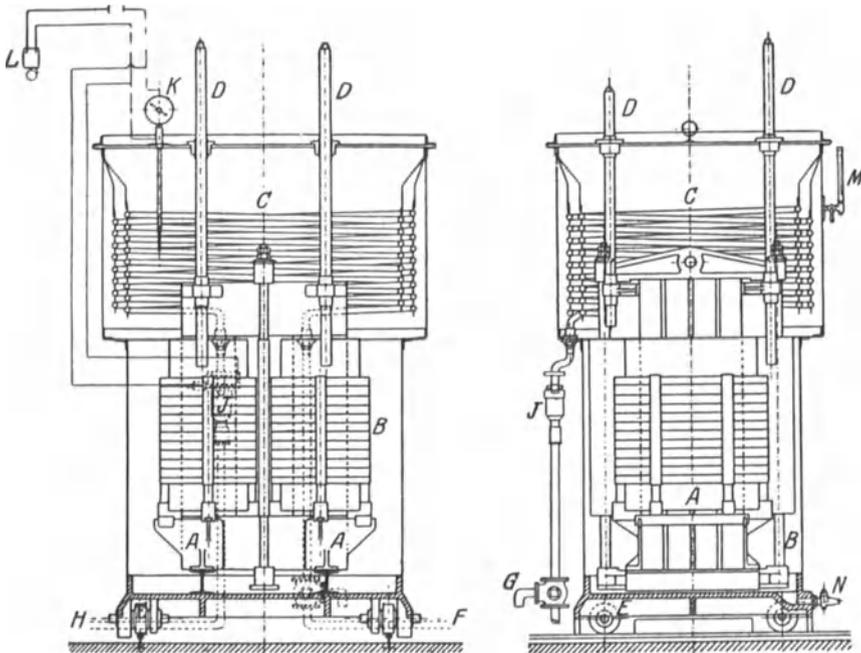


Abb. 261. Schnitte durch einen Öltransformator (im Kessel) mit innerer Wasserkühlung (OWI). Kühlschlangen im Kessel eingebaut.

bestehen die bereits auf S. 324 erwähnten außerordentlichen Gefahren für den Transformator. Jede Lötstelle, Flanschverbindung u. dgl. ist zu vermeiden, auf die Baustoffbewegung infolge der fortgesetzten Temperaturschwankungen besonders an den Ein- und Austrittsstellen am Kessel besonders konstruktiv zu achten. Es sind daher nur nahtlos gezogene, sehr sorgfältig unter hohem Druck geprüfte Rohre zu verwenden. Eine Besichtigung mit Druckprobe der Rohre hat häufig im Betriebe stattzufinden.

Das zur Kühlung benutzte Wasser muß rein sein und darf keine Kesselstein bildenden Bestandteile enthalten. Bei ungeeignetem

¹ Eichhorn, H.: Ursachen und Gegenmaßnahmen bei Anfressungen von Transformatorkühlschlangen. Elektr. Wirtsch. Nr. 466, S. 457.

Wasser sind Betriebsstörungen an den Transformatoren zu befürchten, weil mit der Zeit eine Querschnittsverengung der für den Wasserumlauf vorgesehenen Einrichtungen eintritt. Dann kann die zur Abführung der Wärme notwendige Wassermenge nicht mehr gefördert werden, die Isolation der Wicklungen leidet, bzw. das Öl wird dick und läuft nicht mehr genügend um. In 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 Kühlwerken gekühlt wird. Abb. 261 soll etwas eingehender besprochen werden.

Der Ölkessel ist aus Kesselblech gefertigt, geschweißt und unten mit einem gußeisernen, der leichteren Bewegung wegen mit Laufrollen versehenen Rahmen vernietet. Der obere Teil des Kessels ist verbreitert, hier liegt die Kühlschlange *C* für den Wasserumlauf. Während in Abb. 260 die Kühlschlange beim Herausnehmen des Transformators aus dem Kessel jedesmal ebenfalls mit herausgezogen werden muß, ist das bei der Ausführung nach Abb. 261 nicht erforderlich. Beide Anordnungen haben ihre Vor- und Nachteile, und es ist mehr Geschmackssache, welcher von beiden man den Vorzug geben will, sofern die zur Verfügung stehende Raumhöhe nicht besondere Vorschriften macht. Bei der Ausführung nach Abb. 261 ist sie geringer als nach Abb. 260. Die Anlagekosten sind daher gegebenenfalls mit zum Vergleich heranzuziehen. Während bei der gleichzeitigen Herausnahme von Transformator und Kühlschlange auch eine Untersuchung des Kesselinneren und der Rohrleitung gewissermaßen selbstverständlich durchgeführt wird, hat das Verbleiben der Rohre im Kessel den Vorzug, schnell einen anderen Transformator ohne umständliche Montage der Rohranlage einbauen zu können. Der Zutritt des Kühlwassers erfolgt naturgemäß von unten. Die Kühlschlange liegt vollständig unter Öl.

Zur Entleerung der Kühlschlange befindet sich in der Zuleitung bei *G* ein Dreiweghahn. Ferner ist am Grunde des Kessels ein Öl- ablaßhahn *N* angebracht, um bequem auch das Öl ablassen oder die unterste Ölschicht auf Schlammabsatz untersuchen zu können.

Zur Prüfung der Öltemperatur ist ein Meldegerät *L* vorhanden, das sofort anzeigt, einmal durch die Vorrichtung *J*, wenn der Wasserzufluß unterbrochen wird, oder durch den Temperaturzeiger *K*, wenn aus einem anderen Grunde das Öl die vorgeschriebene bzw. zulässige Höchsttemperatur überschreitet. Bei *M* ist außerdem noch ein Ölstandszeiger angebaut.

In der Abb. 261 sind ferner mit *A* das Joch des als Kernform ausgebildeten Transformators, mit *B* der Unterkessel und mit *D* die Ausfühungsklemmen bezeichnet.

Sind mehrere Transformatoren mit dieser Kühlform aufzustellen, so empfiehlt es sich, die Rohranlage für den Wasserzu- und -abfluß im Bedienungsgange anzuordnen, wenn derselbe von dem Transformatorenraume 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 Flanschfehler oder einer Ventilbeschädigung das ausströmende Wasser nicht in den Transformatorenraum gelangen kann. Mit Hilfe von Schaulöchern, die sicher abschließbar und so groß zu wählen sind, daß durch sie eine elektrische Handlampe ohne Mühe in die Transformatorzellen 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 Prüfgeräte anzuordnen, die Rohrleitungen für den Ölabfluß zu verlegen u. dgl. Ist die Wasserzuführung nicht dauernd mit gleichbleibendem Druck zu ermöglichen, so ist in die Hauptzuführungsrohrleitung ein entsprechend groß zu bemessender Wasserkessel einzuschalten.

Abb. 262 zeigt eine derartige Wasserleitungsanlage, wie sie von Oerlikon für die Kraftzentrale Obermatt des Elektrizitätswerkes Luzern-Engelberg ausgeführt worden ist. Das Werk umfaßt: 10 Einphasentransformatoren von je 700 kVA, 6000/27000 V, Freq. 50. Der entwerfende Ingenieur wird aus dieser Abbildung unschwer erkennen können, in welcher Form derartige Anlagen einzurichten sind; es können daher weitere Erläuterungen unterbleiben.

Für alle auf diese und ähnliche Art gekühlten Transformatoren gilt ganz allgemein, daß selbst bei Leerlauf stets genügendes Kühlwasser durch die Kühlschlangen hindurchströmt. Die Kühlwassertemperatur soll 20° C nicht übersteigen. Sind die Transformatoren vor Frost nicht völlig geschützt, so muß bei außer Betrieb befindlichen Transformatoren das Wasser aus den Kühlschlangen mittels Druckluft ausgeblasen werden.

In Zahlentafel 22 ist ein Vergleich der technischen Daten für einen Transformator mit Selbstlüftung und Wasserkühlung mit innenliegender Kühlschlange durchgeführt. Bei gleichen Verlustzahlen sind die Außenabmessungen des Transformators mit Selbstlüftung, das Gewicht um die Ölfüllung und der Preis höher. Der Preisunterschied beträgt aber nur etwa 5 vH. Er wird in den meisten Fällen aufgehoben durch die Wasserzu- und -abführungseinrichtungen und die Kosten für die Wasserbeschaffung, Reinigung, Beaufsichtigung u. dgl., wenn diese Unkosten kapitalisiert den Beschaffungskosten hinzugerechnet werden. Aus diesem Grunde wird man nur dort zur Wasserkühlung mit innenliegender Kühlschlange greifen, wenn einmal die baulichen Verhältnisse geringstmögliche Gesamt-Raumabmessungen erfordern, die Wasserbeschaffung an sich ohne nennenswerte Unkosten möglich ist und vorübergehende Überlastungen notwendig sind, die dem selbstbelüfteten Transformator nicht mehr zugemutet werden dürfen. In Deutschland kommen diese Voraussetzungen selten vor. Aufstellung unter Tage oder besonders heiße Gegenden werden entscheidend sein.

Die wirtschaftliche Betrachtung der Zahlentafel 22 zeigt folgendes Ergebnis:

Da der Wirkungsgrad und auch die Verluste für beide Trans-

formatoren gleich sind, muß der Unterschied in den Beschaffungskosten mit RM 3000.— bei 14 vH jährlichem Kapitaldienst = RM 420.—



Abb. 262. Bedienungsgang zwischen Schaltanlage und Transformatorraum mit Rohrleitungen und Meldegeräten für die Wasserkühlung der Transformatoren.

gleich sein den Kosten für die Wasserbeschaffung jährlich. Werden die größeren Reinigungsarbeiten mit etwa RM 100.— angesetzt, so verbleiben RM 320.—. Bei Einschaltung der Wasserkühlung nur zu Zeiten höchster Belastung wird der Wasserverbrauch an etwa

Zahlentafel 22.

	Selbstlüftung	Wasserkühlung mit innenliegender Kühlschlange
Leistung kVA	1600	1600
Übersetzung kV	6,3/30	6,3/30
Gewicht mit Ölfüllung und Ausdehnungsgefäß kg	10180	8110
Wirkungsgrad bei $\cos \varphi = 1$ und $\frac{1}{2}$ Last vH	98,3	98,3
Spannungsänderung bei $\cos \varphi = 1$ und $\frac{1}{2}$ Last vH	1,29	1,29
Kurzschlußspannung vH	3,2	3,2
Leerlaufenergie kW	6,85	6,85
Gewicht der Ölfüllung gesamt . . . kg	3240	2060
Preis	24000	21000
Schaltung	\wedge/\wedge	\wedge/\wedge
Bauform	Mantel- transformator	Mantel- transformator
Wasserbedarf m ³ /Std.	—	1,25
Abmessungen Höhe mm	2880	2860
Breite mm	1730	1300
Länge mm	2025	1600

200 Tagen mit je 3 Stunden, also bei 600 Jahresstunden betragen $600 \cdot 1,25 = 750 \text{ m}^3$. Demnach darf 1 m^3 Wasser kosten:

$$\frac{320 \cdot 100}{750} = \text{rd. } 43 \text{ Pf.}$$

Die zweite Form mit Ölumlaufl und ußerer Wasserkühlung (OWA) ist zunächst grundsätzlich dann zu wählen, wenn reines Kühlwasser nicht dauernd in genügenden Mengen oder nur mit hohen Kosten zu beschaffen ist. Ganz allgemein ist hier aber darauf hinzuweisen, daß eine große Zahl von Betrieben die innere Wasserkühlung verwerfen, weil sie ihr die dauernde Sicherheit, die zu verlangen ist, nicht beimessen können. Dieses ist ein weiterer — und zwar sehr wesentlicher — Grund für die Wahl der äußeren Wasserkühlung, wenn Wasser überhaupt verwendet werden soll.

Die praktische Ausführung dieser Kühlform zeigen Abb. 263 bis Abb. 266.

Das Öl wird mittels einer kleinen, elektrisch angetriebenen Pumpe f dauernd durch den Transformator hindurchgetrieben und läuft außerhalb des Ölkessels durch eine Rohrschlange, die in einem Wasserbade liegt. In Abb. 263 bezeichnet A den Transformatorraum und B den Pumpenraum mit Wasserbehälter. Beide Räume sind vollständig voneinander getrennt anzulegen. Das fließende Wasser tritt oben in den Behälter ein und verläßt denselben bei i . Das Wasser umspült also fortgesetzt die vom Öle durchflossenen Kühlschlangen n und kühlt dadurch das Öl ab. Diese Kühlart wird heute bei sehr großen Transformatoreinzelleistungen angewendet. Die Vorteile liegen wiederum in einer guten Beseitigung der vom Öl aufgenommenen Wärmemengen. Nach-

teile sind aber auch bei dieser Kühlform vorhanden, die gegenüber der noch zu behandelnden letzten Kühlform mit äußerer Selbstkühlung vor dem Entschluß sorgfältig abgewogen werden sollten. Naturgemäß muß

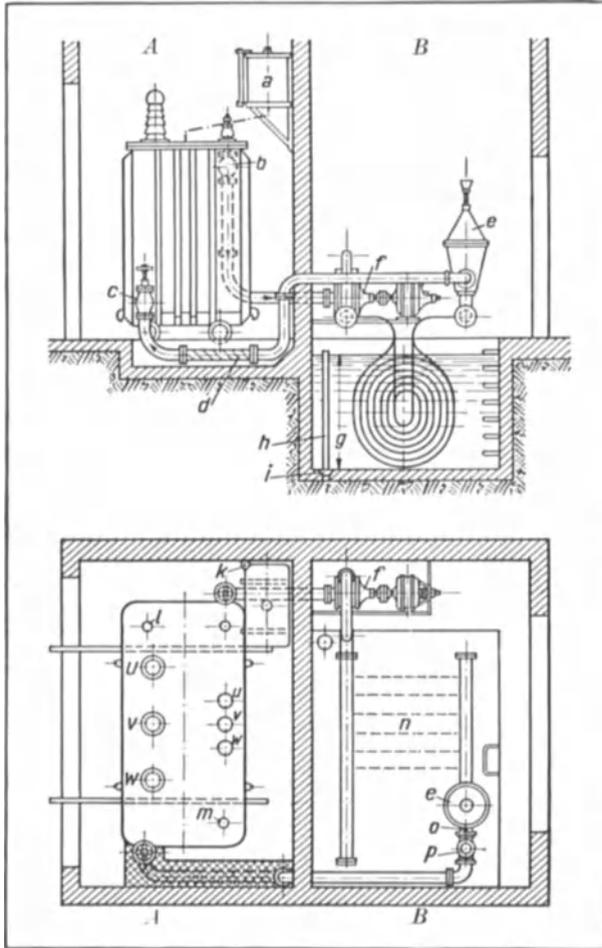


Abb. 263. Transformator mit äußerer Wasserschlangenkühlung (OWA).

a Ölausdehnungsgefäß, *b* Ölaustrittsventil, *c* Öleintrittsventil, *d* elastisches Rohrstück, *e* Luftabscheider, *f* Ölpumpe mit Motor, *g* niedrigster Kühlwasserstand 1700 mm, *h* Wasserüberlaufrohr, *i* Wasserablaß, *k* Ölstandszeiger, *l* Ölaufüllschraube, *m* Tauchrohr, *n* Kühlschlange, *o* Thermometer, *p* Meldeeinrichtung.

auch bei einer solchen Einrichtung dauernde Aufsicht und Wartung vorhanden sein, die sich in der Hauptsache auf die Ölpumpen zu erstrecken hat. Für die Wassergrubenabmessungen ist besonders darauf zu achten, daß die Kühlschlangen weit genug auseinanderliegen, um sie bequem reinigen und allseitig gut streichen zu können. Besondere

Prüfgeräte müssen erkennen lassen, ob durch Undichtigkeiten an der Pumpe oder den Rohrleitungen Luft angesaugt und in das Transformatorinnere gedrungen ist. Da Luft im Öl dessen Haltbarkeit sehr

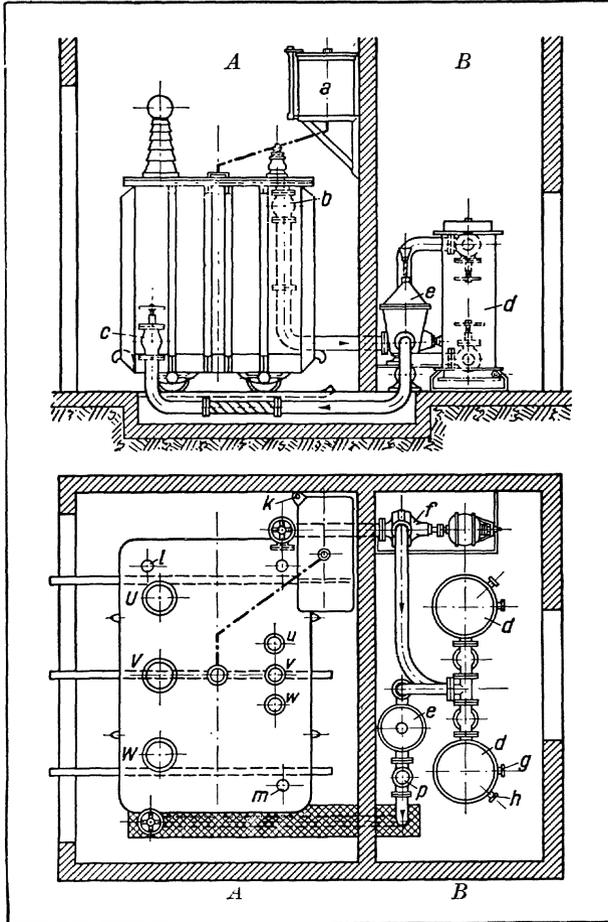


Abb. 264. Transformator mit äußerer Wasserkühlung durch Röhrenkühler (OWA).
a Ölausdehnungsgefäß, *b* Ölaustrittsventil, *c* Öleintrittsventil, *d* Röhrenkühler, *e* Luftabscheider,
f Ölpumpe mit Motor, *g* Kühlwassereinlauf, *h* Kühlwasserablauf, *k* Ölstandsanzeiger, *l* Ölaufüll-
 schraube, *m* Tauchrohr, *n* Meldeeinrichtung.

beeinträchtigt, ist die Beseitigung von Undichtigkeiten sofort vorzunehmen¹.

Eine von der bisher beschriebenen abweichende, bei guter Wasserbeschaffenheit häufiger benutzte Form der äußeren Wasserkühlung soll schließlich erwähnt werden. Bei dieser wird die außen liegende

¹ Siehe Fußnote auf S. 342.

Kühlschlange durch einen Röhrenkühler ähnlich dem Kondensator einer Dampfturbine ersetzt. Abb. 264 zeigt auch hierfür eine Ausführung. Die Ölpumpe saugt das heiße Öl aus dem Transformator ab, drückt es in einen Kessel, in welchem die wasserdurchflossenen Kühlschlangen liegen und führt es abgekühlt dem Transformator wieder zu. Der Kühlwasserein- und -auslauf liegt oben im Kühler. Das heiße Öl umspült also hier die kalten Kühlschlangen. Der Öldruck im Kühler ist stets größer zu halten als der Wasserdruck. Das Kühlwasser muß frei abfließen.

Der Röhrenkühler hat den Vorteil, daß er bedeutend geringere Abmessungen aufweist wie die Gesamtanlage mit außenliegender Kühlschlange. Die sonstigen Vor- und Nachteile sind die gleichen wie

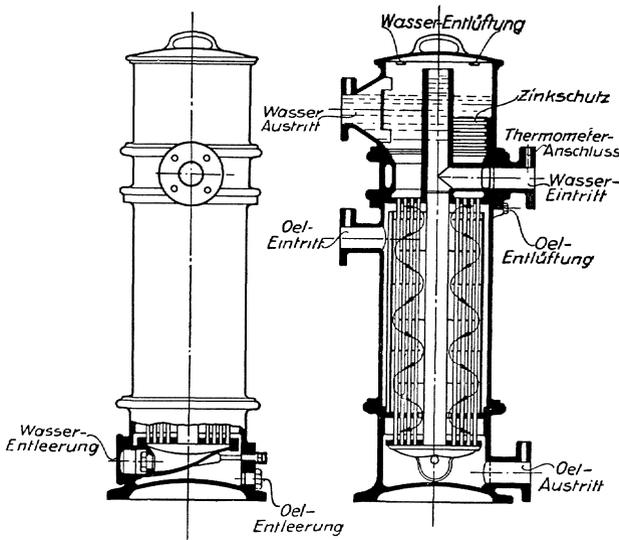


Abb. 265. Röhrenkühler.

bereits angegeben. Hinsichtlich der Reinigung ist der Röhrenkühler wie der Kondensator einer Dampfturbine zu behandeln.

Bei sehr großen Transformator-Einzelleistungen wird der Röhrenkühler jeder Transformatoreinheit vorteilhaft in zwei Apparate unterteilt, um entsprechende Betriebsbeweglichkeit bei Reinigung, Besichtigung, Prüfung und Instandsetzung zu erhalten, indem jedesmal nur ein Kühler abgeschaltet wird. Dabei soll dann jedes Element eines solchen Doppelkühlers derart bemessen sein, daß die Belastung des Transformators noch mit etwa 60 bis 70 vH möglich ist.

In Abb. 265 ist die Kühlerausführung des Sachsenwerkes dargestellt und Abb. 266 zeigt eine praktische Ausführung derartiger Anlagen.

Nur der Vollständigkeit wegen soll noch erwähnt werden, das ganz vereinzelt die äußere Wasserkühlung auch in der Berieselung der Kessel-

wände zur Durchführung gekommen ist. Sie kann auf zweierlei Arten vorgenommen werden. In Abb. 267 ist ein Rohr mit zahlreichen kleinen Löchern um die Kesselwände gelegt, das an die Wasserleitung angeschlossen wird. Diese Form setzt voraus, daß Wasser in großer Menge und ohne erhebliche Kosten beschafft werden kann. Sind Reservierohre vorhanden, dann kann auch Wasser nicht vollständig einwandfreier Beschaffenheit verwendet werden, sofern dasselbe rein von Sand und Schlamm ist. Jede Transformatorrohrleitung hat ein Abschlußventil zu 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 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. Abb. 268 zeigt den Oberteil eines Transformatorgehäuses mit dieser Wasserkühlung der 2750-kVA-Drehstromtransformatoren (10500/46000 V, Freq. 42) in der von Oerlikon gebauten Kraftübertragungsanlage Caffaro-Brescia. Besonders ist auf die an der Innenseite der Kesselwandungen angebrachten Kühlrippen aufmerksam zu machen, durch die eine wesentliche Ver-

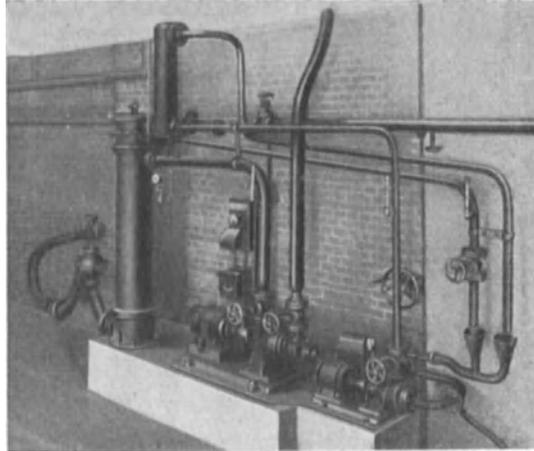


Abb. 266. Aufbau einer Kühleinrichtung mit Röhrenkühler für einen 10000-kVA-Transformator.

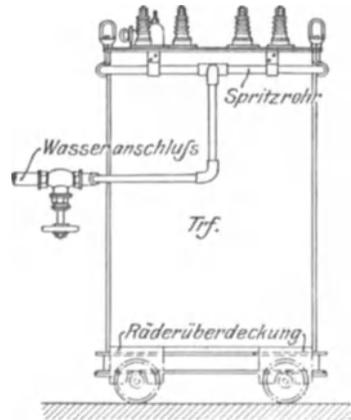


Abb. 267. Kühlung eines Öltransformators durch Berieselung der Kesselwände.

größerung der Kühlflächen erreicht wird. Auch diese Kühlform hat reichliche und billig zu beschaffende Wassermengen zur Voraussetzung. Hier muß indessen das Wasser aus leicht erklärlichen Gründen vollständig rein sein.

Beim Vergleich der Kühlarten muß die für einen ständigen Wasserumlauf aufzuwendende elektrische Arbeit festgestellt werden.

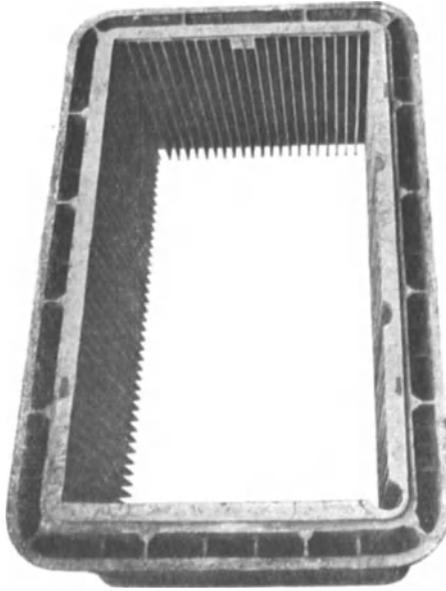


Abb. 268. Oberteil eines Öltransformatorbessels mit Kanälen für Wasserkühlung.

Beim Ansaugen aus einem Tiefbrunnen können recht erhebliche Ausgaben entstehen. Etwa Wasser aus einem städtischen Leitungsnetze zu beziehen, wird in der Regel wirtschaftlich nicht möglich sein. Nur bei

Transformatoranlagen für Wasserkraftwerke wird daher in der Mehrzahl der Fälle diese Kühlform von vornherein die geeignetste sein. Aber auch dann gilt wie ganz allgemein, daß Frost die Kühlwasserzufuhr nicht beeinträchtigen darf. Das bedingt weiter einen frostfreien Raum für die Kühlanlage und dadurch gegebenenfalls große bauliche Ausgaben. Hat das Wasser aggressive Eigenschaften auf das Metall der Kühlschlangen, was ebenfalls vorher durch chemische Untersuchung festzustellen ist, so ist

diese Kühlform nicht oder nur unter bestimmten Bedingungen für die Metallart der Kühlschlangen, die Wassergruben u. dgl. anwendbar¹.

Es bedarf daher sehr sorgfältiger Feststellungen und auch wirtschaftliche Rechnung nach allen Richtungen, bevor diese Art der Kühlung gewählt wird. Oftmals wird hiergegen verstoßen.

Steht Wasser nicht billig, in genügender Menge und entsprechender Beschaffenheit zur Verfügung, geben äußere Umstände wie Frost und Hitze zu Bedenken Veranlassung, will man außerdem die an sich umständliche Beaufsichtigung und Unterhaltung vermeiden, so kehrt man zur Luft als Kühlmittel zurück und kann eine der beiden letzten Kühlformen verwenden.

Der Öltransformator mit Ölumlaufl und äußerer Selbstlüftung (OSA) oder äußerer Fremdlüftung (OFA). Durch eine besondere Pumpe wird das Öl oben aus dem Transformator abgesaugt, je nach der Ölmenge bzw. der abzuführenden Wärmemenge durch eine Anzahl von Kühlelementen aus Wellblech hin-

¹ Siehe Fußnote auf S. 331.

durchgedrückt und dann dem Transformator unten wieder zugeführt. Die Kühlelemente sind von einem Blechkasten umgeben und strahlen die Wärme in den Raum ab, oder es strömt ihnen die Kühlluft durch einen Lüfter zu (Abb. 269). Diese Ausführung ist selbst für

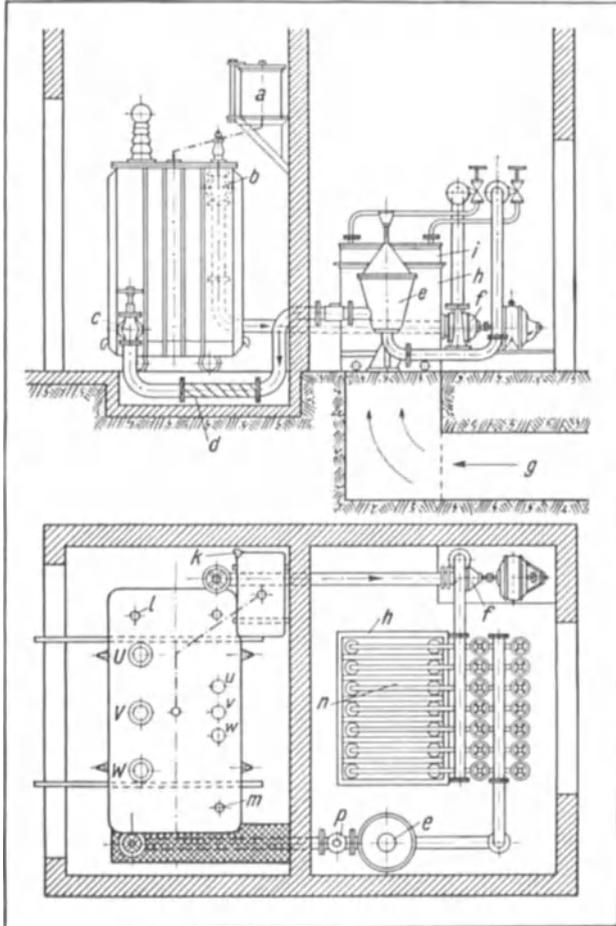


Abb. 269. Transformator mit Ölumlau und äußerer Fremdlüftung (Prebluftkühlung).

a Ölausdehnungsgefäß, *b* Ölaustrittsventil, *c* Öleintrittsventil, *d* elastisches Rohrstück, *e* Luftabscheider, *f* Ölpumpe mit Motor, *g* Luftzufuhr vom Schlenderlüfter mit Motor, *h* Lüftungsmantel, *i* Wellblechkühler, *k* Ölstandzeiger, *l* Öläuffüllschraube, *m* Tauchrohr, *n* Kühlelemente, *p* Meldeeinrichtung.

größte Transformatoren brauchbar und vermeidet die Nachteile der bisher wohl am häufigsten für Großtransformatoren angewendeten Wasserkühlung. Im 63. Kap. ist diese Kühlform noch näher beschrieben. Bei der Ausführung der S.S.W. werden Kühlelemente, die etwa 1,5 m hoch, 1,5 m lang und 0,27 m breit sind, benutzt. Ein solches Kühlelement

vermag ungefähr 32 kW Verlust bei einer Temperatur des Kühlmittels von etwa $+20^{\circ}\text{C}$ abzuführen.

Aus Abb. 269 ist der Aufbau der gesamten Kühlanlage ersichtlich. Der Ölaustritt aus dem Transformator erfolgt aus dem Ölaustrittsventil über der Rohrleitung, die je nach Länge und Lage mit einem Ausdehnungsstück versehen sein muß, zur Ölpumpe. Das heiße Öl wird dann den Kühlelementen über durch Ventile absperrbare Verteilerrohre zugeführt und verläßt durch die Rohrleitung die Kühlelemente. Bevor es dem Transformator erneut zgedrückt wird, durchströmt es einen Luftabschneider, der mit einem Anzeiger versehen ist, um jederzeit sofort erkennen zu können, ob durch undichte Stellen in der Ölleitungsanlage Luft angesaugt worden ist. Auf diese Weise können Rohrundichtigkeiten sofort erkannt und beseitigt werden.

Zur leichteren Übersicht sind in Zahlentafel 23 die verschiedenen Kühlformen vergleichsweise zusammengestellt und kurz beurteilt.

c) Prüf- und Meldeeinrichtungen. Auf eine leichte und trotzdem sichere Überwachung der Transformatoren und ihrer Kühlanlagen muß der Betrieb den größten Wert legen. Solche Einrichtungen sind daher dem Umfange des Werkes entsprechend einzubauen. Die hierfür aufzuwendenden Kosten sind gegenüber dem Schutzwerte so gering, daß sie keine Rolle spielen und auch nicht spielen dürfen.

Als solche Prüf- und Meldeeinrichtungen sind im Gebrauch und praktisch genügend erprobt:

Buchholzschutz,

Gefahrmelder (Wärmeauslöser),

Temperaturanzeiger mit Meldekontakt auf verschiedene Temperaturen einstellbar,

Druckzeiger mit Meldekontakt,

Anzeigervorrichtungen im Öl- und Wasserumlauf für die getrennten Kühlmittel.

Die einzelnen Einrichtungen sind je nach der Überwachungsmöglichkeit und der Größe der Transformatoren sowie der Form ihrer Belüftung bzw. Kühlung zu wählen.

In unbewachten oder nicht ständig bedienten Werken sind einzubauen: Buchholzschutz und Gefahrmelder. Die Transformatoren kommen nur für Selbstbelüftung zur Aufstellung. Beim Ansprechen wirken die Prüfgeräte auf die Schalter des Transformators und trennen ihn gegebenenfalls vom Netz ab. Eine Störung in der Stromlieferung ist die Folge.

In dauernd bedienten Werken sollen eingebaut sein bei Selbstbelüftung: Buchholzschutz, Gefahrmelder oder Temperaturzeiger mit Meldekontakt.

Bei Fremdkühlung: Buchholzschutz, Gefahrmelder und Temperaturanzeiger mit Meldekontakt für die Transformatoren, Meldeeinrichtungen für aussetzenden Ölumlauf, desgleichen für Störungen in der Wasserleitung, ferner Meldegeräte für das Herausfallen der Motoren zu den Öl- und Wasserpumpen bzw. den Lüftern, Temperaturanzeiger für die Ölein- und -austrittstemperatur, Wasserein- und -austrittstemperatur und die Frischlufttemperatur der Lüfter, Meldegeräte für

Zahlentafel 23. Zusammenstellung der Kühlformen, ihre Anwendungsgebiete und Vorteile.

Nr.	Kühlform	Anwendungsgebiet	Vorteile
1	Selbstlüftung OS, Abb. 255—257	Gebräuchlichste Kühlform: für große Leistungen ausführbar; für Freiluftanlagen geeignet	Geringste Wartung; geringste Gesamtanlagekosten; geringster Raumbedarf
2	Fremdlüftung OF Abb. 258	Für größere Leistungen bei Fehlen von Kühlwasser: bei vorhandenen Transformatoren nachträgliche Leistungssteigerung möglich	Geringe Wartung der Lüfteranlage; geringere Anlagekosten als bei den anderen Kühlformen mit Zusatzeinrichtungen
3	Fremdlüftung mit Ölumlaufl OFU Abb. 259	Wie bei 2	Größere Wartung als bei 2 durch zusätzliche Ölpumpe
4	Innere Wasserkühlung OWI Abb. 260—262	Für mittlere Leistungen bei beschränkten Raumverhältnissen, wenn sauberes und gutes Wasser billig zu beschaffen	Sorgfältige Wartung der Kühlschlangen und der Wasseranlage. Geringere Gesamtanlagekosten
5	Ölumlaufl und äußere Wasserschlangenkühlung OWA Abb. 263	Für größte Leistungen bei billigen Wasserbeschaffungsverhältnissen	Sorgfältige Wartung der Gesamtanlage; bei gleicher Leistung großer Raumbedarf und höchste Gesamtanlagekosten gegenüber 5a, 6 und 7
5a	Ölumlaufl und äußere Wasserkühlung durch Röhrenkühler OWA Abb. 264—266	Für größte Leistungen bei beschränkten Raumverhältnissen und billiger Beschaffung guten Kühlwassers	Sorgfältigste Wartung der Gesamtanlage; bei gleicher Leistung geringste Gesamtanlagekosten und kleinster Raumbedarf gegenüber 5, 6 und 7
6	Ölumlaufl und äußere Selbstlüftung	Für größte Leistungen bei Fehlen von Kühlwasser	Geringere Wartung; geringere Gesamtanlagekosten
7	Ölumlaufl und äußere Fremdlüftung Abb. 269	Für größte Leistungen bei Fehlen von Kühlwasser	Sorgfältigste Wartung der Gesamtanlage; bei gleicher Leistung in Gesamtanlagekosten und Raumbedarf annähernd gleich wie 5a

das Unterschreiten eines tiefstzulässigen Ölstandes in den Ausdehnungsgefäßen, Druckmesser in den Ölleitungen.

Bei großen Transformatorenwerken werden die einzelnen Prüf- und Meldeeinrichtungen elektrisch nach der Warte oder dem Hauptbedie-

nungsgänge auf Schauzeichen, Glocken, Hupen usw. übertragen, um die Bedienung von ständigen Prüfängen zu entlasten und trotzdem die erforderliche Sicherheit zu erhalten.

Die akustischen Meldegeräte sollen ihren einzelnen Bestimmungen entsprechend an verschieden klingende Wecker und Hupen angeschlossen werden, um der Bedienung in klarer Form anzuzeigen, an welcher Stelle Gefahr besteht. Entsprechend beschriftete Fallklappen in der Warte oder an anderer Sonderstelle erleichtern die Auffindung des angesprochenen Gerätes außerordentlich. Dabei ist die Schaltung dann derart auszuführen, daß der Wecker oder die Hupe so lange fortschellt, bis sie von Hand abgestellt wird, die Fallklappe dagegen erst zurückgelegt werden kann, wenn der Fehler beseitigt ist. Sämtliche Prüf- und Meldeleitungen sollen zudem auf ihren ständig guten Isolationszustand leicht überprüfbar sein. Am sichersten ist die Wahl von Meldekabeln in entsprechender Ausführung je nach der Verlegung. Es sei hier noch besonders darauf aufmerksam gemacht, daß einmal die Klemmenkästen und Klemmenleisten für den Leitungsanschluß übersichtlich, leicht zugänglich, klar in der Bezeichnung und gut belüftet einzurichten und die Kabelkanäle ohne die Möglichkeit der Feuchtigkeitsansammlung, abgesperrt für Beschädigungen durch Ratten, Vögel, Mutwillen, Bauarbeiten, aber trotzdem ebenfalls gut belüftet anzulegen sind. Parallelverteilung der akustischen Melder im Werke und nach außen, gegebenenfalls auch in das Wohngebäude der Schaltwärter ist vielfach besonders zu empfehlen.

Auf die einzelnen Prüf- und Meldegeräte kann ausführlich nicht eingegangen werden. Die Zeitschriften insbesondere der Elektrizitätsfirmen bringen fortgesetzt über alle diese Einrichtungen Beschreibungen, auf die verwiesen werden muß.

Ob Buchholzschutz und Gefahrmelder (Wärmeauslöser) unmittelbar an die Auslösevorrichtungen des Transformatorölschalters angeschlossen werden oder nur Meldegeräte zur Betätigung bringen, muß von Fall zu Fall entschieden werden. Einerseits kann das sofortige Abschalten eines gefährdeten Transformators schwerere und dadurch teure Instandsetzungsarbeiten vermeiden lassen, andererseits aber kann der Betrieb unzulässige Betriebsunterbrechungen erleiden, die die schwersten Folgen nach sich ziehen können, während lediglich bei einer Klangmeldung ein sofortiges Eingreifen der Bedienung durch Zuschalten eines neuen und Abtrennen des gefährdeten Transformators eine solche Stromunterbrechung vermeiden läßt.

53. Die Wärmeentwicklung und Wärmebeseitigung in Transformatorenräumen¹.

Wie bei der Behandlung der einzelnen Lüftungs- und Kühlungsformen der Transformatoren mehrfach besonders hervorgehoben, ist

¹ Siehe Verfasser: Die Wärmeentwicklung, Raumtemperatur und Wärmebeseitigung in elektrischen Betriebsräumen. EKB 1911, H. 14, 16, 18 und 19; ETZ 1911, S. 505, 530.

die Wärmebeseitigung aus dem Betriebsraum eines Transformators bzw. die Zuführung von Kühlluft zum Gegenstand besonderer Berechnung zu machen. Das wird oftmals nicht genügend beachtet und kann dann betrieblich unangenehme Folgen haben. Die RET sagen hierzu:

Wenn die natürliche Lüftung eines Transformators (*TS*, *OS* oder *OSA*) durch Aufstellung in einem zu engen Raume oder durch einen nachträglich angebrachten Schutzkasten behindert wird, so kann der Transformator dauernd nur eine geringere Leistung oder seine Nennleistung nur kurzzeitig abgeben.

Es bringt daher dieser Abschnitt alles Notwendige für Rechnung und Ausführung der Raumbelüftung mit zusammenhängenden Fragen und gilt als Ergänzung zu den Angaben über die Kühlformen.

a) Die Wärmeentwicklung. Bezeichnet N_{Trf} die Leistung eines Transformators in kW bei $\cos \varphi = 1$ und η_{Trf} den Wirkungsgrad bei Vollast in vH der Gesamtleistung, so ist die von ihm entwickelte und an die Umgebung, sofern er in einer geschlossenen Kammer steht, an diese abgegebene Wärmemenge bei voller Belastung im Dauerbetriebe:

$$W_{Trf} = 860 \cdot N_{Trf} \left(\frac{100 - \eta_{Trf}}{100} \right) \text{ WE/Std.} \quad (138)$$

und die von mehreren in einem Raume (Halle) untergebrachten Transformatoren erzeugte Wärmemenge — sofern sie vollbelastet arbeiten — gleich der algebraischen Summe der einzelnen Wärmebeträge, also:

$$W_{g, Trf} = W_{Trf_1} + W_{Trf_2} + \dots + W_{Trf_n}. \quad (139)$$

Ist nicht mit gleichzeitiger Vollbelastung zu rechnen, so sind in Gl. (139) die entsprechenden Teillasten und Wirkungsgrade einzusetzen.

Diese Wärmemenge hat eine Erhöhung der im Aufstellungsraume an sich herrschenden Temperatur zur Folge. Die neue Temperatur (Mischungstemperatur¹) darf eine bestimmte Höhe nicht überschreiten, die als Umgebungstemperatur bei Dauerbelastung mit voller Leistung der Berechnung des Transformators, also seiner betriebsmäßigen Erwärmung (Grenzerwärmung) zugrunde gelegt worden ist. Andernfalls steigt die innere Temperatur der einzelnen Transformatorteile über die zulässige Grenze, und diese, also die Wicklungen mit ihrer Isolation, das Eisen, das Öl usw. werden gefährdet. Das gilt weiter auch für alle in einem solchen Raume untergebrachten Geräte wie Drossel-

Die Angaben im 53. Kap. gelten sinngemäß auch für alle anderen elektrischen Betriebsräume, also z. B. auch für die Generatorenräume der Kraftwerke, Umformwerke usw.

¹ Die Mischungstemperatur kann etwa nach folgender Gleichung festgestellt werden.

$$t_2^0 = \frac{Q_1 \cdot t_1 (1 + \alpha \cdot t_2) + Q_2 \cdot t_2 (1 + \alpha \cdot t_1)}{Q_1 \cdot (1 + \alpha \cdot t_2) + Q_2 (1 + \alpha \cdot t_1)}$$

$Q_1 \text{ m}^3 \text{ Luft bei } t_1^0$
 $Q_2 \text{ m}^3 \text{ Luft bei } t_2^0$
 $\alpha = 0,003665$

spulen, Kondensatoren, Meßgerätete. Es muß also auf Grund einer Rechnung die zu erwartende Temperaturerhöhung im Aufstellungsraume oder die noch zuzulassende Wärmemenge festgestellt und, falls sie zu hoch ist, durch besondere Mittel herabgedrückt werden.

Die Größe und Dauer der Belastung eines Transformators richtet sich nach der Art des Betriebes und der Jahreszeit. In chemischen Betrieben wie überhaupt in industriellen Anlagen wird mit voller oder annähernd voller Belastung einzelner Transformatoren während der ganzen täglichen Arbeitszeit im Sommer und Winter zu rechnen sein. Bei Stadt- und Überlandwerken fällt zumeist die Größe der Belastung im Sommer. In allen Fällen und mit Rücksicht auf zukünftige Belastungssteigerung wird indessen eine vorsichtige Betriebsführung verlangen müssen, daß jeder Transformator bei allen praktisch vorkommenden Sommertemperaturen dauernd unter voller Belastung zu arbeiten hat. Es sollte grundsätzlich davon abgesehen werden, bei mehreren in einem Transformatorenwerke vorhandenen Transformatoren die im Hochsommer auftretende Belastung nur aus dem Grunde auf zwei oder mehr Transformatoren zu verteilen, weil die einzelnen Transformatoren infolge zu hoher Raumtemperatur in ihrer Kammer nach Vorschrift des Lieferers oder entsprechend den Verbandsvorschriften nicht vollbelastet werden dürfen. Die Reserve, die in solcher Lastverteilung liegt, sollte Reserve bleiben. Gegebenenfalls ist auch zu fordern — wiederum vom betriebstechnischen Standpunkte —, daß eine vorübergehende oder auf eine bestimmte Zeitdauer festgesetzte Überlastung selbst an besonders heißen Sommertagen zulässig sein muß. Solchen Bedingungen kann der Transformatorenkonstrukteur Rechnung tragen mit der Gegenforderung, daß dann die Raumtemperatur eine bestimmte Höhe nicht überschreiten darf. Da aus Sicherheitsgründen, über die später noch eingehender gesprochen werden wird, häufig jeder größere Transformator eine eigene Kammer erhält, wird es also rechnerischer Feststellung bedürfen, ob die Temperatur in dieser Kammer den Vorschriften entspricht. Wie leicht erklärlich, wird sich die Rechnung nur auf die höchste Sommertemperatur zu erstrecken haben.

Ganz allgemein ist bei unveränderlichem Druck, der für die hier zu behandelnden Fälle ohne weiteres vorausgesetzt werden darf, die zur Erwärmung von G kg Luft (entsprechend V m³) von t^0 auf t_1^0 erforderliche Wärmemenge bei einem Barometerstande von 760 mm QS¹:

$$W = 0,2375 \cdot G \cdot (t_1 - t) = \frac{0,307 \cdot V}{1 + \alpha \cdot t} (t_1 - t) \text{ WE/Std.} \quad (140)$$

$$\alpha = \text{Ausdehnungsziffer der Luft} = \frac{1}{273} = 0,003665.$$

¹ Der Barometerstand von 760 mm Quecksilber kann zumeist ohne großen Fehler angenommen werden. Nur für Anlagen über etwa 1000 m ü. M. wird der Barometerstand zu berücksichtigen sein. Gl. (140) ist dann mit $\frac{b}{760}$ zu multiplizieren, worin b in mm Quecksilber den neuen oder tatsächlichen Barometerstand bezeichnet.

Im folgenden soll bezeichnet werden mit:

t_a^0 die Außentemperatur, d. h. die Temperatur der äußeren Umgebung der Transformator-kammer (freie Luft, benachbarter Maschinensaal) in $^{\circ}\text{C}$,

t_i^0 die Raumtemperatur, d. h. die Temperatur in der Transformator-kammer (Halle, Säule) in $^{\circ}\text{C}$,
dann ist also:

$$W = \frac{0,307 \cdot V}{1 + \alpha \cdot t_a} (t_i - t_a) \text{ WE/Std.} \quad (141)$$

Aus den Gebäudeabmessungen des Vorentwurfes für ein Transformatorenwerk oder bei Erweiterung z. B. durch Auswechseln eines kleineren gegen einen größeren Transformator aus den vorhandenen Raumabmessungen ist das Volumen V jedes für die Berechnung in Frage kommenden Transformatorraumes bekannt. Bei Wahl des zulässigen Temperaturunterschiedes $t_i - t_a$ gibt die Gl. (141) an, welche Wärmemenge dem Raume theoretisch noch zugeführt werden darf, um die Raumtemperatur t_i bei einer bestimmten Außentemperatur t_a zu erreichen. Ist die vom Transformator abgegebene Wärmemenge bei dauernder Vollbelastung oder anderen Belastungsannahmen größer als W , so bedeutet das, daß die Raumtemperatur höher wird als zulässig. Dann muß eine besondere Beseitigung der überschüssigen Wärmemenge herbeigeführt werden.

Beispiel (nur zur überschläglichen Beurteilung):

Abmessungen der Transformator-kammer $4,00 \cdot 4,00 \cdot 8,00 \text{ m}$,

Transformatorleistung $N_{xrt} = 4000 \text{ kVA}$, $\eta_{xrt} = 98 \text{ vH}$,

Vollbelastung vorausgesetzt,

$t_a^0 = 35^{\circ}\text{C}$,

$t_i^0 = 45^{\circ}\text{C}$,

dann:

$$W_{xrt} = 860 \cdot 4000 \left(\frac{100 - 98}{100} \right) = 68800 \text{ WE/Std.}$$

$$W = \frac{0,307 \cdot 128}{1 + 0,003665 \cdot 35} (45 - 35) = \underline{\underline{350 \text{ „}}}$$

verbleiben 68450 WE/Std.
abzuführende Wärmemenge.

Das Beispiel zeigt deutlich, daß in dem gewählten Falle, der der Praxis entnommen ist, schon bei dieser mittleren Transformatorleistung eine recht beachtliche Wärmemenge besonders zu beseitigen ist. Die Temperatur würde jedenfalls, wenn angenommen wird, daß die Wärmemenge auch nur z. B. zu 50 vH im Raume ständig verbliebe, ganz unzulässig hoch anwachsen.

Selbst wenn nun zunächst die Fenster und Türen des Transformatorraumes fest verschlossen sind, findet durch die Umfassungswände, Fenster, Türen, Dach usw. ein dauernder Wärmeaustausch

zwischen Außen- und Innenluft statt, und zwar von Stellen höherer zu solchen niedrigerer Temperatur. Man nennt diesen natürlichen Vorgang die Wärmewanderung. Es wird demnach von der besonders zu beseitigenden Wärmemenge ein bestimmter Wärmebetrag auf natürliche Weise an die dem Transformatorraume benachbarten kälteren Räume bzw. an die freie Luft fortgesetzt so lange abgegeben werden, als die Temperatur an diesen Stellen unterhalb der Raumtemperatur liegt. Diese Wärmewanderung hängt neben der Größe des Temperaturunterschiedes von dem Baustoff, der Beschaffenheit und der Stärke der den Raum begrenzenden Flächen ab. Je wärmedurchlässiger die Begrenzungsflächen sind, um so stärker ist diese Wärmewanderung. Es liegt daher zunächst nahe, die Wärmewanderung in weitgehendem Maße auszunützen, um möglichst an künstlichen Mitteln für die Abführung der verbleibenden Wärmemenge zu sparen, also die Wände usw. tunlichst wärmedurchlässig d. h. aus guten Wärmeleitern herzustellen. Aus betrieblichen Gründen verfährt man dagegen nicht in dieser Form, sondern macht die Gebäudewände möglichst wärmeundurchlässig. Dann beherrscht man besser die Temperaturregelung und schützt dadurch bei Temperaturstürzen den Raum und damit die in diesem weiter untergebrachten Einrichtungen wie Geräte, Stützer, Durchführungen usw. vor Feuchtigkeitsniederschlägen und Frost, wenn z. B. des Nachts der Transformator leerläuft, dann so gut wie keine Wärme abstrahlt, oder am Tage schwach belastet bzw. ausgeschaltet ist. Die baulichen Mehrausgaben sind unbedeutend, die betrieblichen Vorteile überwiegen, und letzteres muß ausschlaggebend sein. Es sei hierbei ausdrücklich bemerkt, daß es sich in diesem Kapitel um die Abführung überflüssiger Wärmemengen aus Transformatorräumen bzw. Schalträumen mit Transformatoren handelt im Gegensatz zur Belüftung von Schalträumen allgemein, über die später gesprochen wird.

Bezeichnet:

W_v in WE/Std. den Betrag der Wärmewanderung, also die Wärmemenge, die stündlich im Beharrungszustande durch die Raumbegrenzungsflächen hindurchgeht,

F die Größe der einzelnen Flächen in m^2 ,

\varkappa eine von den Begrenzungsbaustoffen abhängige Erfahrungsziffer (Wärmedurchlässigkeitswert),

so ist die natürliche stündliche Wärmeabgabe durch die Begrenzungsflächen:

$$W_v = \sum \varkappa \cdot F \cdot (t_i - t_a) \text{ WE/Std.} \quad (142)$$

Rietschel¹ hat die Werte von \varkappa für die am häufigsten vorkommenden Baustoffe ermittelt; diese sind in Zahlentafel 24 zusammengestellt:

¹ Rietschel: Entwurf von Lüftungs- und Heizungsanlagen.

Zahlentafel 24. Wärmedurchlässigkeitswerte für Luft an Luft bei verschiedenen Baustoffen.

I. Außenwände.

Volles Ziegelmauerwerk ohne Putz	Stärke in m κ	0,12	0,25	0,38	0,51	0,64	0,77	0,90	1,03	1,16	1,29
		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 κ	0,12	0,25	0,38	0,51	0,64	0,77	0,90	1,03	1,16	1,29
		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 κ	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20
		2,20	1,90	1,70	1,55	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,95
Kalksteinmauerwerk	Stärke in m κ	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20
		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 κ	0,24	0,37	0,50	0,63	0,76	0,89	1,02	—	—	—
		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: κ = 1,9; doppelt: κ = 1,2; doppelt mit Luftschicht: κ = 0,92.

II. Innenwände.

Volles Ziegelmauerwerk ohne Putz	Stärke in m κ	0,12	0,25	0,38	0,51	0,64	0,77
		2,20	1,60	1,20	1,00	0,90	0,70
Rabitzwand	Stärke in m κ	0,04	0,06	0,08	0,10	—	—
		3,10	2,80	2,50	2,30	—	—
Gipsdielen	Stärke in m κ	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	—
		3,20	3,01	2,90	2,80	2,64	—

Holz wand aus 0,25 bis 0,30 m starken Brettern; einfach: κ = 1,9; doppelt: κ = 1,2; doppelt mit Luftschicht: κ = 0,92.

III. Fußböden, Decken, Fenster, Türen usw.

a) Fußböden und Decken:

Balkenlage mit einfacher Dielung	κ = 1,60
„ unten verschalt, kalte Luft unten	κ = 0,24
„ „ „ „ oben	κ = 0,48
Ziegelgewölbe mit Lager- kalte Luft unten	κ = 0,35
hölzern und Holzdielung } „ „ oben	κ = 0,70
Gewölbe mit massivem Fußboden	κ = 1,00
Einfache Tannenholzdielung als Decke	κ = 0,32
„ „ „ Fußboden	κ = 0,47
Massive Fußböden über Erdreich	κ = 1,40

b) Dächer:

Ziegeldach ohne Schalung	κ = 4,80
Wellblech auf „	κ = 6,00
„ ohne „	κ = 9,00
Teerpappe, Zink oder Schiefer auf Schalung	κ = 2,15

c) Fenster und Türen:

Einfaches Fenster	κ = 5,30
Doppelfenster	κ = 2,24
Einfaches Oberlicht	κ = 5,64
Doppeltes „	κ = 2,35

Fortsetzung der Zahlentafel 24 s. S. 350.

Zahlentafel 24 (Fortsetzung von S. 349).

		Dicke des Holzes in m . . .					
		0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	
Fichtenholztür	innen	κ	2,12	1,73	1,46	1,26	1,11
	außen		2,25	1,80	1,52	1,31	1,15
Eichenholztür	innen	κ	2,84	2,51	2,25	2,03	1,90
	außen		3,10	2,70	2,40	2,15	1,94

Eisentore mit Ölfarbenanstrich $\kappa = 4,00$.

Zu dem mit diesen Werten für κ berechneten W_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 vH, für alle dem Windanfalle besonders ausgesetzten Flächen 10 vH.

Wird für die Rechnung der heißeste Sommertag angenommen, so sind die Zuschläge nicht zu berücksichtigen.

Die durch besondere Mittel fortzuschaffende Wärmemenge beträgt nunmehr mit praktisch genügender Genauigkeit:

$$W_{Ab} = W_{a, Trf} - (W + W_v)$$

$$= W_{a, Trf} - \left[\frac{0,307 \cdot V}{1 + \alpha \cdot t_a} + \sum \kappa \cdot F \right] (t_i - t_a) \text{ WE/Std.} \quad (143)$$

und die hierzu erforderliche Luftmenge von der Temperatur t_a °C:

$$Q_{Ab} = \frac{W_{Ab} (1 + \alpha \cdot t_a)}{0,307 (t_i - t_a)} \text{ m}^3/\text{Std.} \quad (144)$$

Zur Erleichterung der rechnerischen Untersuchungen sind die Werte für $1 + \alpha \cdot t$ und $\frac{1}{1 + \alpha \cdot t}$ bei verschiedenen Temperaturen in Zahlentafel 25 zusammengestellt.

Zahlentafel 25.

Temperatur t in °C	$1 + \alpha \cdot t$	$\frac{1}{1 + \alpha \cdot t}$	Temperatur t in °C	$1 + \alpha \cdot t$	$\frac{1}{1 + \alpha \cdot t}$
- 15	0,945	1,058	+ 20	1,073	0,932
- 10	0,963	1,038	+ 25	1,092	0,916
- 5	0,982	1,019	+ 30	1,110	0,901
± 0	1,000	1,000	+ 35	1,128	0,886
+ 5	1,018	0,982	+ 40	1,147	0,872
+ 10	1,037	0,965	+ 45	1,165	0,858
+ 15	1,055	0,948	+ 50	1,183	0,845

b) Die Raumtemperatur. Bevor die Mittel zur Erörterung kommen, die für die besondere Wärmebeseitigung angewendet werden, muß zunächst feststehen, welche Raumtemperatur bei einer bestimmten ungünstigsten Außentemperatur zugelassen werden darf, um die Transformator-Bauvorschriften zu erfüllen — immer Vollbelastung des Transformators vorausgesetzt.

Die Entscheidung dieser Frage hängt wesentlich von der Gegend ab, in der das Transformatorwerk angelegt werden soll. Im offenen, den Winden frei ausgesetzten Gelände, an Wasserläufen, in der Nähe von Wasserkraftwerken, auf Höhen und an ähnlichen Geländepunkten wird die höchste Sommertemperatur tiefer liegen als im geschlossenen Talkessel, innerhalb der Stadt mit hohen einengenden Gebäuden, unter-

halb einer der Sonnenbestrahlung unmittelbar ausgesetzten Straßenoberfläche u. dgl. Weiter spielt die Lage der Transformator-kammern zur Himmelsrichtung eine nicht zu unterschätzende Rolle. Auf der Südseite besonders kann die Sonnenbestrahlung die Kammerwände bzw. Kammertüren auf Höchsttemperaturen bringen. Sind eiserne Kammertore vorhanden, so strahlen diese unter Umständen in den Raum noch eine zusätzliche Wärmemenge aus. In solchen und ähnlichen Fällen ist Beschattung der entsprechenden Gebäudeteile empfehlenswert. Alles dieses ist, so nebensächlich es zumeist angesehen wird, doch beachtlich. Man sollte daher tunlichst schon bei der Entwurfsbearbeitung Unterlagen auch nach dieser Richtung sammeln und Erkundigungen einziehen, um späteren Überraschungen vorzubeugen, die zu beheben dann oft Schwierigkeiten bereitet und Geld kostet.

Die Raumtemperatur muß bei belastetem Transformator naturgemäß über der Außentemperatur liegen. Es handelt sich also darum, die Außentemperatur und die zulässige Innentemperatur festzulegen.

Für die Außentemperatur kann man in Deutschland im allgemeinen mit etwa $+35^{\circ}\text{C}$ rechnen. Höhere Temperaturen kommen nur selten vor, sind vor allen Dingen nicht von längerer Dauer. Im ungünstigsten Falle, sofern das Transformatorenwerk nicht frei im Gelände liegt, wird man auch mit $+40^{\circ}\text{C}$ zu rechnen haben. In tropischen Gegenden ist t_a entsprechend höher anzusetzen. Der VDE gibt in den RET 1929 an, daß die Temperatur des Kühlmittels $+35^{\circ}\text{C}$ nicht überschreiten soll. Jedenfalls gilt diese Temperatur für die Erwärmungsberechnung der Transformatoren.

Die Innentemperatur wird vorsichtshalber etwa 5 bis 10°C höher angesetzt, so daß also $t_i + 45$ bis $+50^{\circ}\text{C}$ beträgt. Es ist aber stets zu prüfen, ob diese Übertemperatur zu erwarten ist. Die höhere Temperaturgrenze wird zuzulassen sein, wenn erfahrungsgemäß die Hochsommertemperatur von etwa $+30$ bis $+35^{\circ}\text{C}$ nicht längere Zeit andauert, oder den heißen Tagen kühle Nächte folgen, in denen das Mauerwerk die in sich aufgespeicherte Wärmemenge zum Teil wieder abgeben kann. Die untere Grenze ist in heißeren Gegenden und bei unmittelbarer Sonnenbestrahlung zu wählen. Besonders ängstlich soll bei dieser Temperaturfestsetzung aber nicht verfahren werden, um nicht gezwungen zu sein, größere und damit teure Transformatoren aufzustellen.

Vereinzelt findet man Forderungen etwa dergestalt, daß die Temperatur im Transformatorraume bei Vollbelastung des Transformators im Beharrungszustande eine Höhe von $+35^{\circ}\text{C}$ nicht überschreiten darf. Einer solchen Forderung kann nur bedingt entsprochen werden. Insbesondere ist bei der Gesamtentwurfsaufstellung dann Vorsicht geboten, wenn im Sommer höhere Temperaturen als $+35^{\circ}\text{C}$ möglich sind, und der Transformator auch an solchen Tagen längere Zeit unter Vollast steht. Es ist dann auf das über die Lage im allgemeinen Gesagte zu achten. Übersteigt die Außentemperatur die geforderte Grenzinnentemperatur, so ist mit den in diesem Abschnitt behandelten Lüftungs-

einrichtungen nicht mehr auszukommen. Es wird vielmehr neben der besonderen Raumbelüftung noch eine Fremdbelüftung des Transformators selbst notwendig werden, doch kann die Rechnung unter Umständen auch die praktische Unmöglichkeit der Erfüllung einer solchen Forderung ergeben.

Für die Mehrzahl deutscher Fälle wird man mit genügender Sicherheit damit auskommen, $t_a = 35^{\circ}$ und $t_i = 45^{\circ}$, also die Übertemperatur in der Transformatorraumkammer $t_i - t_a = 10^{\circ}$ C anzunehmen. Mit diesen Werten vereinfacht sich die Gl. (143) in:

$$W_{Ab} = W_{a,Trf} - 10 [0,272 V - \sum \kappa \cdot F] \text{ WE/Std.} \quad (145)$$

und die Gl. (144) für die Luftmenge:

$$Q_{Ab} = 0,38 W_{Ab} \text{ m}^3/\text{Std.} \quad (146)$$

Für überschlägliche Rechnungen kann man annehmen, daß für 1 kW Verlust im Kupfer und Eisen eine stündlicher Luftwechsel von etwa 240 bis 300 m³ erforderlich ist, also:

$$Q'_{Ab} \simeq 240 \text{ bis } 300 (V_{Cu} + V_{Fe}) \text{ m}^3/\text{Std.} \quad (147a)$$

oder

$$0,067 \text{ bis } 0,082 (V_{Cu} + V_{Fe}) \text{ m}^3/\text{sec.} \quad (147b)$$

c) Die natürliche Wärmebeseitigung. Für die überschüssige, durch die Zuführung von Frischluft besonders zu beseitigende Wärmemenge W_{Ab} gilt zunächst ganz allgemein, daß die Frischluft frei sein muß von chemischen Beimengungen und Staub (chemische Fabriken, Zementwerke). Ist dieses in der Umgebung der Transformatorenanlage nicht gewährleistet, so darf die hier behandelte Form der Belüftung nur mit besonderer Vorsicht (Luftfilterung) angewendet werden. Dann ist vielmehr eine der bereits besprochenen besonderen Transformator Kühlformen zu wählen. Dieses vorausgesetzt, liegt es zunächst nahe, die Fenster und Türen des Transformatorenraumes zu öffnen. Das ist technisch aber nicht das Mittel, das zu dem notwendigen sicheren Erfolg führt. Wiederum betriebliche Gründe verbieten diese Form der Wärmebeseitigung stets. Werden z. B. die Abschlußstore großer Transformatorraumkammern geöffnet, so besteht die Gefahr der Verstaubung des Innenraumes und der Einbauten, des Betretens durch Kinder, Fremde, mutwillige Beschädigung usw. Sind Fenster geöffnet, so sind Gefährdungen durch Vögel zu erwarten. Windstille oder auch nur schwach entgegenwehender Wind kann die Wirkung vollständig vernichten. Plötzlich einsetzender Regen und Sturm können hier ebenfalls sehr unangenehme Folgen herbeiführen. Zudem kann physikalisch Wärmeabführung nur dadurch herbeigeführt werden, daß der zu lüftende Raum von einem Luftstrom durchzogen wird (künstlicher Zug); Türen und Fenster zu benutzen, bedingt demnach noch entsprechende Gegenöffnungen, um diesen Luftstrom zu erzielen, sofern sie nach Abb. 272 nicht diametral zueinander liegen, was häufig nicht der Fall ist. Bei kleineren Ortstransformatoren für Gemeinden, die fast stets unbewacht sind, verbietet sich das Öffnen

von Türen und Fenstern von selbst. Auch bei diesen wird man — selbst wenn die Rechnung ein anderes Ergebnis hat — eine künstliche Lüftung vorsehen, um dem Raume immer Frischluft zuzuführen. Es sei hierbei kurz erwähnt, daß Belüftungsöffnungen in der Tür, wie man sie häufig findet, dann zwecklos sind, wenn nicht auch Gegenöffnungen nach Abb. 271 eingebaut werden. Man sollte sich daher ganz besonders dann, wenn die Rechnung einen künstlich zu erzeugenden Luftwechsel ergeben hat, und das wird zumeist bei Transformatoren von etwa 1000 kVA aufwärts, sofern sie in Einzelkammern zur Aufstellung kommen, der Fall sein, nicht auf derart untechnische Maßnahmen verlassen, sondern eine richtig entworfene künstliche Belüftung durchführen, zumal sie von vornherein mit dem Bau hergestellt kaum Mehrkosten verursacht.

Als Hauptbedingung gilt hierbei zusammengefaßt, daß der Luftwechsel jederzeit und vor allen Dingen zuverlässig gewährleistet sein muß, und daß man die Belüftung je nach den herrschenden Witterungs- und Temperaturverhältnissen regeln kann.

Abb. 270 zeigt die Druckverhältnisse allgemein 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 also, abgesehen von der Wärmewandlung, eine künstliche Luftbewegung innerhalb des Raumes stattfinden, so ist es notwendig, zwei Öffnungen herzustellen, von denen die am Boden befindliche für den Frischlufteintritt und diejenige unter der Decke oder im Dach für den Austritt der erwärmten Luft dient.

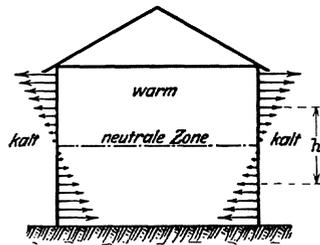


Abb. 270. Luftführung für die Raumlüftung.

Aus Abb. 270 erkennt man ferner, daß es im Raume eine Zone gibt, in welcher auf natürliche Weise weder Frischluft ein- noch warme Luft austritt. Man nennt diese die neutrale Zone. Um daher festzustellen, an welchen Stellen besondere 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 neutralen Zone wird nicht in der Mitte der Transformator-kammer liegen, weil besonders bei großen Anlagen die Höhe des Transformators zur Raumhöhe zu berücksichtigen ist. Man kann aber mit hinreichender Genauigkeit annehmen, daß sie in etwa $\frac{2}{3}$ bis $\frac{3}{4}$ der Kammerhöhe liegt (Abb. 275). Bei besonders beschränkten Verhältnissen z. B. bei Anlagen in Gruben, unter Straßenoberfläche u. dgl. wird eine neutrale Zone unter Umständen überhaupt nicht bestehen.

In Abb. 271 bis 274 sind nun verschiedene Lüftungsanordnungen in ihrer grundsätzlichen Gestaltung und Wirkung gezeichnet. Die

zur Lüftung erforderlichen Öffnungen sind stets so anzulegen, daß der Frischluftstrom den ganzen Raum und zwar soviel wie möglich in diagonaler Richtung durchstreicht. Sofern die Bauverhältnisse dieses zulassen, sollten je nach der Windrichtung verschließbare Klappen k_1, k_2 bzw. k_3, k_4 nach Abb. 271 und 272 vorhanden sein, um die Lüftung noch besser in der Hand zu haben. Verfehlt wäre es, eine Luftbewegung nur durch wagerecht oder senkrecht zueinander liegende Öffnungen bewirken zu wollen, weil dann nach Abb. 273 und 274 der Frischluftstrom durch den Raum ziehen

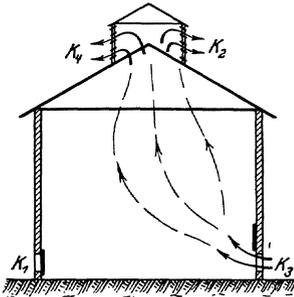


Abb. 271.

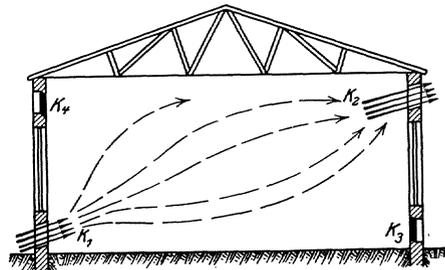


Abb. 272.

Richtige Lüftung.

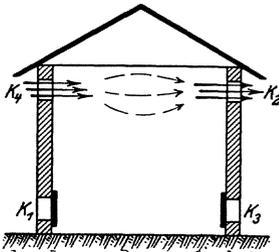


Abb. 273.

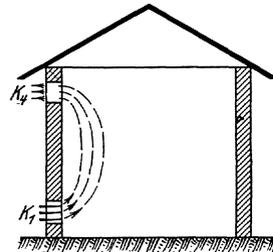


Abb. 274.

Falsche Lüftung.

Abb. 271 bis 274. Luftführungen für die Raumlüftung.

würde, ohne auch den Transformator allseitig genügend zu bestreichen und die um diesen gelagerte warme Luft zu zerstreuen. Letzteres ist aber eine weitere Hauptbedingung für eine gute Wärmeabführung.

Wenn bei kleineren Anlagen — und auch diese sollten, wie bereits erwähnt, stets hinsichtlich richtiger Belüftung untersucht werden — einerseits und großen Hallenbauten nach Abb. 272 andererseits die Maueröffnungen verhältnismäßig leicht herstellbar sind, ist das bei Transformatorwerken nach der Kammerbauform in dieser einfachen Form oft nicht mehr möglich. Man muß dann die Transformatoren auf ein besonderes, höher gezogenes Fundament setzen (Abb. 275), in letzterem Kanäle für den Frischluftzutritt anlegen und den Luftwechsel senkrecht durch den Raum mittels schornsteinartiger Aufbauten oder durch Dachreiter herbeiführen. In Abb. 277 und 279 sind solche grundsätzliche,

heute vielfach anzutreffende Ausführungen gezeichnet. Auf S. 361 wird über die technische Durchbildung und die dabei zu beachtenden Gesichtspunkte weiteres angegeben werden.

Für die Berechnung der Ein- und Austrittsöffnungen gilt folgendes. Die Frischluft tritt mit der Temperatur t_a^0 in den Raum ein und die erwärmte Luft muß ihn mit der Temperatur t_i^0 verlassen. Die Luftbewegung entsteht durch den Gewichtsunterschied gleich großer Luftsäulen außen und innen von einer bestimmten Höhe h in m, die nach Abb. 275 praktisch genügend genau gegeben ist von der Mitte der Eintrittsöffnung bis zur Mitte der Austrittsöffnung. Dieser Gewichtsunterschied ist:

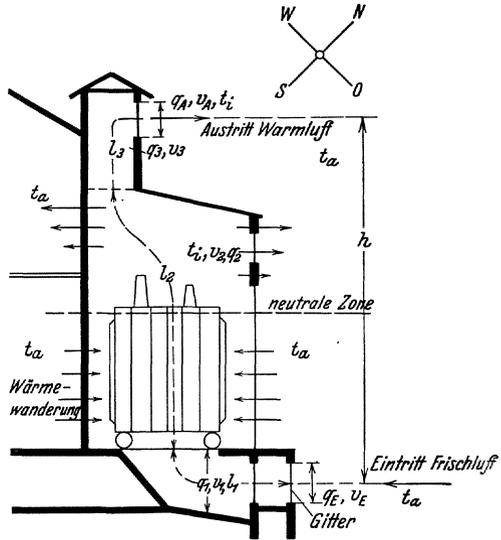


Abb. 275. Schaubild für die Belüftungsberechnung.

$$G_{ta} - G_{ti} = h \left(\frac{1}{1 + \alpha \cdot t_a} - \frac{1}{1 + \alpha \cdot t_i} \right) \text{ in m Luftsäule von } 0^\circ \text{C.} \quad (148)$$

Die dieser Luftsäule erteilte Geschwindigkeit beträgt:

$$v = \sqrt{2 g \cdot h} \text{ m/sec,} \quad (149)$$

$g = 9,81$. Beschleunigung durch die Erdschwere.

Bei der Temperatur t_a^0 wird dann:

$$\frac{v^2}{2 g (1 + \alpha \cdot t_a)} = h \left(\frac{1}{1 + \alpha \cdot t_a} - \frac{1}{1 + \alpha \cdot t_i} \right). \quad (150)$$

Die Gl. (150) zeigt die Beziehung zwischen der Höhe h und der durch sie bei dem Temperaturunterschiede $t_i - t_a$ zu erreichenden Luftgeschwindigkeit v . Diese Geschwindigkeit multipliziert mit dem Eintrittsquerschnitt q_E muß nun diejenige Luftmenge Q_{Ab} ergeben, welche für die Wärmebeseitigung erforderlich ist. Wird v zu groß, worüber weiter unten besondere Angaben gemacht werden, so ist h oder q_E zu ändern. Es muß also sein:

$$Q_{Ab} = 3600 \cdot v \cdot q_E. \quad (151)$$

Für überschlägliche Prüfungen sind in Abb. 276 Kennlinien für die stündliche Luftmenge Q_{Ab} in Abhängigkeit vom Eintrittsquerschnitt q_E in m^2 bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten v gezeichnet.

Der durchströmenden Luft setzen sich nun Bewegungswiderstände entgegen durch:

- a) Reibung an den Wandungen von Mauern, Kanälen, Rohrleitungen und ähnlichen Anlagenteilen,
 b) Richtungs- und Querschnittsänderungen infolge eingebauter Rosten, Schutzgitter, Umlenkungen, Stabverschlüssen und ähnlichem.

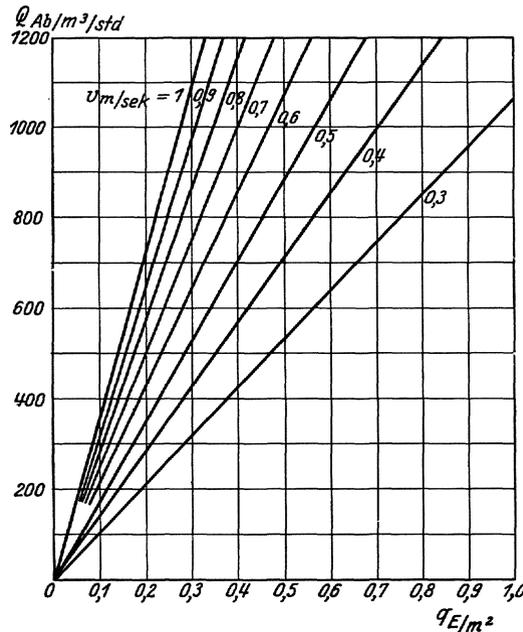


Abb. 276. Stündlicher Luftdurchgang Q_{Ab}/m^3 in Abhängigkeit vom Kanalquerschnitt q_E/m^2 bei verschiedener Luftgeschwindigkeit v_m/sec .

Je nach der Ausgestaltung der Belüftung werden diese Widerstände zu berücksichtigen sein, so für aufgesetzte Belüftungsschote mit Stabverschlüssen, längere Zuführungskanäle, den Lufteintrittsöffnungen vorgesetzte Gitter u. dgl. Es sollen daher der Vollständigkeit wegen hier auch alle diese Widerstände behandelt und rechnerisch erfaßt werden. Diese Widerstandsgröße wird wiederum durch eine Luftsäule ausgedrückt von derjenigen Höhe h_v , um welche sich der Druck auf die Grundfläche vermindert.

Es ist für jede Kanalstrecke¹ allgemein:

$$h_{vz} = \frac{v_x^2}{2 \cdot g \cdot (1 + \alpha \cdot t_x)} (R_x + \sum \zeta_x) \quad (152)$$

oder wenn der Kanal ins Freie mündet:

$$h'_{vz} = \frac{v_x^2}{2 \cdot g \cdot (1 + \alpha \cdot t_x)} (1 + R_x + \sum \zeta_x), \quad (153)$$

¹ Die Ableitung der Gleichung siehe Rietschel: a. a. O.

worin:

- t_x^0 die Temperatur in den einzelnen Teilstrecken in °C,
- v_x in m/sec die Luftgeschwindigkeit in den einzelnen Teilstrecken,
- R_x die Reibungswiderstände in den einzelnen Kanälen,
- ζ_x die einmaligen Widerstände

bezeichnet. Es muß nunmehr sein:

$$\sum \frac{v_x^2}{2g(1 + \alpha \cdot t_x)} (1 + R_x + \sum \zeta_x) = h \left[\frac{1}{1 + \alpha \cdot t_a} - \frac{1}{1 + \alpha \cdot t_i} \right]. \quad (154)$$

Da in der Mehrzahl der hier zu behandelnden Fälle der Austritt der erwärmten Luft ins Freie erfolgt, gilt Gl. (153) mit genügender Genauigkeit auch dann, wenn die Austrittsöffnungen in große Hallen, also etwa in die eigentliche Schalthalle münden. Abb. 275 läßt im einzelnen erkennen, welche Teilabschnitte für die Berechnung der Widerstände in Frage kommen, wobei auch die Transformatorkammer selbst als Kanalstrecke aufzufassen ist.

Der Reibungswiderstand R ist für einen rechteckigen Kanalquerschnitt:

$$R_{\square} = \frac{\varrho \cdot l \cdot u}{q}, \quad (155)$$

für einen runden oder quadratischen Querschnitt:

$$R_{\circ, \square} = \frac{4 \varrho \cdot l}{d} \quad (156)$$

in m Luftsäule, worin:

- ϱ eine Erfahrungsziffer (Reibung)
 - l die Gesamtlänge in m
 - u den Umfang in m
 - q den Querschnitt in m²
 - d den Durchmesser oder die Seite in m
- } des Kanals

bezeichnet.

Nach Versuchen von Rietschel kann ϱ für Kanäle bis herab zu 48 cm gefunden werden aus der Gl. (157):

$$\varrho = 0,0065 + \frac{0,0604}{u - 48}, \quad (157)$$

worin u in cm einzusetzen ist. In Zahlentafel 26 sind einige Werte für ϱ für gemauerte Kanäle angegeben:

Zahlentafel 26.

$u =$	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 $\sum \zeta_n$ 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, Gittern 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°	$\zeta = 0,3$
für eine allmählich verlaufende Richtungsänderung	$\zeta = 0$
für Gitter je nach der Maschenweite	$\zeta = 0,4$ bis $0,6$
für geöffnete Schieber und Klappen, sofern der Rahmen mit dem Mauerwerke bündig liegt	$\zeta = 0,3$
für Querschnittsänderungen bei allmählichem Übergange	$\zeta = 0$
für plötzliche Querschnittsänderungen (Übergang v_1, q_1 in v_2, q_2): $\zeta = \left(\frac{q_1}{q_2} - 1\right)^2$.	

Selbst die einfache Gestaltung einer Belüftung bedingt schon eine rechnerische Einzelermittlung der Widerstände, die sich dem Luftstrom entgegensetzen, um die gestellte Aufgabe voll zu lösen. In größeren Transformatorenwerken werden die Ein- und Austrittsanlagen noch mehr die Gestalt besonderer Kanalanlagen annehmen (Abb. 279). Dann könnte die gewünschte Wirkung nicht oder nur zum Teil erreicht werden, wenn nicht rechnerisch jede Einzelheit geprüft und die gesamte Kanalanlage entsprechend gebaut wird. Ganz besonders ist dabei auch auf zukünftige Erweiterungen Rücksicht zu nehmen, die, wie bereits gesagt, hier häufig darin bestehen, daß in vorhandenen Transformatorkammern später größere Transformatoren untergebracht werden sollen. Also heißt es noch vor Beginn eines Baues vorsichtig sein, sollen nicht nach kurzer Betriebszeit kostspielige Änderungen, sofern sie überhaupt noch ausführbar sind, nötig, oder die Belastungsfähigkeit eines Transformators beschränkt oder zusätzliche Mittel wie Anblasen u. dgl. angewendet werden müssen.

Da den einzelnen Rechnungswerten begrifflicherweise Ungenauigkeiten anhaften, genügt es, die Geschwindigkeiten v_x in den einzelnen Kanalstrecken gleich zu setzen und nur mit der Außentemperatur t_a zu rechnen. Diese vereinfachte Rechnung gibt immer noch praktisch genügend genaue Werte. Die Gl. (154) erhält dann die Form:

$$\frac{v^2}{2 \cdot g(1 + \alpha \cdot t_a)} (1 + \sum R_x + \sum \zeta_x) = h \left(\frac{1}{1 + \alpha \cdot t_a} - \frac{1}{1 + \alpha \cdot t_i} \right). \quad (158)$$

Daraus folgt die Luftgeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h (1 + \alpha \cdot t_a)}{1 + \sum R_x + \sum \zeta_x} \cdot \left(\frac{1}{1 + \alpha \cdot t_a} - \frac{1}{1 + \alpha \cdot t_i} \right)} \quad (159)$$

und mit der Annahme $t_a = +35^\circ \text{C}$, $t_i = +45^\circ \text{C}$ wird:

$$v = 0,79 \sqrt{\frac{h}{1 + \sum R_x + \sum \zeta_x}} \quad (160)$$

für die Mündung der Abluft ins Freie.

Die Luftgeschwindigkeit ist tunlichst gering zu wählen, denn größere Luftgeschwindigkeit hat unangenehme Zuglufterscheinung zur Folge und verursacht weiter Mitreißen von Staub, Blättern,

Stroh, Heu u. dgl., die sich in oder vor den Lufteintrittsöffnungen befinden können. Man geht erfahrungsgemäß mit v nicht über etwa 0,5 bis höchstens 0,8 m/sec im eigentlichen Transformatorraum. Da aber der Rechnung die vereinfachte Gl. (160) bzw. (153) zugrunde gelegt werden kann und v für den Eintrittsquerschnitt gelten soll, sich somit in der Transformatorraum fast bis auf Null ermäßigt, kann für $v = 1,0$ bis etwa 1,5 m/sec gesetzt werden. Selbst für längere Kanäle, wie sie in Transformatorenanlagen auch vorkommen, sollten diese Grenzwerte ebenfalls nicht überschritten werden. Die Widerstandsverluste wachsen außerdem mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Ist der Querschnitt der Ein- bzw. Austrittsöffnungen aus baulichen Gründen nicht herstellbar, dann ist letzten Endes h zu vergrößern, doch spielt hierbei auch das architektonische Bild des Transformatorenwerkes eine Rolle, denn schlotartige Aufsätze können sehr unschön wirken. Über $v = 1,5$ m/sec an der Eintrittsstelle sollte man auf Grund praktischer Erfahrungen aber nicht gehen.

Sind v und h unter Umständen durch mehrmalige Proberechnungen ermittelt, so ist nach Gl. (151) der Querschnitt der Eintrittsöffnungen q_E festzustellen. Handelt es sich um eine Belüftungsanlage nach Abb. 277, dann muß der Eintrittsquerschnitt an der Stelle a vorhanden sein. Diese vorgelagerten Einströmstellen sind entsprechend zu vergrößern, wenn sie gegen das Eindringen von Fremdkörpern mit Schutzgittern versehen werden. Je nach der Ausführung eines solchen Gitters eng- oder weitmaschig, bündig mit dem Mauerwerke, oder im breiten Rahmen ist ein Zuschlag zu q_E zu machen, der unter Umständen bis zu 50 vH betragen kann. Wird hierauf nicht genügend geachtet, kann die errechnete Luftmenge nicht einströmen.

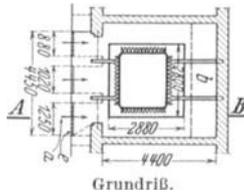
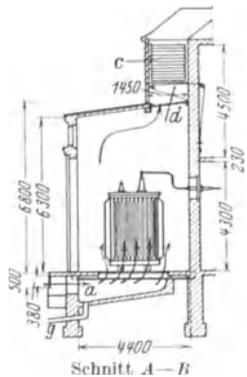
Für den Querschnitt der Austrittsöffnung und für denjenigen eines aufgesetzten Schlotes gilt dann weiter:

$$q_A = q_E \frac{1 + \alpha \cdot t_i}{1 + \alpha \cdot t_a}. \quad (161)$$

Da die Austrittsöffnungen mit Rücksicht auf das Eindringen von Regen und Schnee nicht wie Fabrikschlote offen ins Freie münden dürfen, sondern Stabverschlüsse erhalten müssen, worauf weiter unten noch besonders eingegangen werden wird, ist bei der Berechnung von q_A ebenfalls besonders sorgfältig zu verfahren und rechnerisch festzustellen, welchen freien Querschnitt der Stabverschluß an sich überhaupt gewährt.

d) Die Bauausführung der Lüftungsanlage. Für diese sind ganz bestimmte Regeln zu beachten. Längere Kanäle für die Zuführung der Frischluft kommen selbst in großen Transformatorenanlagen selten vor. Müssen sie aus baulichen Gründen doch angelegt werden, etwa dann, wenn für die Einnahmestelle der Frischluft z. B. mit Rücksicht auf die Staubverhältnisse vorüberführender Straßen Schwierigkeiten bestehen, so sind sie sauber auszuputzen, am zweckmäßigsten mit glasiertem Material oder einfacher mit sauberem Glatzstrich auszukleiden, 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 die Verlustminderung der glatten Wandbekleidungen zum Teil aufzuheben. Richtungsänderungen, die als wesentliche Widerstände gegen die Luftbewegung anzusehen sind, werden selbst wenn man den Transformator nach Abb. 277 über dem Eintrittskanale aufstellen kann, nicht zu vermeiden sein. Solche Richtungsänderungen sollen dann sanft und im Bogen mit möglichst großem Radius angelegt werden. Jede scharfeckige oder plötzliche Rich-



- a* Frischluftzuführung,
- b* Ölgrube,
- c* Warmluftabführung,
- d* Abschlußklappe mit Betätigung außerhalb der Transformator-kammer,
- e* Gitterschluß,
- g* Ölabfluß aus der Transformator-Ölgrube,
- h* Schutz- und Besichtigungsbühne.

Abb. 277. Transformator-kammer. Belüftung mit Frischluft-zuführung durch die Transformator-Ölgrube.

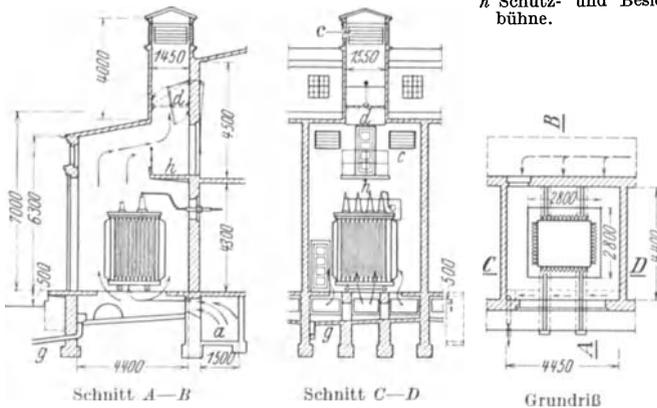


Abb. 278. Transformator-kammer-Belüftung aus einem besonderen Luftzuführungs-kanal, Abgabe der Warmluft in die Schaltanlage, Schutz- und Besichtigungsbühne unterhalb des Entlüftungsturmes.

tungsänderung ist ganz zu vermeiden. Ebenso wie die Richtungsänderungen sind alle Querschnittsverengungen oder -erweiterungen allmählich vorzunehmen, um Stoßverluste und Wirbelbildungen der Luft zu verhindern. Das gleiche gilt selbstverständlich auch für den Abluftkanal.

Der Eintritt der Frischluft soll mit einem Sammelsumpf versehen sein, in welchem sich Blätter, Reisig u. dgl. absetzen können. Ferner soll jeder Kanal, wenn irgend möglich, begehbar oder beschlupfbar oder, wenn dies infolge der Abmessungen nicht erreichbar ist, wenigstens leicht zugänglich sein, um ihn bequem reinigen zu können.

Bei der Anlage von Schloten und Dachreitern für Transformator-kammern nach Abb. 278 bzw. für Hallen allgemeiner Art ist darauf

richtungen besser berücksichtigen zu können. Werden die einzelnen Kammern mit Schloten und stabverschlossenen Austrittsöffnungen versehen, so sind Wasserrinnen innerhalb des Schlotes unter jeder Austrittsöffnung vorzusehen, die nach außen entwässern, denn feiner Sprühregen, Nebel und besonders Schnee bei heftigem Schneetreiben dringt immer durch die geöffneten Stabverschlüsse und muß, wie bereits gesagt, unter allen Umständen aufgefangen werden. Schutzplatten ähnlich Abb. 278 sollten tunlichst nicht eingebaut werden. Sie stellen — wenn nicht durch die Besichtigungsbühne an sich gegeben — meistens einen Notbehelf für unsachgemäße Lösung der Gesamtfrage dar. Bei schlechtem Wetter Übelstände dieser Art durch das Schließen der eingebauten Klappen verhindern zu wollen, ist dann nicht angängig, wenn auch bei geringeren Außentemperaturen als z. B. $+ 35^{\circ} \text{C}$ eine Belüftung der Transformator-kammer notwendig ist. Die Rechnung gibt hierüber klaren Aufschluß.

Die Transformatorenabluft zum Heizen benachbarter Schalt-räume zu benutzen, ist verschiedentlich versucht worden (Abb. 279), doch ist das erzielte Ergebnis zumeist nicht befriedigend. Rechnerisch läßt sich dieses nach dem bisher Gesagten verfolgen. Besonders zu berücksichtigen sind dann die Verluste an Wärmemenge durch Wärmewanderung und die Führung der Warmluft durch die Schalträume. Handelt es sich um größere Räume und ein oder mehrere Stockwerke, so kann von vorn-herin in der Mehrzahl aller Fälle gesagt werden, daß ein gutes Ergebnis mit einer solchen Raumheizung nicht zu erwarten ist. In Hallen-anlagen wird man bei großen Transformatorenleistungen, also großen Wärmemengen, eine Prüfung dieser Frage eher mit Aussicht auf Erfolg durchführen können. Die dann vorzusehenden Eintrittsöffnungen an den Transformator-kammern sind wiederum mit sicher schließenden Klappen zu versehen, um bei einem Ölbrände die Verqualmungsgefahr zu beseitigen und im Winter bei ausgeschaltetem Transformator durch Abziehen der Raumwärme keine gegenteilige Wirkung herbeizuführen.

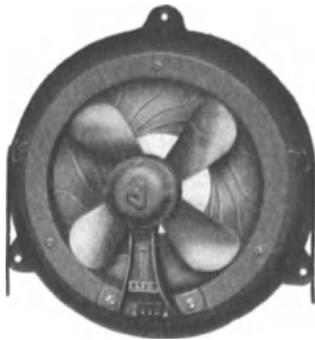


Abb. 280. Lüfter mit Drehstrommotor zum Einbau in eine Außenwand mit verstellbarem Irisverschluß.

e) Die zusätzliche Wärmebeseitigung durch Lüfter. Kann der erforderliche Luftwechsel durch die bisher behandelte Form nicht mehr mit voller Zuverlässigkeit erreicht werden, weil entweder die Abmessungen für die Maueröffnungen oder die Dachreiter zu groß werden, oder will man die Belüftungsvorrichtung von allen Witterungsverhältnissen unabhängig machen, sie also vollständig beherrschen, dann muß der Luftwechsel mittels besonderer Lüfter hervorgerufen werden. Diese Form

der Belüftung besteht demnach ihrem besonderen Merkmale nach darin, daß der Luftwechsel besonders erzwungen wird.

Die Lüfter müssen in ihrem konstruktiven Aufbau als bekannt

vorausgesetzt werden. Abb. 280 zeigt einen solchen Wandlüfter mit Verschuß.

Je nach der Ausführung der Schaufeln können die Lüfter als Druck- oder Sauglüfter arbeiten, und zwar soll dieses vom Betriebsraume aus betrachtet so verstanden werden, daß ein Drucklüfter Frischluft in den Raum fördert, während ein Sauglüfter die erwärmte Luft aus letzterem entfernt. (Überdruck bzw. Unterdruck im Raume.) Ob beide Arten von Lüftern gleichzeitig angewendet werden müssen, oder ob man nur mit einem Saug- bzw. Drucklüfter auskommt, muß die Rechnung ergeben aus den Querschnitten für die Ein- und Austrittsöffnungen unter Zugrundelegung einer bestimmten Luftgeschwindigkeit, oder aus den Abmessungen der Lüfter selbst, bei denen natürlich eine Unterteilung der zu fördernden Luftmenge auf mehrere Lüfter bei größeren Anlagen leicht erklärliche Vorteile bietet.

Es empfiehlt sich im allgemeinen, Sauglüfter zu verwenden, weil sie in ihrem zweckentsprechenden Arbeiten weniger von den Witterungsverhältnissen abhängig sind. Bei der rechnerischen Untersuchung ist dann gegebenenfalls der Wärmeverlust

durch Wärmewanderung nicht zu berücksichtigen. Drucklüfter müssen fast immer bei Regen und Schnee außer Betrieb gesetzt werden. Bei starker Staubentwicklung in der Umgebung des Transformatorenhauses sind sie ebenfalls unbrauchbar, weil sie, wenn die Luft nicht vorher durch Filter gereinigt wird, die unreine Luft in den Raum fördern und

eine Verschmutzung herbeiführen. Andererseits ist aber auch die Ansicht berechtigt, daß der Drucklüfter die Wärmebeseitigung durch die Wärmewanderung begünstigt dadurch, daß er einen gewissen Überdruck im Betriebsraume erzeugt. Alles dieses muß bei der Wahl der Lüfter beachtet werden.

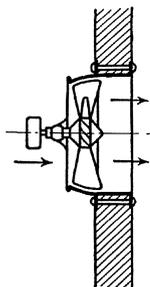


Abb. 282. Sauglüfter an einer senkrechten Wand.

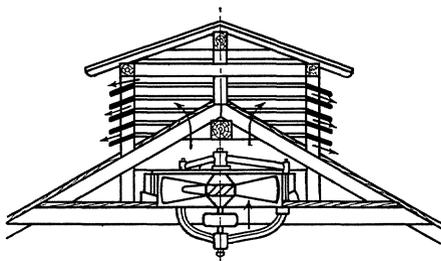


Abb. 281. Sauglüfter in einem Dachreiter.

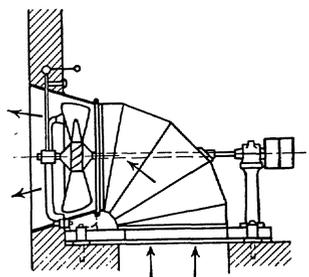


Abb. 283. Sauglüfter mit Rohranschluß.

Der Einbau der Lüfter (Abb. 281 bis 283) hat nach den gleichen Gesichtspunkten zu erfolgen, wie diese für das Anlegen von Maueröffnungen bereits erörtert worden sind. Werden nur Druck- oder nur Sauglüfter eingebaut, so ist nicht zu vergessen, daß auch die zweiten Öffnungen mit entsprechendem Querschnitte vorhanden sein müssen, denn andernfalls 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. Der Nachteil der geöffneten Fenster an sich ist bereits erörtert worden.

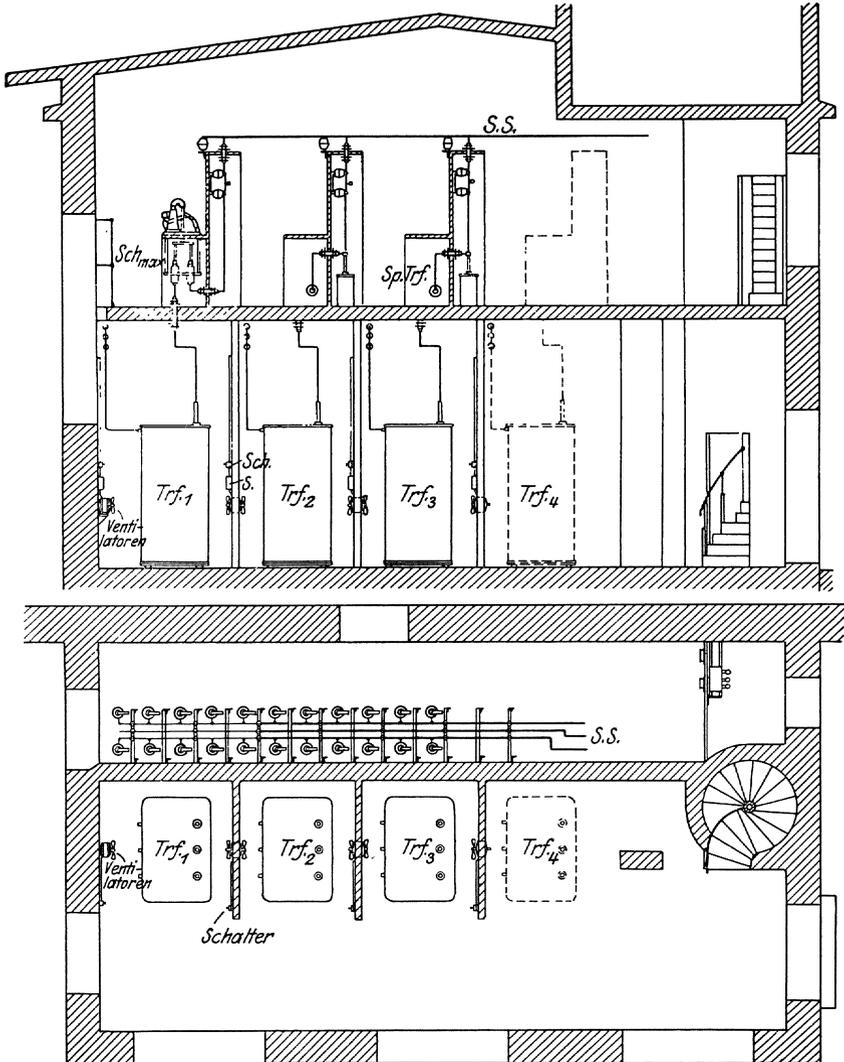


Abb. 284. Belüftung von Öltransformatoren durch Schraubenlüfter in jeder Transformatorzelle.

Eine auch heute noch nicht uninteressante Zusatzbelüftung durch besondere Lüfter zeigt Abb. 284, die vor Jahren von der Maschinenfabrik Oerlikon angewendet wurde. Sie ist beachtlich, wenn ältere Transformatoren durch verstärkte Luftbewegung, also Abführung der

Raumwärmemenge, vorübergehend höher belastet werden sollen. Auch für besonders schwierige Transformatoreinbauten z. B. unter Tage, kann diese Zusatzbelüftung Anwendung finden. Es werden zwischen die einzelnen Transformatoren kleine Schraubenlüfter eingebaut, die mit jedem Transformator derart zusammengeschaltet sind, daß sie von selbst anlaufen, wenn derselbe auf Spannung kommt. Die die Kesselwandungen umgebende Luft wird durch den Lüfter über die gewöhnliche Luftbewegung dauernd in eine zusätzlich erzwungene Bewegung versetzt und infolgedessen wesentlich stärker zerstreut. Die Zellenwände beeinträchtigen die freie Luftbewegung um den Transformator bedeutend. Die Lüfter haben angebaute Drehstrom-Kurzschlußankermotoren und je einen Schalter, der geschlossen ist, und nur dazu dient, den Lüfter 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 Lüftermotoren noch brauchbar ist, also im Höchstfalle 500 V; anderenfalls wird die Gesamtanlage, sofern nicht Niederspannung von anderer Stelle vorhanden ist, zu teuer, wenn noch besondere Absatztransformatoren aufzustellen sind. Besondere Meldevorrichtungen müssen vorhanden sein, die anzeigen, wenn ein Lüfter gestört ist.

Als Lüfter für all diese Belüftungszwecke sind, wie schon angedeutet, nur Schraubenlüfter 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 Rohrleitungen angeschlossen werden. Sind solche nicht zu umgehen, so muß deren Querschnitt mindestens gleich oder besser größer als der Flügeldurchmesser des Lüfters sein. Für eine bestimmte zu fördernde Luftmenge Q m³/sec muß dieser Flügeldurchmesser:

$$D = 1,3 \sqrt{\frac{Q}{v}} \text{ m} \quad (162)$$

betragen; wird D zu groß, dann muß eine Unterteilung auf mehrere Lüfter vorgenommen werden. Die Geschwindigkeit v kann man etwa bis max. 1,5 m/sec annehmen. Als Verschlüsse des Luftzu- bzw. Austrittes für die Lüfter dienen Iris- und Klappenverschlüsse.

Die Antriebskraft berechnet sich für Q m³/sec zu:

$$N = \frac{Q \cdot H}{75 \cdot \eta_v \cdot 1,36} \text{ kW} \quad (163)$$

η_v = Wirkungsgrad des Lüfters (im Durchschnitt 0,25 bis 0,40);

H = 1,239 h ¹ zu erzeugender Pressungsunterschied (Pressung in mm WS).

Sind besonders große Luftmengen zu fördern oder kommt eine größere Kanalanlage in Frage, so sind Schraubenlüfter nicht mehr anwendbar. Als Lüfter müssen dann Schleuderlüfter gewählt werden.

Die Schleuderlüfter bestehen aus einem Blechgehäuse, in welchem

¹ 1 m Luftsäule von 0° C und bei 760 mm Barometerstand entspricht 1,293 mm Wassersäule.

sich ein Flügelrad mit parallel zur Achse stehenden Schaufeln dreht (Abb. 285). Die Saugöffnung ist rund und liegt in der Achse des Flügelrades. Die Ausblaseöffnung kann

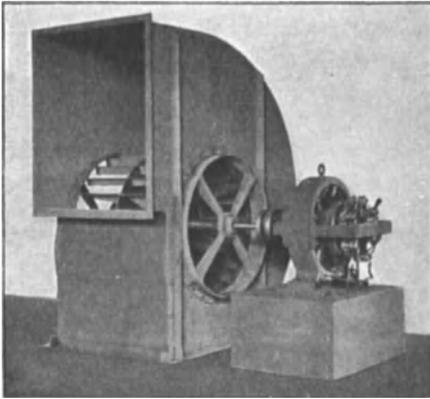


Abb. 285. Schleuderlüfter, nach vorne blasend, mit angebautem Motor.

in den verschiedenen Richtungen gewählt werden. So zeigt Abb. 285 dieselbe nach oben und vorne, während der Lüfter Abb. 286 nach unten bläst.

Der Antrieb erfolgt vorteilhaft durch einen unmittelbar gekuppelten Elektromotor. Diese Anordnung gibt den besten Wirkungsgrad und gestattet bei entsprechender Wahl des Motors eine Steigerung der Drehzahl des Lüfters je nach den Betriebsverhältnissen. Die Luftmenge nimmt dabei annähernd übereinstimmend mit der Drehzahl zu. Ist

ein Transformatorenwerk zunächst nur teilweise ausgebaut, und wird der Lüfter, falls nur einer überhaupt zur Aufstellung kommen soll,

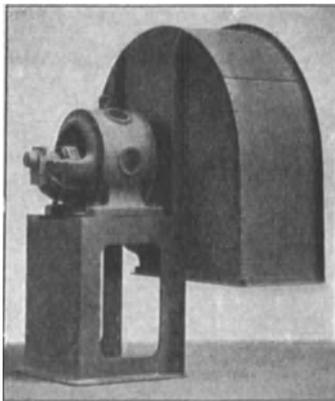


Abb. 286. Schleuderlüfter, nach unten blasend, mit angebautem Motor.

von vornherein für die Luftmenge, die bei vollem Ausbau notwendig ist, bemessen, dann werden Motor und Regler von vornherein so bemessen, daß eine Leistungssteigerung des Lüfters durch Drehzahlerhöhung möglich ist. Dabei ist zu beachten, daß die notwendige Antriebskraft N mit der dritten Potenz der Drehzahl wächst, weil die Pressung H mit dem Quadrate der Drehzahl und die Luftmenge mit H größer wird. Diese Möglichkeit der Steigerung der zu fördernden Luftmenge hat, sofern sie dann auch bei später aufzustellenden Lüftern vorgesehen wird, den weiteren Vorteil, daß bei Aufstellung eines zweiten Lüfters die Betriebssicherheit der gesamten Belüftungseinrichtung

erhöht wird. Bei unfreiwilligem Stillsetzen eines Lüfters muß der zweite imstande sein, die gesamte oder wenigstens annähernd die volle notwendige Luftmenge zu fördern; die Leistungsabgabe der Transformatoren ist dann sichergestellt. — Über die Arbeitsverhältnisse des Schleuderlüfters selbst sei noch folgendes kurz angegeben¹.

¹ Näheres siehe Hütte: II. Teil und R. Biel: Die Wirkungsweise der Kreiselpumpen und Ventilatoren. Versuchsergebnisse und Betrachtungen. Z. V. d. I. 1907, H. 42 der Mitteilungen über Forschungsarbeiten.

Die Arbeitsschaulinie eines Lüfters mit vorgekrümmten Schaufeln ist in Abb. 287 dargestellt, und zwar die nutzbare Druckhöhe H über der Fördermenge Q bei gleichbleibender Umdrehungszahl.

Die Kennlinie ist im normalen Arbeitsbereiche ansteigend 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 Schleudерlüfter eine ansteigende Kennlinie besitzen. Ist diese für eine bestimmte Drehzahl 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 Kennlinien auf (Abb. 288), so erhält man eine Schar ähnlicher Linien, aus der man sämtliche zueinander gehörige Drehzahlen, Druckhöhen und Fördermengen ablesen kann.

H ändert sich bei $n = \text{konst.}$ zwangsläufig mit Q , und eine Regelung hat demnach nicht nach H , sondern nach Q zu erfolgen.

Die Lüfter passen sich in ihrer angesaugten Luftmenge ohne nennenswerten

Überschuß der jeweils erforderlichen Luftmenge an; und es ist diese Fähigkeit des Schleudерlüfters bei der Möglichkeit, die Leistung durch wechselnde Ausströmungsquerschnitte innerhalb weiter Grenzen zu ändern unter Aufrechterhaltung eines nicht wesentlich schwankenden Wirkungsgrades ein besonderer Vorteil. Bei vollständig geschlossener Ausblaseöffnung kann der Lüfter 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 Lüfter und zwar an der Saugöffnung wieder zurückströmen. Der Kraftverbrauch sinkt, wenn die Drehzahl unverändert ist, mehr oder weniger, je nachdem die Ausblasemündung mehr oder weniger verengt wird.

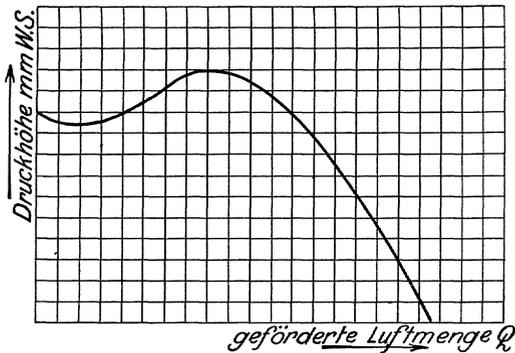


Abb. 287. Allgemeine Arbeitsschaulinie eines Schleudерlüfters mit vorgekrümmten Schaufeln.

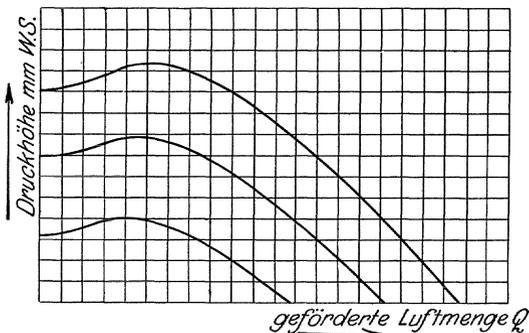


Abb. 288. Arbeitsschaulinien eines Schleudерlüfters bei verschiedenen Drehzahlen.

Die schließlich in Abb. 289 abgebildeten vollständigen Kennlinien eines Hochdruck-Schleuderlüfters veranschaulichen die sehr verschiede-

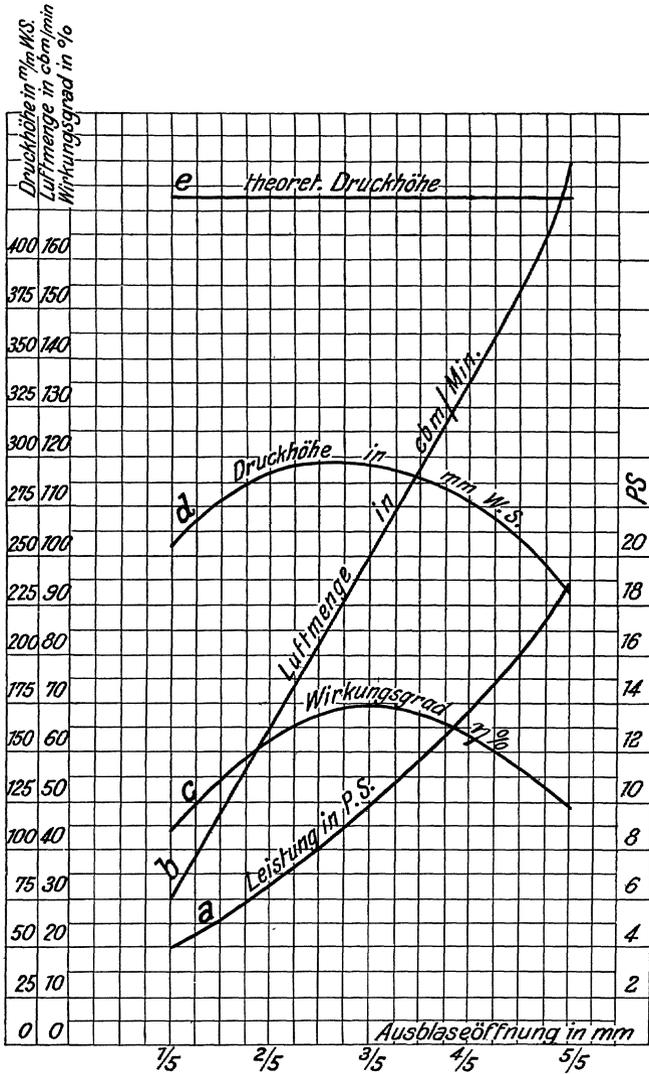


Abb. 289. Kennlinien eines Hochdruck-Schleuderlüfters.

- $n = 1500$ i. d. Min.; Ausblaseöffnung 250 mm Durchmesser; Flügeldurchmesser 750 mm.
- Kennlinie *a* = Pferdestärken in PS;
- „ *b* = gelieferte Luftmenge in $m^3/min.$;
- „ *c* = mechanischer Wirkungsgrad in %;
- „ *d* = erreichte Druckhöhen in mm WS;
- „ *e* = theoretische Druckhöhen in mm WS bei $+ 15^\circ C$ und 750 mm Barometerstand.

nen Leistungsverhältnisse eines solchen bei wechselndem Ausströmungs- bzw. Kanalquerschnitte (Drosselung), aber unveränderter Umdrehungs-

zahl, für fünf verschiedene Querschnitte. Bei $\frac{1}{5}$ Öffnung verbraucht der Lüfter etwa 4 PS und bei $\frac{5}{5}$ Öffnung 18 PS an Antriebskraft. Dieser Umstand findet, wie bereits gesagt, in den jeweils gelieferten Luftmengen seine Erklärung; es beträgt nämlich die geförderte Luftmenge im ersteren Falle, also bei $\frac{1}{5}$ Öffnung, etwa $30 \text{ m}^3/\text{min}$, im letzteren Falle für die gleiche Zeiteinheit etwa 178 m^3 .

Die Kennlinien der erreichten Druckhöhen und mechanischen Wirkungsgrade weisen in Abb. 289 nicht einen im selben Sinne sich



Abb. 290. Belüftung von Transformatorzellen durch außerhalb derselben angebrachte Niederdruckschleuderlüfter (120 cbm/Min. 2,5 PS).

ändernden Verlauf auf. Die günstigste Druckwirkung und Leistung liegt z. B. bei diesem Schleuderlüfter 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 bis etwa 255 mm WS herab.

Der mechanische Wirkungsgrad beträgt bei mittleren Querschnittsverhältnissen 0,70, ist also außerordentlich günstig. Mit voller Ausblaseöffnung arbeitet dagegen ein Lüfter bei dem hier vorliegenden Falle überhaupt nicht, da der Anschluß der Kanäle einer Querschnittsverminderung gleichkommt. Für die Berechnung der Antriebsleistung nach Gl. (163) kann der Wirkungsgrad bei großen Lüftern zwischen 0,4 bis 0,7, bei kleinen Lüftern zu 0,3 bis 0,5 angenommen werden.

Selbstverständlich müssen, wenn mehrere Lüfter 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 Lüfter entweicht.

Im 63. Kap. bei der Besprechung der Transformatoranlage eines großen 100-kV-Umspannwerkes ist die Aufstellung der Schleuderlüfter für die Preßluftkühlung der Transformatoren behandelt.

Eine besondere Form der Benutzung von Schleuderlüftern für die Wärmeabführung aus einzelnen Transformatorräumen zeigt Abb. 290, die wiederum bei älteren Transformatoranlagen gegebenenfalls vorteilhaft anwendbar ist, um die Transformatorleistung vorübergehend zu steigern, wenn eine andere Lösung durch die örtlichen Verhältnisse nicht durchführbar ist. Jede Transformatorkammer hat außen, also jederzeit leicht zu beaufsichtigen und zu untersuchen, einen Niederdruck-Schleuderlüfter erhalten.

54. Gebräuchliche Sonderschaltungen von Transformatoren (äußere Schaltungen).

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-Umwandlung**. 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

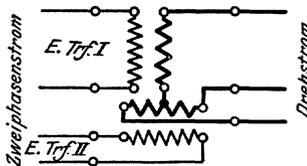


Abb. 291. Zweiphasenstrom-Drehstromumwandlung nach Skott.

man aber die Zweiphasenmotoren gegen Drehstrommotoren ausgewechselt. Um nun Zweiphasenstrom in Drehstrom umzuwandeln, verwendet man ebenfalls Transformatoren in der von Skott angegebenen Schaltung (Abb. 291). Es werden die beiden 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 Mittelpunkt der Sekundärwicklung des zweiten Transformators zusammengeschaltet wird. Zu beachten ist, daß *Trf.I* und *Trf.II* nicht dasselbe Übersetzungsverhältnis haben dürfen, sondern es muß z. B. bei:

$$u_I = 1 : 1, u_{II} = 1 : \sqrt{\frac{3}{4}} = 1 : 0,867 \quad (164)$$

sein. Sekundär erhält man dann ein symmetrisches Dreiphasensystem.

Diese Umwandlung hat folgende Vorteile: In den Zweiphasenanlagen können durch verhältnismäßig geringe Unkosten für die Systemänderung die günstiger arbeitenden Drehstrommotoren verwendet werden. Die Belastung einer Phase kann keinen Spannungsabfall in der zweiten Phase hervorrufen. Ferner sind statt vier nur drei Verteilungsleitungen notwendig. Schließlich ist, wenn z. B. für die Lampen unterspannungsseitig wieder Zweiphasenstrom verlangt wird (Abb. 292), eine leichtere

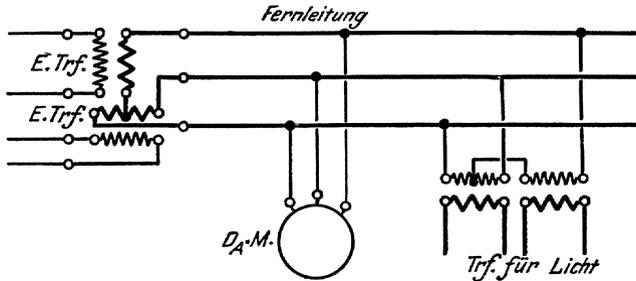


Abb. 292. Kraftübertragung mit Zweiphasenstrom-Drehstromumwandlung für Fernleitung und Motorenbetrieb und Rückumwandlung in unverketteten Zweiphasenstrom für Beleuchtung nach Skott.

Regelung der Lampenspannung bzw. eine bequemere Lampenverteilung möglich, ohne daß gleiche Phasenbelastung vorhanden ist, denn nach S. 291 kann die Belastung 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 Abb. 291 — ist naturgemäß auch ohne Schwierigkeit anwendbar und z. B. seinerzeit für die Eriebahn benutzt worden, die von den Kraftwerken der Niagarafälle (Ontario) mit 60000/11000 V 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 umwandeln. Das Schaltbild ist in Abb. 293 dargestellt. Die einzelnen Strecken arbeiten mit Einphasenstrom, während der Verkettungspunkt der Sekundärseite der Transformatoren geerdet und an die Laufschiene angeschlossen ist.

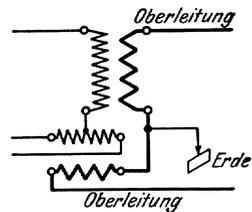


Abb. 293. Drehstrom-Zweiphasenstromumwandlung (verkettet) nach Skott.

Soll verketteter Zweiphasenstrom in Drehstrom umgewandelt werden, dann ist die Skottsche Schaltung nur in abgeänderter Form benutzbar. 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 wiederholt zur Anwendung gekommen ist¹. In Abb. 294 ist das Schaltbild dargestellt,

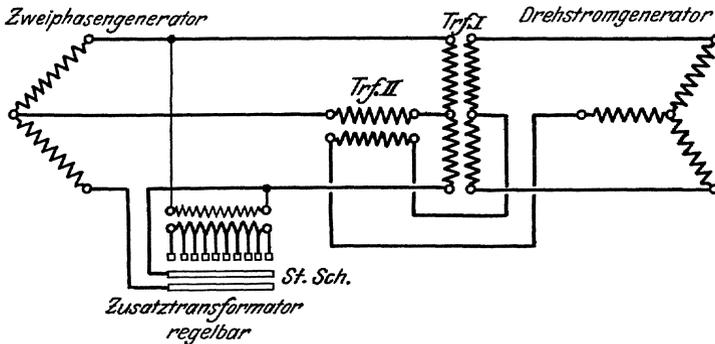


Abb. 294. Kraftübertragung, gespeist von einem Zweiphasen- und einem Drehstromgenerator.

wie es von den S.S.W. 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 die Drehstromspannung 2000 V und die Außenleiterspannung des Zweiphasenstromes 5000 V, 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 *Trf. II* für eine solche von 100 kW zu bemessen. Die entsprechenden Stromstärken betragen für beide Transformatoren auf der Zweiphasenseite etwa 40 A. Zur Spannungsregelung auf der Zweiphasenstromseite ist in Abb. 294 noch ein Transformator mit unterteilter Wicklung eingeschaltet.

Es sei schließlich auch auf eine von F. Sonns angegebene Schaltung hingewiesen, bei der ein ähnlich wie bei dem Drehstromtrans-

¹ Meyer: Die Kraftübertragungsanlage Coschütz-Glückaufschacht. EKB 1909, H. 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 Stromerzeugungsanlage 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 Umwandlung des Zweiphasenstromes vorgenommen werden, was nach eingehenden Untersuchungen am vorteilhaftesten mittels Transformatoren und nicht Motorgeneratoren durchgeführt werden konnte. Auch der Parallelbetrieb hat keine Schwierigkeit ergeben.

formator ausgebildeter Eisenkörper benutzt wird, und die Schenkelwicklungen verschiedene Windungszahlen erhalten. Hierbei kann ebenfalls verketteter und unverketteter Zweiphasenstrom in Drehstrom und umgekehrt umgewandelt werden. Nach Angabe des Erfinders soll dieser Transformator in Gewicht, Preis und elektrischen Verhältnissen günstiger als derjenige nach der Skotttschaltung ausfallen¹.

b) Der Spartransformator. Handelt es sich um den Ausgleich geringerer Spannungsverschiedenheiten z. B. in einem besonderen Teile einer ausgedehnten Kraftübertragungsanlage, oder um kleinere Übersetzungsverhältnisse zwischen Hoch- und Niederspannung, so kann man hierzu den sog. Spartransformator benutzen. Bei diesem ist die Primär- und Sekundärwicklung nur auf einem Eisenkerne untergebracht (Abb. 295); beide Wicklungen werden entweder hintereinander geschaltet, oder die Sekundärwicklung wird von einem Teile der Primärwicklung gebildet

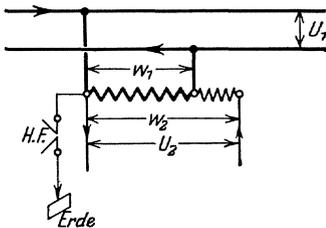


Abb. 295. Stromlauf des Spartransformators (Spannungserhöhung).

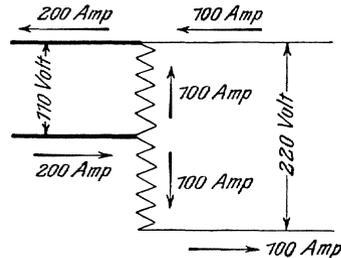


Abb. 296. Stromlauf des Spartransformators (Spannungsverminderung).

(Abb. 296). Die Verbindung nach Abb. 295 ergibt eine Spannungserhöhung und diejenige nach Abb. 296 eine Spannungsverminderung gegenüber der zugeführten Spannung. Da in jeder Windung der Wicklung die gleiche EMK induziert wird, so erhält man für einen Einphasentransformator nach Abb. 295 auf der Sekundärseite eine Klemmenspannung:

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} \cdot U_1.$$

Aus der Leistung:

$$U_2 \cdot I_2 = U_1 \cdot I_1$$

folgt:

$$I_2 = \frac{U_1}{U_2} \cdot I_1 = \frac{w_1}{w_2} \cdot I_1,$$

und es geht daraus hervor, daß im Netze abgesehen vom Magnetisierungsstrom ein geringerer Strom fließt als sekundär.

Beim Spartransformator kann die leitende Verbindung beider Wicklungen unter Umständen die Spannung im Unterspannungsstromkreise 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 bei Einphasenstrom entweder

¹ Vidmar, M.: Über einen neuen Zweiphasen-Dreiphasenstromtransformator. El. u. Maschinenb. 1911, H. 24, S. 487.

nach Abb. 297 ein Pol der Hoch- und Niederspannungswicklung, oder nach Abb. 298 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 Einphasentransformatoren oder Einphasengeneratoren durch das Ansprechen von zufällig zwei Erdungs-Funkenstrecken unter Umständen ein vollständiger Kurzschluß eintritt, und damit Beschädigungen der entsprechenden Teile der Anlage die Folge sind.

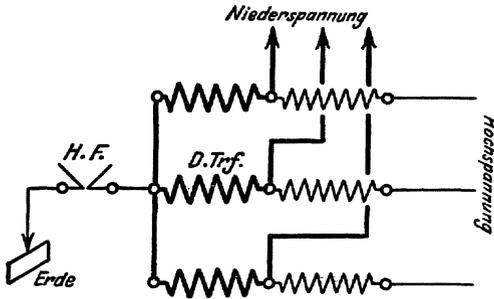


Abb. 297. Stromlauf des Drehstrom-Spartransformators mit Wicklungserdung.

kann der Nullpunkt dagegen in allen Fällen mit Erde verbunden werden. Dadurch ist der Übertritt von Hochspannung in den Niederspannungsstromkreis sicher verhindert.

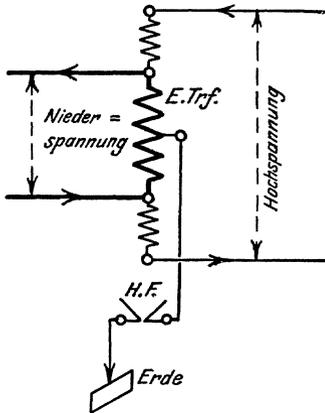


Abb. 298. Stromlauf des Einphasen-Spartransformators mit Wicklungserdung.

Der Hauptvorteil des Spartransformators liegt darin, daß ein gewöhnliches 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. 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 etwa $1,2:1$, so ist die Leistungserhöhung sechs-fach. Die Verwendung von Spartransformatoren ist daher besonders bei Drehstrom mit Sternschaltung und geerdetem Nullpunkte bei kleinem Übersetzungsverhältnisse empfehlenswert. Die RET geben hierzu an, daß in Hochspannungsstromkreisen der Unterschied in der Regel nicht mehr als 25 vH betragen soll. 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

¹ Rasch, G.: Spartransformatoren für Drehstrom. ETZ 1910, H. 1.

Haupt- oder Streckentransformatoren in Kraftübertragungsanlagen, Überlandwerken, Elektrizitätswerken u. dgl. vorliegen, ist der Spartransformator indessen selten am Platze.

Häufige Verwendung findet dieser Transformator dagegen als Stufentransformator zur Spannungsregelung und zum Anlassen von Motoren (vgl. S. 82). Die Wicklung auf der Unterspannungsseite wird dafür mit einer größeren Zahl von Anzapfungen versehen, die mit Hilfe eines Stufenschalters ähnlich einem Zellenhalter geschaltet werden. In Abb. 75 war ein solcher Regler mit dem Transformator zusammengebaut abgebildet. Ferner ist der Spartransformator auch zur Spannungsregelung in Hochspannungsnetzen vielfach in Benutzung; das 55. Kap. wird hierüber noch besondere Beispiele bringen.

e) Schaltung zur Verminderung der Transformator-Leerlaufverluste.

Dienen die Transformatoren eines Werkes in der Hauptsache nur zur Herabsetzung der Spannung für kleine Anschlußanlagen (Ortstransformatoren für Dörfer, Güter u. dgl.), wird andererseits von den Stromabnehmern die Bedingung gestellt, daß der niedergespannte Strom zu jeder Tages- und Nachtzeit zur Verfügung stehen muß, dann ist mit einer solchen Betriebsweise die Unannehmlichkeit für das Kraftwerk verbunden, auch während der Tages- bzw. während der späten Nacht- und der ersten Frühstunden die Leerlaufverluste der Transformatoren und auch den schlechten Leistungsfaktor decken zu müssen, ohne daß ein Gewinn aus der Stromlieferung erzielt wird (siehe S. 290). Um diese Verluste wenigstens zum Teil zu ersparen, hat man Schalter entworfen, die selbsttätig die Transformatoren an solchen Stellen, an denen keine Belastung vorhanden ist, ganz abschalten, oder an Stelle großer Transformatoren 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 die Berryschaltung¹ beschrieben werden.

Nach dieser Schaltung wird ein Hilfstransformator geringerer Leistung mit dem Haupttransformator in Hintereinanderschaltung 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 Abb. 299 zeigt das Schaltbild 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 V zugrunde gelegt. Der Hilfstransformator, dessen Größe 10 kW

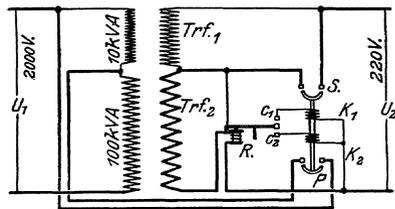


Abb. 299. Schaltung zur Verminderung der Transformator-Leerlaufverluste nach Berry.

¹ Electr. Enging. Bd. 3, S. 197 und ETZ 1908, H. 16, S. 412; Ein neues System zur Verbesserung des mittleren Jahreswirkungsgrades von Transformatoren.

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 nur ein verschwindend kleiner Teil zugeführt wird. Das Relais R ist in den Belastungsstromkreis eingeschaltet und wird demnach vom Belastungsstrom beeinflusst. Steigt derselbe über $\frac{1}{10}$ 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 $\frac{1}{10}$ des vollen Wertes, dann wird der Kontakt c_2 geschlossen, K_2 erregt, und der Doppelschalter selbsttätig geöffnet. Damit übernimmt Trf_1 die Leistungsabgabe.

Das Kontaktwerk ist noch weiter in der Form ausgeführt, daß erstlich die Spulen K_1 und K_2 nur während des Schaltvorganges vom Strome durchflossen, Leistungsverluste 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 einer Störung am Hilfstransformator ist demnach ausgeschlossen.

Diese Anordnung hat die weiteren Vorteile, daß sie verhältnismäßig billig ist, und bei hohen Primärspannungen infolge des vor dem großen Transformator liegenden hohen Widerstandes des kleinen Transformators die Gefahr von Durchschlägen für Trf_2 durch Überspannungen vermindert. Es sei hinsichtlich dieser Vorgänge auf das schon auf S. 148 über Schutzschalter Gesagte verwiesen; der Überspannungsschutz wird später noch besonders behandelt werden.

Wann die Benutzung derartiger Hilfstransformatoren am Platze ist, kann nur eine eingehende Kostenvergleichsrechnung ergeben, die zu umfassen hat: 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, Abschreibung, Aufsicht und Instandhaltung, sowie schließlich Mehrausgaben für die Baulichkeiten, falls solche 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 Transformatoranlage 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 etwa nach einjährigem Betriebe die Sparschaltung einrichten zu können.

Andere Schaltungen mit der gleichen Aufgabe beruhen darauf, nach Stromzeigern oder auch durch Relais vom Kraftwerke aus die Ölschalter für die großen Transformatoren in den einzelnen Werken selbsttätig zu steuern, doch haben sich diese bisher wegen ihrer höheren Anlagekosten, die durch die Steuerleitungen usw. entstehen, nicht eingeführt. Es kann daher von der Beschreibung derartiger Anlagen abgesehen werden.

Im allgemeinen ist zur derartigen Sparschaltung zu sagen, daß sie sich selbst in den größten Verteilungsnetzen bisher nicht eingeführt hat. Das ist wohl in der Hauptsache darauf zurückzuführen, daß die selbsttätigen Schalter nicht betriebssicher genug gebaut werden können. Die Verteilungsspannungen betragen heute zumeist 10 bis 15 kV. Auch hierin liegt ein weiterer Grund für die Nichtanwendung.

d) Die Benutzung von Einphasentransformatoren in Drehstromanlagen. Eine bei großen Transformatorleistungen besonders in amerikanischen Großkraftanlagen¹ 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 S. 295 den Vorteil, daß beim Schadhafwerden 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 U_1 um den $\sqrt{3}$ -fachen Betrag kleiner aus als bei der Dreieckschaltung. Infolgedessen ist die Verbindung in Stern besonders bei hoher Primärspannung aus den auf S. 295 erläuterten Gründen vorzuziehen.

Ganz allgemein hat eine solche Herstellung von Drehstromtransformatoren aus Einphasentransformatoren die folgenden Vorzüge: Die Bereithaltung von Aushilfstransformatoren 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 Abkühlungs-

¹ Eines der neuesten amerikanischen Groß-Transformatorwerke der Waukegan Generating Comp. hat bei einer Gesamttransformatorleistung von 90000 kVA zwei Gruppen eingebaut, und zwar 3×10000 und 3×20000 kVA mit je einem einfahrbaren, nicht umschaltbaren Einphasentransformator. Das Übersetzungsverhältnis ist 12/132 kV. Siehe ETZ 1928, H. 34, S. 1267.

flächen der Transformatoren bezogen auf die Drehstromleistung sind erheblich größer, und die Kühlung macht dann unter Umständen weniger Schwierigkeiten. Die zu bewegenden Einzelgewichte sind erheblich geringer und werden dort mit zu berücksichtigen sein, wo der Transport besondere Schwierigkeiten aufweist und bestimmte Gewichte nicht überschritten werden dürfen. Es ist daher für große Anlagen nach dieser Richtung gegebenenfalls eine sorgfältige Kostenberechnung vorzunehmen, um das zweckmäßigste unter richtiger Bewertung der Vorzüge und Nachteile zu finden. Diese Prüfung hat sich zu erstrecken auf: den Wirkungsgrad, das Baustoffgewicht für 1 kVA und den Preis unter Berücksichtigung der Raumbeanspruchung, der Montage, der Reservehaltung und der sonstigen besonderen Verhältnisse.

In Abb. 360 ist das Schaltbild für eine Anlage gezeichnet, in der solche zusammengesetzten Dreiphasentransformatoren zur Verwendung gekommen sind. In der Erklärung dieses Bildes wird auch darauf hingewiesen werden, 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 Schalt- und Meßgeräte angeschlossen werden kann. Auch hierauf ist bei der Vergleichsrechnung Rücksicht zu nehmen.

Für den Vergleich zwischen Drehstrom- und Einphasentransformatoren ist in Zahlentafel 27 ein Beispiel zusammengestellt. Zugrunde gelegt ist die Leistung von 50000 kVA, die das Transformatorenwerk abgeben soll. Das erfordert eine Reserve von 25000 kVA, wenn die abzugebende Leistung auf 2 Transformatoren je 25000 kVA verteilt wird. Werden Einphasentransformatoren gewählt, so soll nur zur Reserve ein solcher aufgestellt werden. Von der elektrischen Umschaltung wird

Zahlentafel 27.

Vergleich zwischen Drehstrom- und Einphasentransformatoren.

	Drehstromtransformatoren	3 Einphasentransformatoren
Stückzahl	3	10
Leistung je Transformator . . . kVA	25000	$3 \times 8333 = 25000$
Spannung kV	10/110	10/100
Schaltung	Δ/∇	Δ/∇
Je Transformator Leerlaufverlust kW	75	$3 \times 33 = 99$
Wicklungsverlust bei $\frac{1}{1}$ Last . kW	160	$3 \times 54 = 162$
Spannungsabfall bei $\cos \varphi = 1$. vH	1,14	1,15
Kurzschlußspannung vH	10,0	10,5
Wirkungsgrad bei $\frac{1}{1}$ Last mit $\cos \varphi = 1$ vH	99,07	98,96
Gesamtgrundfläche für die Transformatoren mit Kühlanlagen . . m ²	$18,0 \times 8,5 = 153,0$	$20,0 \times 9,0 = 180,0$
Gesamtpreis	1	0,87
Einzelgewicht eines Transformators mit Ölfüllung kg	79700	32600

abgesehen. Der in der Zahlentafel 27 angegebene Flächenbedarf schließt die Kühlanlage ein, für die Umlauf-Preßluftkühlung nach Abb. 269 zugrunde gelegt ist. Der Lüfter ist mit den Kühlelementen zusammengebaut. Die Spannung beträgt 10/100 kV, die Frequenz 50. Das Transformatorwerk soll in Freiluftausführung erstellt werden.

Im Preisvergleich ist mit berücksichtigt die Fracht, Verpackung und Montage, ferner die Kühlanlagen, das Öl, die Ausdehnungsgefäße, die Fundamente und die erforderlichen Sicherheits- und Meldegeräte, indessen nicht die Trenn- und Ölschalter.

Der Vergleich zeigt, daß die Anlage mit Einphasentransformatoren bei gleichen elektrischen Verhältnissen, die durch entsprechend geringe Bauänderung auch das gleiche Ergebnis für den Jahreswirkungsgrad aufweisen, der Ausführung mit Drehstromtransformatoren um etwa 13 vH im Preise überlegen ist. Das wird für große Transformatorwerke schon von Bedeutung sein. Für kleinere Werke ergibt die Untersuchung gleiche Verhältnisse, so daß für diese eine ähnliche Prüfung zumeist keinen Zweck hat. Die leichtere Betriebsbereitschaft hat zweifellos die Drehstromanlage. Die Bedienungskosten ergeben keinen nennenswerten Unterschied. Die Schalter können das Preisverhältnis noch zugunsten der Drehstromtransformatoren verschieben.

Sofern also nicht besondere Verhältnisse zwingende Gründe dafür aufweisen, die Aufteilung auf Einphasentransformatoren vorzunehmen, wird der Drehstromanlage der Vorzug zu geben sein.

55. Die Spannungsregelung.

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 Belastungsschöße 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 der Generatoren in derartigen Fällen sind im IV. Bande behandelt. In Kraftübertragungsanlagen mit Stromlieferung 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 Verteilungsnetzes (städtische Elektrizitätswerke, Überlandwerke). Die Tagesbelastung (Motoren) wird immer von der Morgen- und Abend-

belastung (Licht) abweichen, und auch die einzelnen Wochen und Monate zeigen große Unterschiede in der jeweils zu übertragenden elektrischen Leistung. Hier muß die Spannungsregelung dann zumeist auf zwei verschiedene Arten vorgenommen werden, die bei großen Anlagen gleichzeitig, bei kleineren entweder in der einen oder in der anderen Form zu wählen sind. Es ist einmal nach bestimmten sog. Tagesbelastungsfahrplänen die Spannung an den Generatoren im Kraftwerke für das gesamte Verteilungsnetz zu regeln und zusätzlich in den größeren Transformatorenwerken weiter die Spannung für einzelne abgehende Leitungen oder wiederum besondere, zusammengefaßte Gebiete. Der einfachste Fall ist dann gegeben, wenn ein Kraftwerk seine eigene kleine Verteilungsanlage zu speisen hat etwa bei Industriewerken mit Eigenerzeugung, kleinen Städten und ähnlichem. Dann genügt die Regelung der Generatorspannung. Der Vollständigkeit wegen ist in

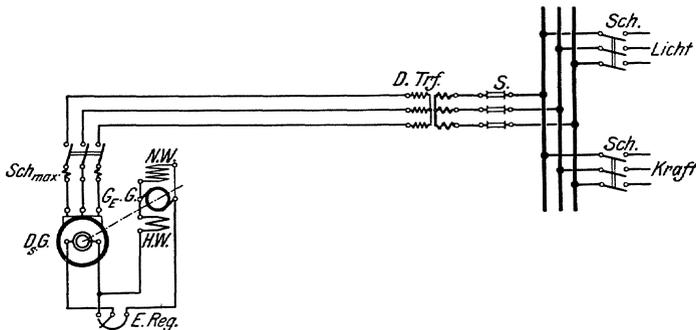


Abb. 300. Regelung der Netzspannung durch Änderung der Generatorspannung in einer Drehstromanlage.

Abb. 300 dieser einfachste Fall für eine Fabrikanlage mit nur einem Generator, einer Fernleitung, einem Transformator und einer Hauptsammelschiene gezeichnet, von der Strom sowohl für Licht- als auch für Kraftzwecke abgenommen wird. Durch Verstellen des Erregerreglers *E.Reg.* des Stromerzeugers *D_sG.* 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 Zu- leitungsquerschnitte wenigstens zum Teil auf den bei größeren Stromstärken auftretenden Spannungsabfall Rücksicht genommen wird. Unter Umständen sind, wenn etwa auf vollständig ruhiges Licht gesehen wird, selbsttätig arbeitende Schnellregler für die Erregermaschinen einzubauen.

Ganz andere Mittel sind dagegen zu verwenden, wenn in ausgedehnten Anlagen für die öffentliche Versorgung z. B. in den weitverzweigten Netzen großer Überlandwerke an einzelnen, weit voneinander liegenden Speisepunkten oder Transformatorenpunkten Span-

nungsschwankungen 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 nach den Belastungsfahrplänen jeweils unverändert gehalten wird, an allen Speisepunkten die notwendige gleiche Spannungshöhe zu erzielen. Für Haupttransformatorenwerke ist weiter noch die starke Spannungsänderung der Transformatoren selbst zu berücksichtigen, die sie infolge großer Kurzschlußspannung bei schwankenden Belastungen und Leistungsfaktoren aufweisen. Auch das Parallelschalten unabhängiger Kraftwerke über Transformatorenwerke bedingt unter Umständen besondere Regelung der Spannung. Im allgemeinen ist eine Schwankung der Spannung an den Speisepunkten von $\pm 2,5$ vH noch als zulässig zu erachten; darüber hinaus aber wird besonders das Licht bei Belastungsänderungen unruhig, und man muß dann ebenfalls zur künstlichen Spannungsregelung greifen. Durch andere Bemessung der Leitungsquerschnitte läßt sich nichts Wesentliches erreichen.

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, sind wiederum bestimmte Lösungen mit Benutzung des Transformators möglich, deren Anwendung sich nach den Betriebsverhältnissen richtet. Für Wahl und Ausführung ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob die Regelung:

im abgeschalteten Zustande der Sekundäranlage, also ohne Last, oder im eingeschalteten Zustande, also unter Last, erfolgen soll. Ganz allgemein ist weiter je nach der Höhe des geforderten Regelbereiches auf- und abwärts um einen Mittelwert bzw. nur aufwärts oder nur abwärts zu untersuchen, ob die Spannung am Regelungspunkte zunächst um einen festen Betrag an und für sich gehoben oder gesenkt werden soll (feste Stufe) und dann noch zusätzliche Spannungsregelung notwendig wird. Im ersteren Falle wird ein besonderer Zusatztransformator dem Regelsatze vorgeschaltet und der Regelbereich fällt kleiner aus. Im zweiten Falle ist der Regelsatz für den ganzen Spannungsbereich zu bemessen. In den nachfolgenden Schaltbildern sind beide Fälle behandelt. Das Folgende bezieht sich nur auf die Regelformen an sich.

b) Die Spannungsregelung ohne Last. Diese hat für die Betriebsführung keine besondere Bedeutung. Sie soll nur ermöglichen, die für einen bestimmten Netzteil vorgesehene Spannung für längere Zeit um einen festen Betrag zu erhöhen oder zu ermäßigen etwa dann, wenn sich die Belastungsverhältnisse im Sommer und im Winter oder infolge von Erweiterungen stark und dauernd geändert haben, so daß in der Hauptsache der in den Primär- oder Sekundärleitungen auftretende Spannungsabfall entsprechend der geänderten Belastung ausgeglichen werden muß.

Zu diesem Zwecke werden je nach der Höhe der Spannungen die Primär- oder Sekundärwicklungen der Transformatoren in ein oder mehreren Stufen angezapft und diese Anzapfungen entweder zu Isolatoren auf den Deckel für Klemmverbindungen oder zu einem Umschalter geführt. Für gewöhnlich versieht man, wie auf S. 318 bereits angegeben, jeden Transformator von vornherein mit solchen Anzapfungen, etwa in 2 Stufen von + und — 4 bis 5 vH der gewünschten mittleren Spannung, um dadurch für alle Fälle Bewegungsfreiheit zu erhalten. Nur in Sonderfällen wird eine größere Zahl von Anzapfungen notwendig sein, wobei auf das früher Gesagte verwiesen wird. Bei hoher Spannung sollte die Zahl der Anzapfungen aus elektrischen und mechanischen Konstruktionsgründen tunlichst gering gehalten werden.

Sind die Anzapfungen an Isolatoren auf den Transformatordeckel geführt, so muß die Einstellung einer Spannungsstufe durch Klemmenverbindungen (Metallbügel u. dgl.) erfolgen. Da hier Schaltfehler vorkommen können, wird diese Ausführung vom Betriebe immer mehr abgelehnt und dafür gefordert, daß die Umschaltung durch einen besonderen Schalter vorgenommen wird. In baulicher Hinsicht ist dabei zu verlangen, daß der Umschalter deutliche Bezeichnungen für die Spannungsstufen erhält und seine Bedienung möglichst einfach ist. Bei geringen Stufenzahlen — etwa nur je einer über und einer unter der Mittelspannung — und mittleren Spannungen etwa bis 30 kV wird der Umschalter in den Transformatorkegel eingebaut und bei kleineren Transformatoren auf dem Kessel bedient. Schalterbauformen, bei denen der Kessel durch Abnehmen des Deckels geöffnet werden muß, sind unbrauchbar, da ihre Bedienung im Betriebe zu umständlich und zeitraubend ist (neue Kesseldeckeldichtung) insbesondere dann, wenn der Transformator mit einem Ausdehnungsgefäß versehen ist und erst Öl abgelassen werden muß, bevor man den Kessel öffnen kann. Bei größeren Transformatoren empfiehlt es sich, den Antrieb des Umschalters derart durchzubilden, daß er von unten geschaltet werden kann. Sichere Absperrung gegen unbefugtes Schalten ist vorzusehen.

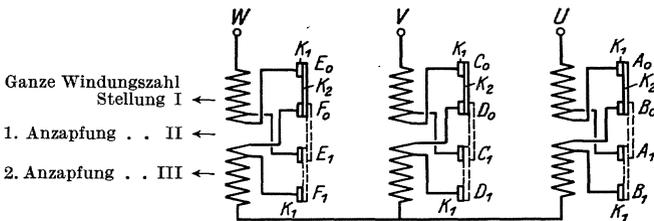


Abb. 301. Wicklungsschalter für stromlose Schaltung.

Abb. 301 zeigt die Schaltung eines solchen Umschalters für 2 Stufen und Abb. 302 den vollständigen Kern einer 60 ± 4 vH/25 kV Drehstromtransformators mit Anzapfumschalter. Die Anzapfungen liegen in beiden Fällen in der Mitte der Wicklung.

Liegen an den Enden langer Leitungsstrecken Transformatoren, dann kann man den in ersteren bei einer bestimmten Belastung auftretenden Spannungsabfall, der naturgemäß als eine Spannungsänderung anzusehen ist, auch dadurch ausgleichen, daß man das Über-

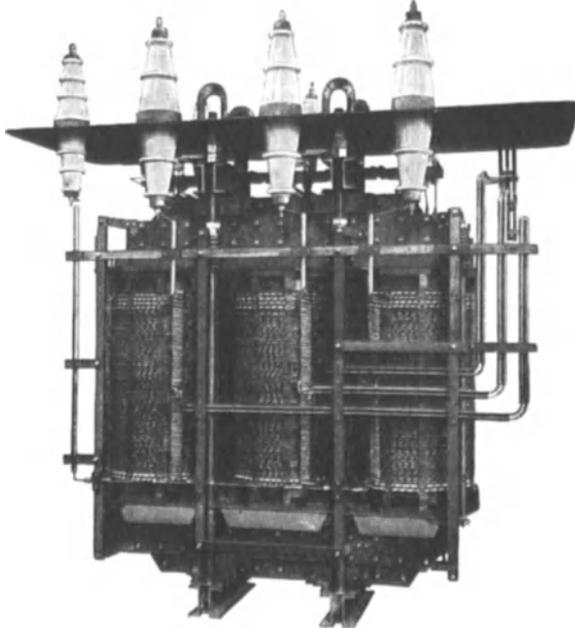


Abb. 302. Vollständiger Kern eines 2500-kVA-Transformators 60 ± 4 vH/25 kV mit einfach-konzentrischer Röhrenwicklung und Anzapfungsschalter (Sachsenwerk).

setzungsverhältnis der Transformatoren entsprechend wählt. Eine solche Ausführung hat aber den Nachteil, daß man in den einzelnen Werken verschieden gewickelte Transformatoren erhält, und sowohl die Reservehaltung als auch eine Auswechslung oder Vertauschung der Transformatoren untereinander recht schwierig wird. Auch in solchen Fällen wird man deswegen vorteilhafter Zusatztransformatoren zu den Haupttransformatoren etwa in der einfachen und billigen Ausführung als Spartransformatoren benutzen, oder zum mindesten die Streckentransformatoren mit nur zwei oder drei allgemein festgesetzten Wicklungsabzweigen versehen lassen.

Diese Ausführung kann zu vorübergehenden Regelungen nicht benutzt werden: 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 Verteilungsnetzes dauernd geändert werden muß.

c) Die Spannungsregelung unter Last. Dieser fällt heute eine große Bedeutung zu. Wie schon in der Einleitung zu diesem Abschnitte ausführlicher erläutert, wird es in großen Hochspannungsverteilungsnetzen

mit deren wachsender Ausdehnung und Belastung und mit der Zusammenfassung der Stromerzeugung in wenigen Großkraftwerken mehr und mehr zur zwingenden Notwendigkeit, an bestimmten Hauptpunkten eine Spannungsregelung unter Last vornehmen zu können.

Arbeiten zwei getrennte Kraftwerke zusammen, so wird ebenfalls eine einwandfreie Betriebsführung oft kaum ohne Spannungsregelung für das Parallelschalten, den Parallelbetrieb, die Lastverteilung u. dgl. auskommen können. Die heute durchgebildeten Schaltgeräte und Schaltungen geben selbst bei den höchsten Spannungen volle Betriebssicherheit.

Die Regelung erfolgt auf verschiedene Weise je nach der Höhe der Spannung, der zu übertragenden Leistung, der Zahl der Regelstufen und dem Verlangen, die Spannungsänderung in einzelnen Sprüngen (Stufen) oder gleichmäßig vorzunehmen.

Für die Spannungsregelung in Stufen werden folgende Hauptgruppen unterschieden:

1. der regelbare Leistungstransformator;
2. der reine Zusatztransformator;
3. der Zusatztransformator mit festen Vorstufen.

Für die gleichmäßige Spannungsregelung kommen zur Verwendung:

4. der Drehtransformator;
5. der Schubtransformator;
6. die synchrone und asynchrone Blindleistungsmaschine.

Die Auswahl bedarf stets besonderer Untersuchungen und ist nicht immer einfach zu treffen. Sie hat nach der technischen und nach der wirtschaftlichen Seite zu geschehen. Im nachfolgenden sollen die Hauptgesichtspunkte kurz erörtert werden.

Alle Regeltransformatoren haben zunächst in mechanischer und elektrischer Hinsicht den Nachteil, daß ihre Kurzschlußspannung sehr gering ist. Es muß daher die an der Verwendungsstelle der Regeltransformatoren zu erwartende Kurzschlußleistung besonders rechnerisch vorherbestimmt werden, wobei auf die zukünftige Entwicklung Rücksicht zu nehmen ist.

Beim plötzlichen Ausbleiben und Wiederkehren der Hauptspannung ist ferner dafür zu sorgen, daß die Regeleinrichtung abgeschaltet und erst dann erneut zugeschaltet wird, wenn sie auf eine Regelstufe — gewöhnlich die Nullstellung — gebracht ist, die für das zu speisende Netz beim Wiedereinschalten keine zu hohe Spannung liefert, um die nach Eintritt der Störung nicht abgeschalteten Stromverbraucher, insbesondere die zumeist vielfach eingeschaltet gebliebenen Glühlampen nicht zu zerstören. Auf S. 400 wird hierüber besonders gesprochen. Das dort Gesagte gilt sinngemäß auch für alle anderen Regelformen unter 1. bis 5.

Die stufenweise Spannungsregelung wird bei größerer Leistung und hohen Spannungen, ganz besonders aber dann, wenn die zu erwartende Kurzschlußleistung groß ist, bevorzugt. Einzelheiten werden weiter unten angegeben. Die Höhe der Spannungsänderung von Stufe

zu Stufe soll nicht mehr als höchstens 2 vH der zu regelnden Spannung, besser darunter betragen, weil sonst die Spannungsänderung an den Abnahmestellen zu stark bemerkbar wird. Zu berücksichtigen sind dabei wiederum die Spannungsabfälle in den Leitungen und Transformatoren selbst, die Art der Belastung mit ihrem Leistungsfaktor und die Empfindlichkeit angeschlossener Betriebe. Die Zahl der Spannungsstufen bzw. die Grenzen, zwischen welchen die Regelung um einen Mittelwert möglich sein soll, müssen rechnerisch ermittelt, die zukünftige Entwicklung der Anschlußanlagen weitestgehend beachtet werden.

1. Der regelbare Leistungstransformator. Bei diesem wird je nach der Höhe der primären bzw. sekundären Spannung und der Leistung also der Stromstärke entweder die primäre oder die sekundäre Wicklung in der Mitte oder am Nullpunkt je nach dem Aufbau des Transformators in einzelne Stufen (Anzapfungen) unterteilt und die Wicklungsenden zu einem Stufen- oder Windungsschalter geführt.

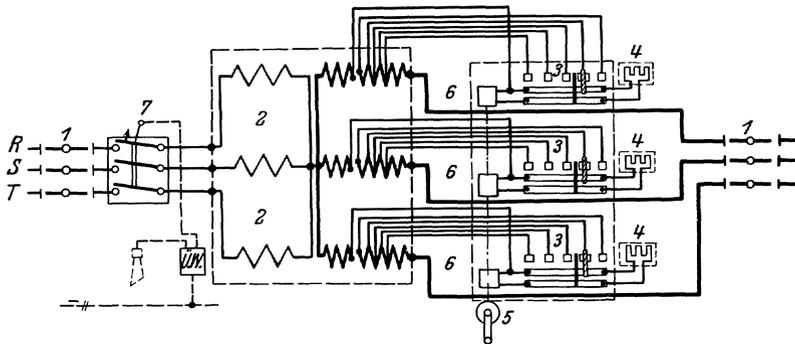


Abb. 303. Spannungsregelung durch regelbaren Leistungstransformator mit Stufenschalter, Anzapfungen an der Mitte der Unterspannungswicklung.

1 Trennschalter, 2 Leistungstransformator, 3 Stufenschalter, 4 Übergangswiderstände, 5 Handantrieb, 6 Funkenentzieher, 7 Hauptschalter.

Der Transformator selbst wird entweder als Zweispulentransformator oder als Spartransformator ausgeführt, wobei für letzteren das auf S. 374 Gesagte zu beachten ist. Abb. 303 zeigt das Schaltbild für einen solchen regelbaren Leistungstransformator mit Windungsschalter. Der Windungsschalter wird derart ausgeführt, daß beim Übergange von der einen auf eine zweite Stufe kurzzeitig wie beim gewöhnlichen Zellschalter ein Widerstand als Überbrückungswiderstand eingeschaltet wird, um beim Schalten den Kurzschluß zwischen zwei Stufen und eine Stromunterbrechung zu verhüten.

Gebaut wird diese Regelform für Spannungen bis 30 kV und Stromstärken bis 1000 Amp. Die höchste Stufenspannung pro Phase beträgt etwa 500 V. Die Stufenzahl ist nicht beliebig wählbar, sie richtet sich nach der Möglichkeit der Unterbringung der Klemmenisolatoren auf dem Transformatordeckel. Die Spannungssprünge von Stufe zu Stufe betragen zumeist 2 vH, die Stufenzahl etwa ± 4 . Nur in Ausnahmefällen wird die Stufenzahl höher gewählt. Wesentlich ist, daß die Regel-

zeit von Stufe zu Stufe etwa 5 bis 6 sec dauert, also für das zu regelnde Netz bereits merklich in die Erscheinung tritt.

Angewendet kann der regelbare Leistungstransformator nur werden für bestimmte Abschnittsregelungen innerhalb eines Versorgungsgebietes entweder im Kraftwerke oder in einer Transformatorenanlage. Vorteilhaft ist diese Ausführung in bezug auf geringste Anlagekosten, da der Windungsschalter in der Bauart als Luft- oder Ölschalter mit dem Transformator unmittelbar vereinigt wird und der vollständige

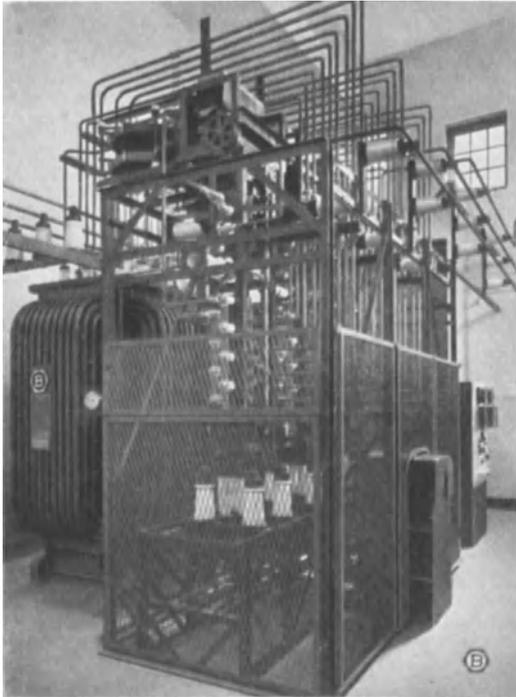


Abb. 304. Regelschalter mit Kontakten in Luft und getrenntem Stufentransformator (15 000 kVA Durchgangsleistung, ± 8 Stufen).

Regelsatz den geringsten Platz erfordert. Abb. 304 und 305 zeigen zwei Ausführungen der Bergmannwerke, die das Gesagte ohne weiteres erkennen lassen.

Nachteilig für den regelbaren Leistungstransformator ist der Umstand, daß bei Vorkommnissen am Windungsschalter der vollständige Transformator aus dem Betrieb genommen werden muß, was für größere Anlagen dazu zwingt, stets entsprechende Reserve in der Transformatorenleistung bereitzuhalten. Das ist beim Kostenvergleich mit anderen Regelformenganz besonders zu beachten. In betriebswirtschaftlicher Hinsicht entstehen keine zusätzlichen Verluste durch die Benutzung dieser Regeleinrichtung.

Der Luftschalter ist naturgemäß betrieblich vorteilhafter als der Ölschalter, weil Kontakte, Widerstände und Schalter im Betriebe beobachtet, Störungen schnell erkannt und beseitigt werden können. Der Zusammenbau des Ölschalters mit dem Transformator nach Abb. 306 ergibt dagegen geringere Abmessungen und billigeren Preis, erfordert aber, daß für Untersuchungen der Transformator mit dem Schalter aus dem Ölkessel herausgehoben werden muß. Auf die Konstruktionsbeschreibung im einzelnen soll nicht eingegangen werden.

Der Antrieb des Stufenschalters kann von Hand oder elektrisch durch einen Motor erfolgen, ohne oder mit selbsttätigem Ansprechen durch Spannungsrelais.

Beim Motorantrieb muß durch eine besondere Einrichtung dafür gesorgt werden, daß der Stufenschalter nach Einleitung einer Bewegung sich stets um eine volle Stufe weiterbewegt. Bei der selbsttätigen Steuerung wird der Kontakt-Spannungszeiger derart eingestellt, daß der Schalter erst ansprechen kann, wenn die Netzspannung sich um mehr als die Hälfte der Stufenspannung geändert hat. Auf diese Weise wird ein fortwährendes Hin- und Herspringen des Schalters vermieden. Um ferner ein zu häufiges Ansprechen des Schalters zu verhindern, sind

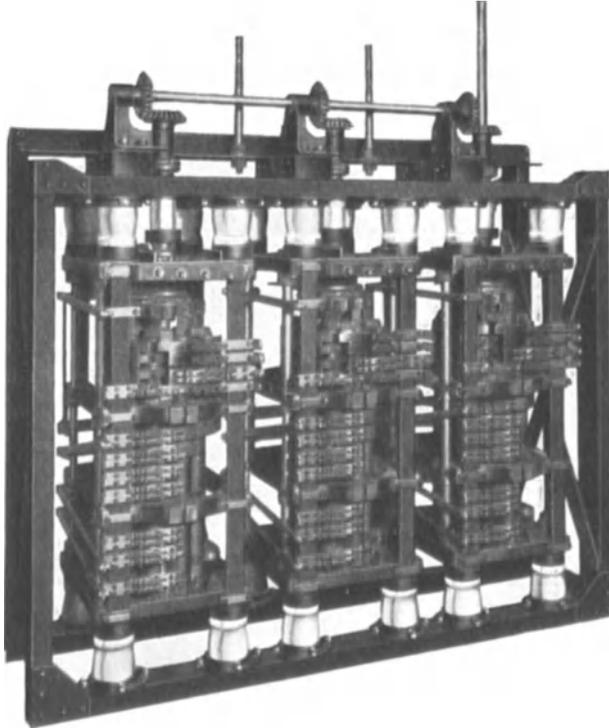


Abb. 305. Regelschalter mit Kontakten in Öl und zusammengebautem Stufentransformator.

zwischen dem Kontaktspannungszeiger und dem Motorantrieb noch Zwischenrelais mit Zeitverzögerung zu legen, die den Stufenschalter erst dann ansprechen lassen, wenn eine Spannungsänderung, die größer als die Hälfte der Stufenspannung ist, längere Zeit, z. B. 20 sec bestehen bleibt. Auf diese Weise wird verhindert, daß bei Spannungsänderungen der Schalter arbeitet, bei denen nach kurzer Zeit wieder der ursprüngliche Wert der Netzspannung erreicht wird. Ein weiteres Relais muß dafür sorgen, daß bei einem Überstrom oder Kurzschluß in der Hochvoltleitung der Steuerstromkreis des Stufenschalters unterbrochen wird, so daß der Schalter hierdurch sofort blockiert wird. Meldeeinrichtungen für das ordnungsmäßige Arbeiten des Stufenschalters dürfen nicht fehlen (Abb. 436).

2. Der reine Zusatztransformator. Liegt die zu regelnde Spannung über 30 kV oder gestatten die anderen Grenzen und Erwägungen die Ausführung nach 1. nicht mehr bzw. sind nur einzelne Netzteile einer von einem Haupttransformator gespeisten Anlage zu regeln, soll schließlich die Regeleinrichtung ohne Störung der Hauptanlage zu- und abschaltbar sein, dann wird die Spannungsregelung einem besonderen Zusatztransformator übertragen, dessen Regelwicklung in Reihe mit der zu regelnden Spannung liegt.

Die Erregerwicklung des Zusatztransformators d. h. die nicht für die Regelung benutzte Wicklung soll zweckmäßig auf der Netzseite angeschlossen werden, die unveränderte Spannung hat, um stets gleiche Zu- und Absatzspannungen zu erhalten.

Die Leistung für die Zusatztransformatoren und die Erregertransformatoren bestimmt sich aus der Durchgangsleistung \times Zusatzspannung in vH bezogen auf die vorkommende tiefste Leitungsspannung.

Für Spannungen wiederum zunächst etwa bis 30 kV wird die Regelung zumeist im Hauptstromkreise vorgenommen. Die Schaltung ist derart, daß die Primärwicklung des Zusatztransformators am Netz mit gleichbleibender Spannung liegt und die Sekundärwicklung mit Wicklungsunterteilung wie beim regelbaren Leistungstransformator versehen ist. Der Stufenschalter liegt unmittelbar mit der Durchgangswicklung (Reihenwicklung) des Zusatztransformators in Reihe mit der Hauptleitung. Seine Bauart entspricht im allgemeinen derjenigen, wie sie unter 1. kurz gekennzeichnet worden ist, indessen mit der Abweichung (Abb. 306), daß durch die Benutzung von vier Schienen, deren mittlere kreuzweise überbrückt sind, bei Abwärtsbewegung und Überschreiten der Nullstellung die Durchgangswicklung im umgekehrten Sinne vom Strome durchflossen wird. Es tritt dann eine Gegenschaltung ein.

Lassen Höhe der Spannung und Größe der Durchgangsleistung diese Schaltung nicht mehr zu, dann wird die Erregerwicklung des Zusatztransformators an einen besonderen Transformator — den Erregertransformator — angeschlossen und die Wicklungsunterteilung auf der Sekundärseite dieses Erregertransformators vorgenommen. Diese Schaltung zeigt Abb. 306. In der Hauptleitung liegt der Überbrückungstrennschalter 1. Der Zusatztransformator ist durch die Trennschalter 2 abschaltbar. Diese drei Trennschalter sind zweckmäßig so gegeneinander zu verriegeln, daß keine Fehlschaltung vorkommen kann. Die in Abb. 306 gezeichneten Kondensatoren 3 haben den Zweck, die Durchgangswicklungen gegen Beschädigungen durch Wanderwellen zu schützen. Der Erregertransformator ist über Trennschalter 2 und einen Ölschutzschalter 9 an das Netz angeschlossen. Über diese Schaltung an sich wird auf S. 400 eingehender gesprochen.

Der betriebstechnische Hauptvorteil dieser Art der Spannungsregelung liegt darin, daß die eigentliche Regelvorrichtung insgesamt abschaltbar ist und weiter nur zugeschaltet zu werden braucht, wenn sie benötigt wird. Es ist also auch wirtschaftlich eine oft nicht zu unterschätzende Ersparnis an Zusatzverlusten möglich, wenn die Betriebsführung entsprechend sorgfältig verfährt.

Nachteilig ist der verhältnismäßig hohe Beschaffungspreis für den Regelsatz und die Verwendung des Stufenschalters bei hoher Spannung. Auch wirtschaftlich ist darauf hinzuweisen, daß insbesondere bei der Benutzung des Erregertransformators zusätzliche Verluste durch die Eisen- und Kupferverluste dieses Transformators entstehen.

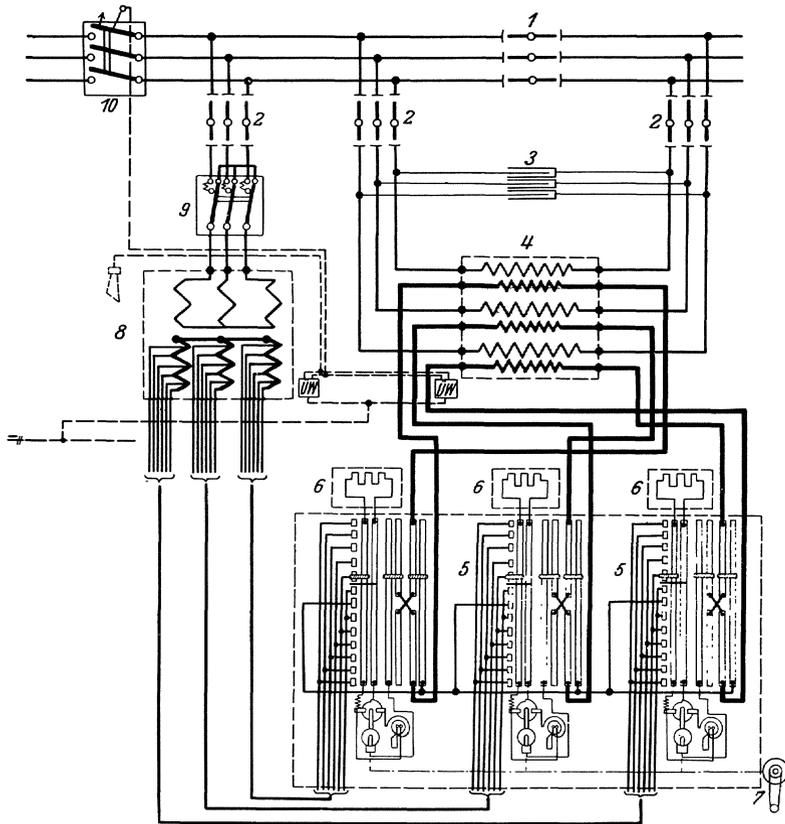


Abb. 306. Spannungsregelung mit Zusatz- und Erregertransformator, Stufenschalter im Erregerstromkreise.

1 Überbrückungstrennschalter. 2 Trennschalter. 3 Kondensatoren. 4 Zusatztransformator. 5 dreip. stufenschalter. 6 Übergangswiderstände. 7 Handantrieb. 8 Erregertransformator. 9 Anlaßschaltzschalter. 10 Hauptschalter.

Für die elektrische Auslegung des Regelsatzes ist zu beachten, daß die Spannungsabfälle in den Haupt- und Regeltransformatoren je nach der Durchgangsleistung und der induktiven Belastung des Netzes berücksichtigt werden müssen. Hinsichtlich der Stufenzahl, der Spannungssprünge und der Regelzeit gilt das unter 1. Gesagte ebenfalls.

Abb. 307 zeigt einen Regeltransformator für Freiluftanlagen der Bergmannwerke in der Schaltung als Zusatztransformator für eine Durchgangsleistung von 15000 kVA. Der Regelbereich beträgt

12½ vH in ± 8 Stufen, die Netzspannung 15000 V. Der Transformator besitzt außerdem eine feste Stufe von ± 5 vH. Jede Phase hat einen Regelschalter, der in einem Kessel unter Öl liegt. Die Überschaltwiderstände sind über den einzelnen Kästen auf Isolierstützen angeordnet. Die Verbindungsleitungen vom Schalter zum Transformator liegen in Brücken, die mit Öl gefüllt sind. Die Leitungen sind unter sich gegenseitig abgesteift, um bei Kurzschlüssen nicht zusammenschlagen zu können. Der Antriebsmotor ist in einem geschlossenen Gehäuse ein-

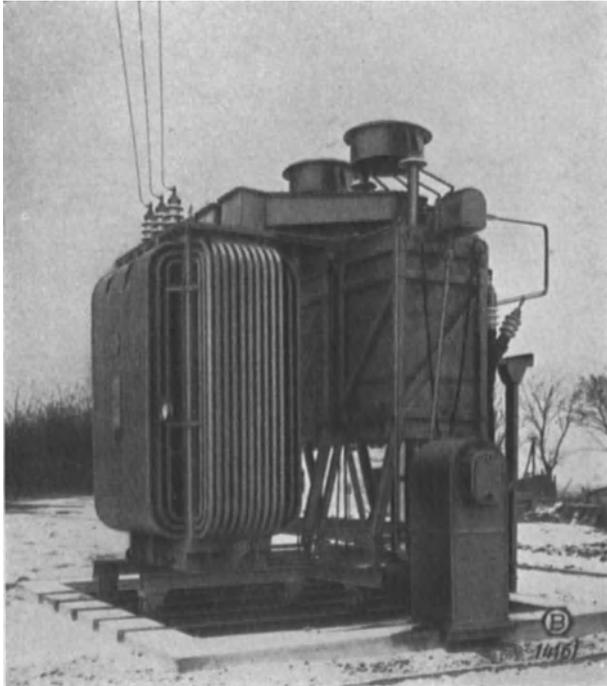


Abb. 307. Regeltransformator für Freiluftanlagen.

gekapselt. Die Steuerung erfolgt elektrisch durch ein besonderes Steuergerät. Außerdem ist Handantrieb durch eine aufsteckbare Kurbel vorgesehen.

Eine von den bisher behandelten grundsätzlich abweichende Ausführungsform ist die

Zu- und Gegenschaltung¹.

Diese Regelform hat in den letzten Jahren größere Bedeutung erlangt und besteht darin, daß je nach dem Regelbereich ein oder zwei Zusatztransformatoren in die Hauptleitung gelegt werden, deren Primär-

¹ Sessinghaus: Spannungsregelung in Drehstromnetzen mit Zusatztransformatoren und Regelschaltern. ETZ 1926, H. 29, S. 809.

wicklungen durch besondere Umschalter in Stufen hintereinander oder parallel oder gegeneinander geschaltet werden. Abb. 309 zeigt die sog. Reichenbach-Schaltung der S.S.W., die in dem im 63. Kap. im einzelnen behandelten Transformatorenwerke zur Anwendung gekommen ist.

Bei der Schaltung nach Reichenbach werden zwei Zusatztransformatoren verwendet, deren Zusatzspannungen sich wie 1 : 3 verhalten. Man erhält durch Zu- und Gegenschaltung und Kurzschließen der Erregerwicklung der Zusatztransformatoren vier Plus- und vier Minusstufen, die unter sich gleich groß sind, sowie eine Mittelstellung. Zur Schaltung bedient man sich für kleinere Leistungen eines Kontrollers, mit welchem es möglich ist, nacheinander die neun verschiedenen Span-

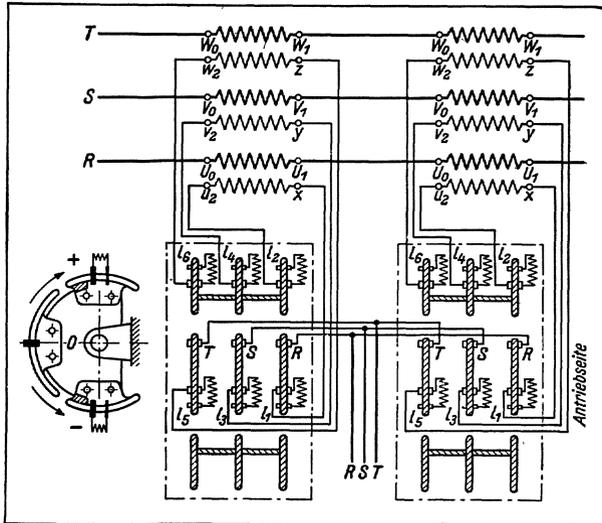


Abb. 308. Reichenbach-Regelschaltung.

nungsstufen einzustellen. Bei größeren Leistungen verwendet man Ölumschalter (Abb. 308).

Diese Regelform besitzt gegenüber dem Regeltransformator mit Windungsschalter den Vorteil, daß der Transformator keine Wicklungsabzweige erhält, also nach dieser Richtung konstruktiv unverletzt bleibt. Das ist besonders in Anlagen, in denen mit großen Kurzschlußleistungen zu rechnen ist, für die Sicherheit des Betriebes von hervorragender Bedeutung. Nicht zu empfehlen ist bei Verwendung von zwei Regeltransformatoren deren Zusammenbau in einem Kessel, weil darunter aus leicht erklärlichen Gründen die Betriebssicherheit und Betriebsbeweglichkeit leidet. Die einzelnen Spannungssprünge liegen zwischen 1,2 und 2 vH, der Umfang dieser Regelform zu ± 8 vH bei je 4 Stufen. Die Regelzeit beträgt bei Benutzung von Ölumschaltern etwa 10 sec für jede Stufeneinstellung. Der Platzbedarf dieser Regulierungseinrichtung ist verhältnismäßig groß.

3. Der Zusatztransformator mit festen Vorstufen. Sind die Regelgrenzen zu groß und läßt der Betrieb zu, daß zu gewissen Hauptjahreszeiten die Spannung an sich um einen bestimmten Betrag geändert werden kann, dann benutzt man vor dem Zusatztransformator noch einen besonderen Transformator als Vorstufe, der die Spannung um diesen festen Betrag ändert und die Regelgrenzen dadurch verkleinert. Auch hierzu noch ein Schaltbild zu geben, erscheint überflüssig. Ist diese feste Spannungsänderung nicht möglich, so muß dieser Vortransformator mit Windungsschalter versehen werden, der dann unter

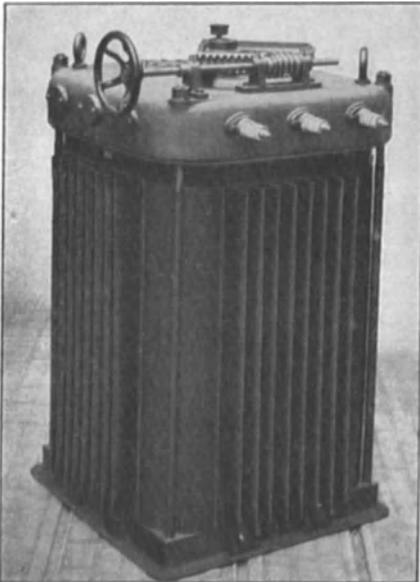


Abb. 309. Drehtransformator mit Handantrieb (betriebsfertig).

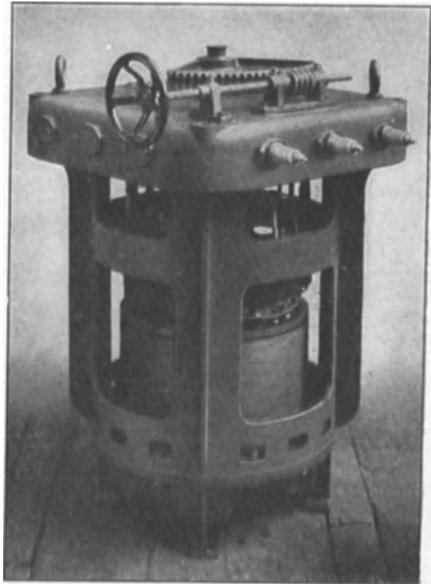


Abb. 310. Drehtransformator mit Handantrieb (Kessel abgenommen).

Last bedienbar ist. Vorteile und Nachteile ergeben sich sinngemäß aus dem bisher Gesagten.

4. Der drehbare Zusatztransformator (Drehtransformator, Induktions- oder Potentialregler). Das Folgende für Drehtransformatoren bezieht sich nur auf ihre Verwendung zur Netzregelung. 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. Die Ständerwicklung ist die Primärwicklung und dient zumeist als Erregerwicklung. Die Läuferwicklung gibt dann die Zusatzspannung und wird vom Netzstrom durchflossen. Der Läufer ist drehbar, kann aber nicht umlaufen, sondern wird mittels eines Zahnrad- oder Schneckenradvorgeleges von Hand oder durch einen Elektromotor verstellt. Abb. 309 zeigt einen derartigen Drehtransformator in betriebsfertigem Zustande mit Handantrieb, während in Abb. 310 der mit Kühlrippen versehene Ölkessel 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 Leistungsfaktor zu erhalten. Der Kessel wird mit Transformatoröl gefüllt. Neben dieser Form ist auch diejenige mit gewöhnlichem Motorgehäuse (Abb. 311) vielfach im Gebrauch. Die Schleifringe und Bürsten werden fast stets durch fest angeschlossene, bewegliche Kabelstücke ersetzt, einmal um die der Aufsicht und Bedienung unter-

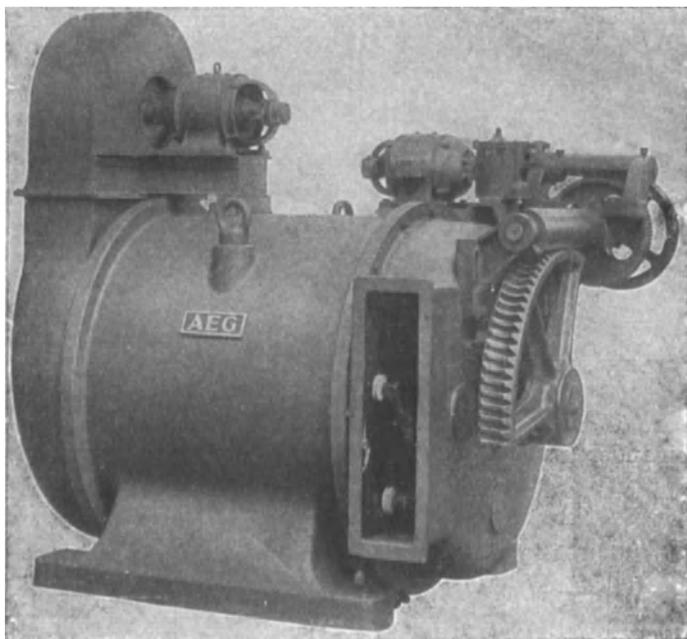


Abb. 311. Drehtransformator der AEG mit aufgebautem Lüfter.

worfenen 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.

Ganz allgemein kann der Drehtransformator entweder nach Art des Zweispulentransformators im Läufer und Ständer getrennte Wicklungen erhalten, oder auch als Spartransformator gebaut sein. Wann das erstere oder das letztere am Platze ist, wurde schon früher erörtert. Abb. 313 zeigt den Stromlauf für die Zweispulenform und die Abb. 314 die Schaltung als Spartransformator mit vorgeschaltetem Haupttransformator (*Trf.*).

Wie auf S. 54 bereits erwähnt wurde, ist ein stillstehender Wechsel- bzw. Drehstrom-Induktionsmotor nichts anderes als ein Transformator. Wird die Ständerwicklung als Erregerwicklung an eine Wechselstrom-

quelle mit gleichbleibender Spannung angeschlossen, so wird in der Läuferwicklung ebenfalls eine Spannung (Zusatzspannung) 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 gleichbleibende Höhe. Dreht man den Läufer, dann wird aber die Phase geändert und zwar in ihrer Richtung um 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. Schaltet man also

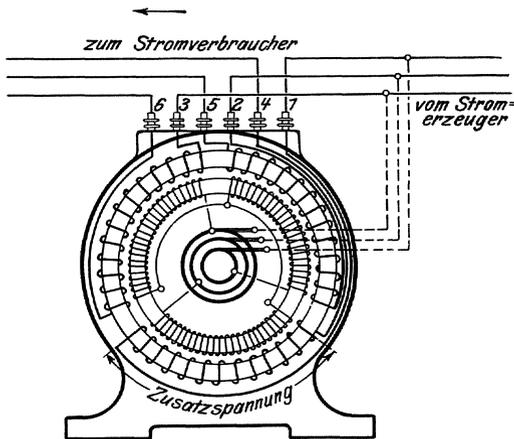


Abb. 312. Stromlauf des Drehtransformators (Zweispulventransformator).

die offene Läuferwicklung mit der den Ständer speisenden Zuleitung hintereinander (Abb. 314), so setzt sich die speisende Spannung U mit der Läufer Spannung U_z zu der geregelten Spannung U_R zusammen.

die offene Läuferwicklung mit der den Ständer speisenden Zuleitung hintereinander (Abb. 314), so setzt sich die speisende Spannung U mit der Läufer Spannung U_z zu der geregelten Spannung U_R zusammen.

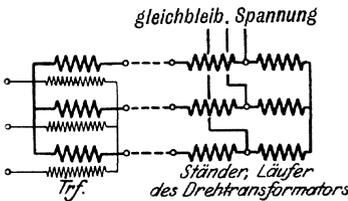


Abb. 313. Stromlauf des Drehtransformators (Sparttransformator).

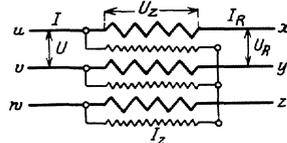


Abb. 314. Strom und Spannung bei der Drehtransformatorregelung.

Zum leichteren Verständnisse des elektrischen Vorganges ist in Abb. 315 das Spannungsdiagramm für einen Drehstrom-Drehtransformator einfacher Bauart gezeichnet. Die Netzspannung d. h. die Spannung, die z. B. vom Überlandwerk gehalten wird, sei:

$$U = Oa = Ob = Oc;$$

die Spannung, die an den Klemmen des Läufers herrscht, sei:

$$U_z = a a_1, b b_1, c c_1.$$

(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 gegen-

über, so fällt U_z in die Richtung von U , und es ist dann die resultierende Spannung:

$$U_R = U + U_z,$$

bzw. bei einer Drehung des Läufers um 180 elektrische Grade:

$$U_R = U - U_z.$$

Dieses sind die beiden Grenzstellungen. Für alle anderen Stellungen des Läufers zum Ständer ist U_R die Resultierende von U und U_z , und zwar

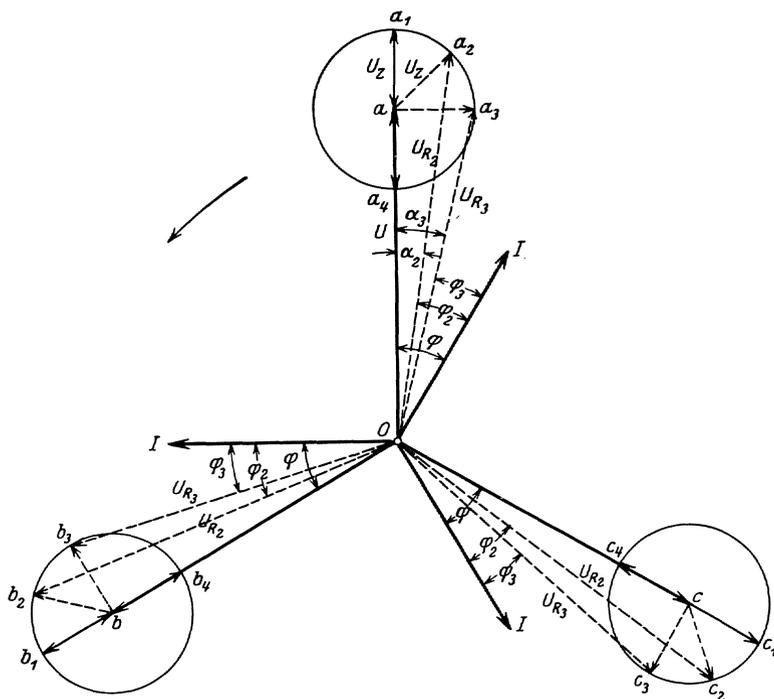


Abb. 315. Allgemeines Spannungsdiagramm eines Drehstrom-Drehtransformators.

ändert sich U_R entsprechend dem jeweiligen Winkel α zwischen U und U_z . Die im Läufer erzeugte Spannung setzt sich also je nach der Stellung des Läufers in beliebiger Phase zur Netzspannung geometrisch zu. Hieraus geht hervor, daß sich die geregelte Spannung U_R in der Phase ändert.

Ähnlich wie die Spannungen vor und hinter dem Drehtransformator sind auch die Ströme I und I_R nicht phasengleich. Werden Magnetisierungsstrom und Spannungsabfall vernachlässigt und induktionsfreie Belastung angenommen, also $\cos \varphi = 1$, so erhält man folgende einfache Beziehungen (Abb. 316). Der Strom I_R hat gegenüber der Zusatzspannung die Phasenverschiebung γ , die auch auf der Primärseite des Transformators, also zwischen U und I_z , dem Strom in der

Erregerwicklung, auftreten muß. I_z hat unabhängig von den Stellungen der Wicklungen zueinander stets den gleichen Wert:

$$I_z = I_R \cdot \frac{U_z}{U}.$$

Da also $I_z : I_R = U_z : U$ und wie aus Abb. 316 leicht erkenntlich auch die von ihnen eingeschlossenen Winkel gleich sind, ist das Spannungsdreieck dem Stromdreieck ähnlich. Hieraus folgt, daß der Winkel zwischen I und I_R der gleiche ist wie zwischen U_R und U . Es herrscht demnach vor und hinter dem Drehtransformator die gleiche Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung.

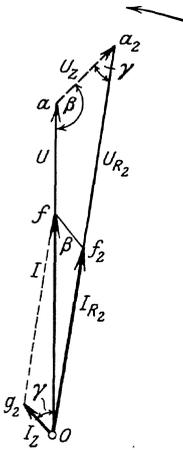


Abb. 316.

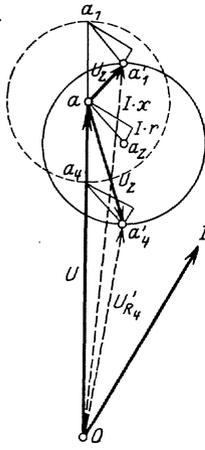


Abb. 317.

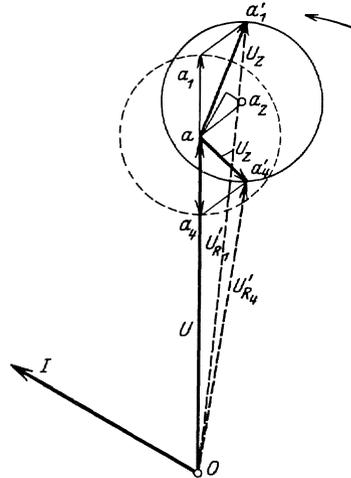


Abb. 318.

Abb. 316 bis 318. Stromdiagramme für den Drehtransformator.

Der Magnetisierungsstrom, der wegen des unvermeidlichen Luftspaltes zwischen Ständer und Läufer wesentlich größer als bei festen Transformatoren ist, etwa 10 bis 20 vH des Nennstromes, vergrößert den Phasenwinkel zwischen U und I , allerdings um einen praktisch vernachlässigbaren Wert.

Wesentlich beachtlicher ist der Spannungsabfall, der jedoch nur in den beiden ausgeprägten Stellungen, in denen die Zusatzspannung in Phase mit der erregenden Spannung liegt, von praktischer Bedeutung ist. Aus Abb. 316 war bereits zu ersehen, daß für jede Stellung des drehbaren Teils die Phasenverschiebung zwischen U_z und I_R sich ändert, der Drehtransformator also wie ein Transformator mit unveränderlichem Sekundärstrom, aber veränderlicher sekundärer Phasenverschiebung zu behandeln ist. Der Einfachheit halber soll wieder der Magnetisierungsstrom vernachlässigt werden, und es ergibt sich dann das Diagramm Abb. 317. Der Mittelpunkt a des Kreises, auf dem sich der Vektor U_z bewegt, verschiebt sich infolge des Ohmschen und induktiven Spannungsabfalles nach a_z . Der Spannungsabfall ist, solange I gegenüber U_z

Nacheilung hat, positiv und wird dann bei voreilem Strom negativ. Das Diagramm Abb. 317 gilt für ein Netz mit induktiver Belastung.

Umgekehrt stellt sich das Bild, wenn die Belastung stark kapazitiv ist: Die Spannung U_z wird in der zusetzenden Endstellung erhöht, in der absetzenden erniedrigt (Abb. 318).

Der Spannungsabfall ist bei Drehtransformatoren hauptsächlich wegen der allen Asynchronmaschinen eigentümlichen großen Streuung größer als bei gewöhnlichen Transformatoren. Er beträgt bei mittleren Größen und induktionsfreier Belastung etwa 8 vH, bei einem Netzleistungsfaktor von 0,8 etwa 20 vH der Leerlaufspannung und ist deshalb bei Feststellung der Regelgrenzen und der Erregerspannung zu beachten.

Auf den Läufer wird, wie bei jedem Drehstrommotor, ein Drehmoment ausgeübt, das durch eine selbstsperrende Schnecke aufgenommen werden muß.

Ein einfacher drehbarer Zusatztransformator kann mit anderen Transformatoren nicht parallel geschaltet werden, weil starke Ausgleichströme wegen der stets unveränderlichen Zusatzspannung und der dadurch notwendigen Verschiebung der geregelten Spannung auftreten, die im Grenzfalle zu einem unmittelbaren Kurzschlusse des Drehtransformators führen. Wird der Parallelbetrieb ausdrücklich verlangt — und das muß in ausgedehnteren Netzen zumeist der Fall sein — so verwendet man statt eines Drehtransformators zwei miteinander verbundene Transformatoren (Doppel-Drehtransformator) und schaltet die Ständerwicklungen parallel, während die Läuferwicklungen (Zusatzspannung) in Hintereinanderschaltung liegen (Abb. 320). Die Primärwicklungen müssen dann derart miteinander verbunden sein, daß die Drehfelder in entgegengesetztem Sinne umlaufen. 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 zu erreichen. Die Spannung in der zu regelnden Leitung kann auf diese Weise in Phase und Größe gleich der in der nicht geregelten Leitung gemacht werden.

Doppeltransformatoren sind demnach dort zu benutzen, wo die Größe der Zusatzspannung selbst oder die Phase der Zusatzspannung unabhängig von der Größenänderung zu regeln ist.

Aus dem Diagramm Abb. 319 ist ersichtlich, daß bei gleichem Drehwinkel die Resultierende sich zwar ihrer Größe nach, nicht aber in ihrer Phase gegen die erregende Spannung ändert. Andererseits kann man auch bei gleicher Stellung der beiden Vektoren U_z zueinander diese nicht in einander entgegengesetzter, sondern in gleicher Richtung

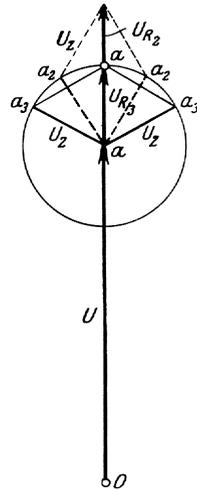


Abb. 319. Spannungsdiagramm für den Doppel-Drehtransformator.

drehen. Man ändert dann die Phase, nicht aber die Größe der Zusatzspannung. Drittens ist es auch möglich, durch verschiedene Drehgeschwindigkeit der beiden Vektoren U_z jeden der beiden Drehtransformatoren beliebig zu verstellen, so daß gleichzeitige Spannungs- und Phasenregelung erreicht wird. Diese Möglichkeit der gleichzeitigen Spannungs- und Phasenregelung ist von Vorteil bei Parallelarbeiten zweier Leitungen, von denen eine durch einen Drehtransformator geregelt werden soll.

Bei Verwendung des Doppeltransformators hat man es in der Hand, die Spannung in der geregelten Leitung der Phase und Größe nach gleich der in der nicht geregelten zu machen, so daß ein einwandfreier Parallelbetrieb gewährleistet werden kann. In der Regel, bei bekannten

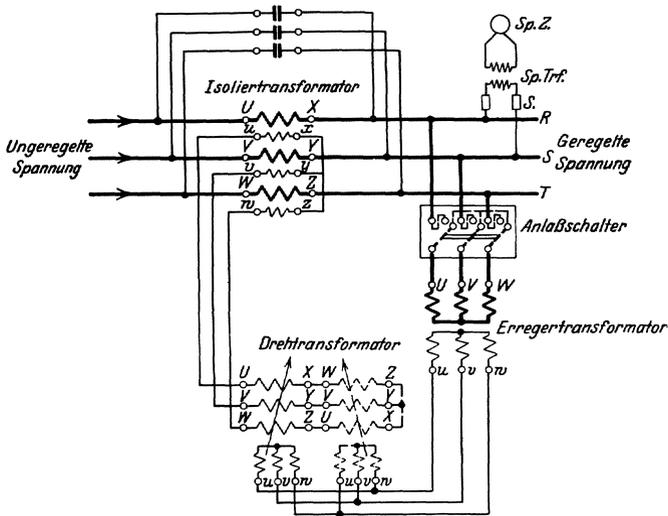


Abb. 320. Schaltbild für Doppel-Drehtransformator mit Isolier- und Erregertransformator.

Belastungsverhältnissen, genügt es, die Phase der resultierenden Zusatzspannung fest einzustellen und nur die Größe der Spannung während des Betriebes zu regeln. Die beiden Transformatoren werden dann mechanisch gekuppelt.

Der Drehtransformator kann auch zur Erzielung von Leistungsverschiebungen in Ringleitungen benutzt werden. Infolge des induktiven Spannungsabfalles muß jedoch außer der Spannung auch ihre Phase geregelt werden, es ist also ein Doppeltransformator erforderlich.

In der Regel wird bei allen Drehtransformatoren, welche unmittelbar an die zu regelnde Spannung angeschlossen werden, die Ständerwicklung als primäre oder Erregerwicklung, die Läuferwicklung als sekundäre oder Zusatzwicklung ausgeführt. Ist die zu regelnde Spannung so hoch, daß der Transformator nicht unmittelbar, sondern erst durch Zwischenschaltung eines festen Transformators (Erregertransformators) er-

regt werden kann, so wird der Läufer als primärer, der Ständer als sekundärer Teil ausgeführt. Ebenso wird bei sehr hohen Stromstärken der Ständer meist als sekundärer Teil gewickelt, da die Abführung hoher Stromstärken durch bewegliche Leiter verhältnismäßig schwierig ist. Die Abb. 320 zeigt die Schaltung mit Erregertransformator und einem zweiten, besonderen Isoliertransformator für die Zusatzwicklung, die Abb. 321 die Schaltung mit festem Vorstufentransformator (Zusatztransformator).

Der Betrieb fordert ferner, daß die Zusatztransformatoren jederzeit in den Stromkreis eingeschaltet oder aus diesem ausgeschaltet werden können, ohne daß es notwendig wird, die Leitung, in welcher der Regler

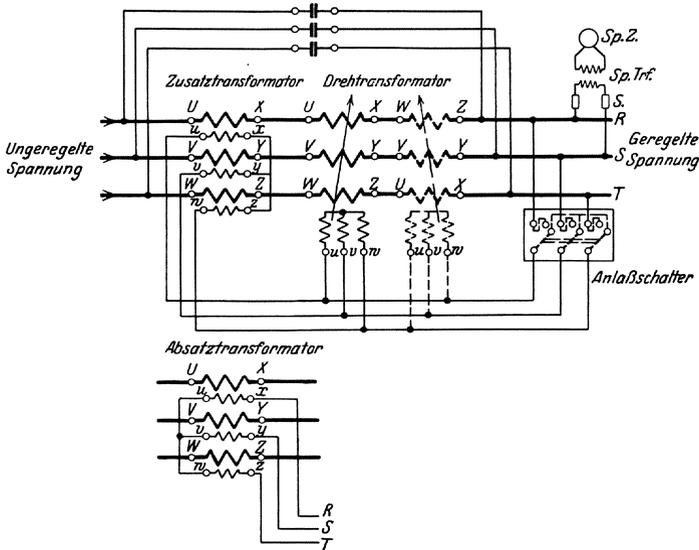


Abb. 321. Schaltbild für Doppel-Drehtransformator mit Zusatz- (Absatz-) Transformator.

liegt, stromlos zu machen. Diese Bedingung wird erfüllt bei Drehtransformatoren, welche aus zwei Transformatoren bestehen, dann, wenn bei ihnen die resultierende Zusatzspannung in einer bestimmten Lage der Läufer zu den Ständern den Wert = 0 erreicht. Ist die Zusatzspannung vorher nicht auf Null gebracht worden, so entsteht beim Zuschalten ein Kurzschluß, dessen Stärke von der Zusatzspannung abhängt, und welcher unter Umständen die ganze Anlage gefährden kann.

Bei Drehtransformatoren, welche nur aus einem Gerät bestehen, würde stets Kurzschluß und Betriebsstörung eintreten, falls sie in erregtem Zustande aus- oder eingeschaltet werden sollten, ohne vorher den Netzstrom zu unterbrechen. Weniger betriebsstörend ist es, die Reglerarten unerregt zu- oder abzuschalten, jedoch entstehen hierbei unliebsame Spannungsschwankungen, weil die Zusatzwicklung einen induktiven Spannungsabfall ergibt, welcher erst verschwindet, wenn

der Transformator erregt wird. Ist bei dieser Art der Zuschaltung der Netzstrom normal, so treten außerdem an der Erregerseite gefährliche Spannungen auf, weil das Eisen sehr hoch magnetisiert wird.

Zur Vermeidung dieser Übelstände werden die Schaltungen mit einem Schutz- und Anlaßschalter¹ ausgeführt (Abb. 321 und 322). Bei der Verwendung eines solchen Schalters braucht der Bedienungs-

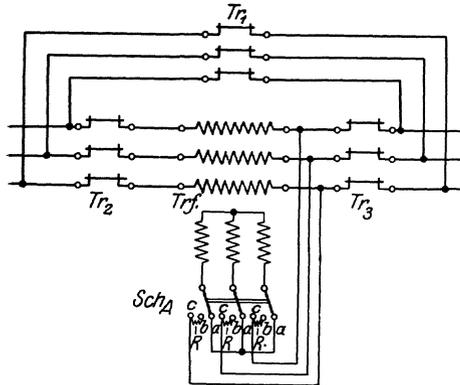


Abb. 322. Schutz- und Anlaßschalter für Drehtransformatoren.

besondere Ölswitcher; es genügen lediglich der Schutzschalter für die Erregung und neun Trennmesser gegenüber drei Ölswitchern und zwölf bis fünfzehn Trennmessern unter den alten Verhältnissen.

In der Betriebsstellung ist der Umgehungstrennschalter Tr_1 (Abb. 322) geöffnet, der Anlaßschalter Sch_A verbindet die Primärwicklung mit dem Netz über die Kontakte a . Wird der Schalter in der Ausschalttrichtung bewegt, so werden zunächst zwischen Netz und Wicklung die Widerstände R geschaltet, bei weiterer Bewegung die Kontakte b und a geschlossen, dadurch die Wicklung unmittelbar und das Netz über die Widerstände kurzgeschlossen. In der Endstellung ist das Netz ganz abgetrennt. Es kann nunmehr der Trennschalter Tr_1 geschlossen und der Transformator durch die Trennschalter Tr_2 und Tr_3 vollständig vom Netz getrennt werden. Das Einschalten geschieht in umgekehrter Reihenfolge, wobei die Widerstände noch als Schutzwiderstände zur Unterdrückung der Einschalt-Überspannungen dienen.

Um im Falle einer Störung im speisenden Netz durch plötzliches Ausbleiben der Spannung zu vermeiden, daß der Drehtransformator beim Wiederkehren der Spannung in der zuletzt innegehabten Stellung eine zu hohe Spannung gibt und damit die noch eingeschalteten Glühlampen gefährdet (S. 384), muß der Drehtransformator mit einer Einrichtung versehen werden, die ihn in seine Nullstellung zurückdreht und dann erst die Leitung wieder unter Spannung setzt. Zu diesem Zwecke wird der Anlaßschalter mit Spannungsrückgangsauslösung ver-

mann weder ängstlich die richtige Stellung des Reglers zu suchen, noch eine bestimmte

Reihenfolge verschiedener Schaltungen einzuhalten. Die einzige Bedingung ist, daß der Schutz- und Anlaßschalter beim Abschalten des Drehtransformators zuerst ausgeschaltet und beim Zuschalten zuletzt eingeschaltet wird. Als Hilfsschalter für die Abtrennung des Reglers sind nur einfache Trennmesser Tr . Abb. 322 erforderlich, nicht wie bisher an mehreren Stellen angeordnete

¹ D.R.P. 247048.

sehen. Spricht diese an, so wird der Anlaßschalter durch Federkraft in die Ausschaltstellung gezogen und durch besondere Hilfseinrichtungen der Drehtransformator in die Nullstellung zurückgebracht.

In Abb. 323 ist das vollständige Schaltbild für einen Drehtransformator gezeichnet, der selbsttätig mittels eines Spannungsrelais durch einen Elektromotor verstellt wird unter der Annahme, daß ein Isoliertransformator nicht erforderlich ist. Die vom Kraftwerke kommende Spannung wird dem Ständer zugeführt. Mit Hilfe des „Spannungsrelais“ und des „Schaltwerkes“ unmittelbar oder bei höherer Spannung unter Zwischenschaltung eines Spannungswandlers wird der „Antrieb“

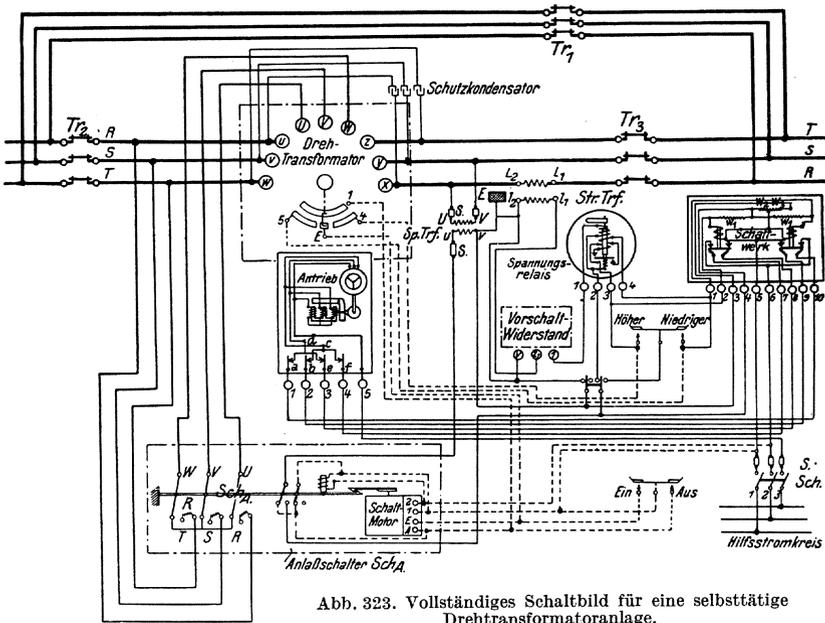


Abb. 323. Vollständiges Schaltbild für eine selbsttätige Drehtransformatoranlage.

und dadurch der Drehtransformator gesteuert. In einer Spannungsspule schwebt ein Eisenkern, der bei richtiger Spannung im Gleichgewichte ist und bei Spannungsschwankungen entsprechend den oberen oder unteren Kontakt schließt und dadurch das Schaltwerk einschaltet, durch das der Antriebsmotor des Drehtransformators Strom erhält. Derartige Relais sprechen schnell und sicher und schon bei ± 1 vH Spannungsänderung an. Das Schaltwerk wird aus dem Grunde benutzt, um die Leistung, 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.

Wie vorzüglich die Spannung auf diese Weise gleichbleibend gehalten werden kann, zeigen die Schreibstreifen der Abb. 324 für den Spannungsverlauf vor und hinter dem Drehtransformator im Betriebe eines Überlandwerkes.

Liegt der Drehtransformator am Anfange einer Leitung und ist die Spannung am Ende derselben unverändert zu halten, so wird noch ein Stromwandler in die Leitung eingeschaltet, dessen Sekundärseite über einen Widerstand kurzgeschlossen ist. Es wird hierdurch der Spannungsabfall in der Leitung künstlich hergestellt und von der Anfangsspannung in Abzug gebracht.

Handelt es sich um große Durchgangsleistungen, dann ist es unter Umständen erforderlich, den Drehtransformator künstlich zu belüften, weil derselbe infolge der ungünstigeren Abkühlungsverhältnisse gegenüber einem Motor, dessen Läufer die Belüftungsarbeit übernimmt, um etwa 30 bis 40 vH größer ausfällt als ein Einphasen- oder Drehstrommotor gleicher Leistung. Statt eines besonderen Lüfters und Druckluftkanales kann man auch den Lüfter in das Reglergehäuse einbauen, sofern dasselbe einem gewöhnlichen Motorgehäuse entspricht, und

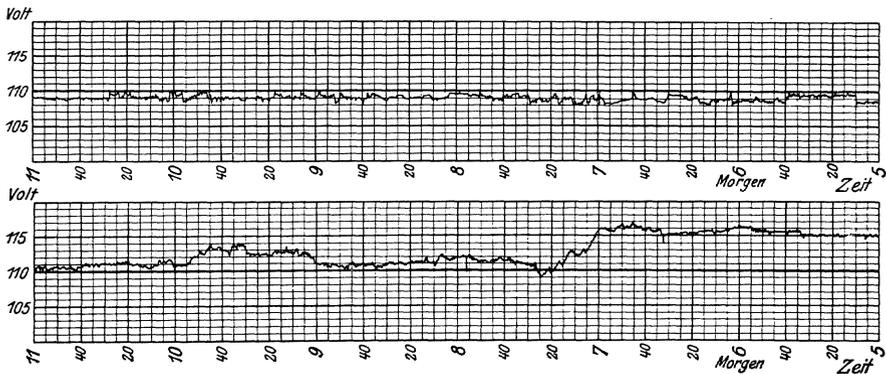


Abb. 324. Spannungsverlauf vor und hinter dem Drehtransformator.

denselben dann durch einen kleinen angebauten Motor antreiben. In Abb. 311 war eine derartige Ausführung von der AEG dargestellt, die in Anlage- und Beschaffungskosten natürlich billiger ausfällt als die Fremdbelüftung, aber durch die Leistung des Reglers begrenzt ist.

Der Parallelbetrieb mehrerer Drehtransformatoren¹. Hat in einer Anlage mit zwei oder mehreren Transformatoren jeder Transformator seinen Drehtransformator und wird gefordert, daß alle Transformatoren mit ihren Reglern parallel arbeiten sollen, so bedingt das auch einen einwandfreien Parallellauf der Drehtransformatoren oder mit anderen Worten stets genau gleiche Stellung der Reglerläufer. Andernfalls treten Ausgleichsströme auf, die die Regler und Transformatoren überlasten und dadurch gefährden. Auch die zusätzlichen Verluste sind nicht unbeachtlich.

Die gleiche Winkelstellung der Reglerläufer kann auf mechanischem Wege durch Kupplung der Wellen, und auf elektrischem Wege erreicht

¹ Erenyi, G.: Unterstation mit automatischer Spannungsregulierung durch parallel arbeitende Drehtransformatoren. AEG-Mitt. 1927, H. 6, S. 236.

werden. Die erstere Form ist bei größeren Reglern schwierig durchzuführen. Sie hat durch die Torsion der Kupplungsgestänge immer kleine Ungenauigkeiten und bereitet oftmals auch Schwierigkeiten durch die Aufstellungsmöglichkeit der Regler. Die elektrische Steuerung erfolgt unter Benutzung von Reglerwiderständen und besonderen Steuerrelais. Bei entsprechend sorgfältiger Montage und Überwachung dieser Steuereinrichtungen und der zugehörigen Leitungsanlage kann diese Form der Regelung ebenfalls einwandfrei erfolgen. Besonders wenn mehr als zwei Regler gleichzeitig gesteuert werden sollen, wird der elektrischen Verstellung der Vorzug zu geben sein. Die räumliche Aufstellung der Drehregler wird dann unabhängig. Allerdings ist dieser Parallelbetrieb mehrerer Drehtransformatoren eine schwer zu lösende Aufgabe, die sorgfältigster Bearbeitung bedarf.

Die Unterschiede bzw. Hauptvorzüge des Drehtransformators gegenüber dem Stufentransformator sind nun zusammengefaßt folgende: Der Hauptstrom hat nur eine feste Wicklung, also keine gleitenden oder verstellbaren Teile zu durchfließen, sofern der Ständer an der Hochspannungsleitung liegt. 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. Ein beachtlicher Nachteil besteht aber darin, daß die Verluste wesentlich größer sind als bei allen anderen Regelungsarten. Es ist daher, sofern die gleichmäßige Spannungsregelung nicht als Bedingung gilt, rechnerisch der wirtschaftliche Unterschied festzustellen. Zudem ist die Kurzschlußspannung des Drehtransformators besonders niedrig, seine Gefährdung durch Kurzschlußbeanspruchungen daher größer als die bei den festen Regeltransformatoren. Für sehr große Durchgangsleistung wird der Drehtransformator zu teuer und kommt dann nicht mehr in Frage. Auch bei kleinen und mittleren Leistungen und mittleren Spannungen ist sein Beschaffungspreis höher als der für die anderen Regelungsarten.

Neben der Aufgabe, die Spannung zu ändern, kann der Drehtransformator 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.

5. Der Schubtransformator. Eine stetige Spannungsregelung wird auch mit dem von Koch & Sterzel, Dresden, hergestellten sog. Schubtransformator erreicht. Aufbau und Wirkungsweise dieses Transformators sind kurz folgende:

Abb. 325 zeigt den technischen Aufbau mit umkehrbarer Stromrichtung in drei Hauptstellungen. Es ist K ein Eisenkern, welcher in einer Aussparung die Sekundärwicklung W_s trägt. Die beiden Joche werden mit ihren Ansätzen J_1 und J_2 auf die Gleitflächen des Kernes K gepreßt, so daß zwischen dem verschiebbaren Joch und dem Kern praktisch kein größerer Luftspalt als bei einem gewöhn-

lichen Transformator vorhanden ist. Die zwei entgegengesetzt gewickelten Primärspulen W_1 und W_2 erzeugen einander entgegen gerichtete Kraftflüsse. In der Mittelstellung unterliegt demnach die Sekundärspule der Einwirkung beider entgegengesetzt wirkender, also in ihrer Wirkung in bezug auf die Sekundärspule sich aufhebender Primärspulen W_1 und W_2 ; mithin ist die Klemmenspannung der Sekundärspule Null.

Werden die Joche J von dieser Mittelstellung aus nach der einen oder anderen Richtung verschoben, so erlangt mit fortschreitender Bewegung die eine oder andere Primärspule das Übergewicht, bis in der Endstellung nur eine Primärspule die Sekundärspule induziert. In den Endstellungen arbeitet die jeweilige Primärspule konzentrisch mit der Sekundärspule. Die Streuspannung ist sehr niedrig und demzufolge stehen sich die Primär- und Sekundärvektoren wie bei jedem gewöhnlichen Transformator um 180° gegenüber.

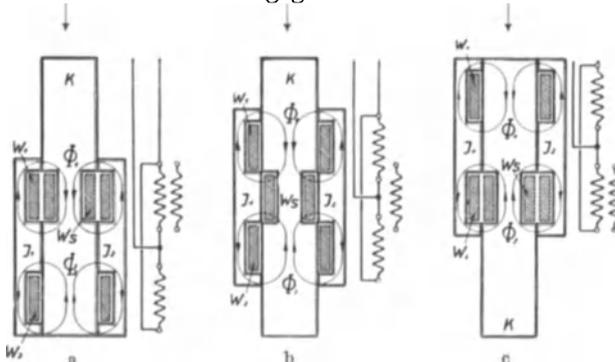


Abb. 325. Arbeits- und Wirkungsweise des Schubtransformators.

Beim Übergange von einer Endstellung zur anderen kehrt sich in der Mittelstellung die sekundäre Stromrichtung um. Bei gleichmäßiger Verteilung der Sekundärwindungen auf die Länge der Kernaussparung wird verhältnismäßig der Kernverschiebung die Sekundärspannung stufenlos geändert. In Abb. 325a arbeitet die obere Primärspule W_1 mit der Sekundärspule W_2 zusammen, während die untere parallelgeschaltete Primärspule W_2 mit ihrem zugehörigen Kerne ohne Sekundärspule leerrläuft.

Infolge der Primärdoppelspule und des vollkommenen Eisenschlusses ist die Solenoidwirkung — Zugwirkung in Richtung der Längsachse — praktisch ausgeglichen, so daß einer Verschiebung des Joches fast nur mechanische Widerstände entgegenstehen. In der Mittelstellung wird der Eisenschluß unterbrochen; ein starkes Ansteigen des Leerstromes und Wirbelströme in der Sekundärspule sind immerhin noch vorhanden.

Die neueren Bauformen besitzen Aufteilung der Sekundärspulen in mehrere Kernaussparungen, wodurch die Raum- und Baustoffausnutzung besser werden.

Für den Drehstrom-Schubtransformator werden drei Einphasentransformatoren konstruktiv zu einer Einheit verbunden. Die Primärspulen werden dabei in Dreieck, die Sekundärspulen in Zickzack geschaltet, so daß dann ein Parallelarbeiten mit anderen Netzen möglich ist. Abb. 326 zeigt die praktische Ausführung dieses Schubtransformators und in Abb. 327 sind die Regelkennlinien bei verschiedenartiger Belastung wiedergegeben. Der Antrieb kann von Hand oder

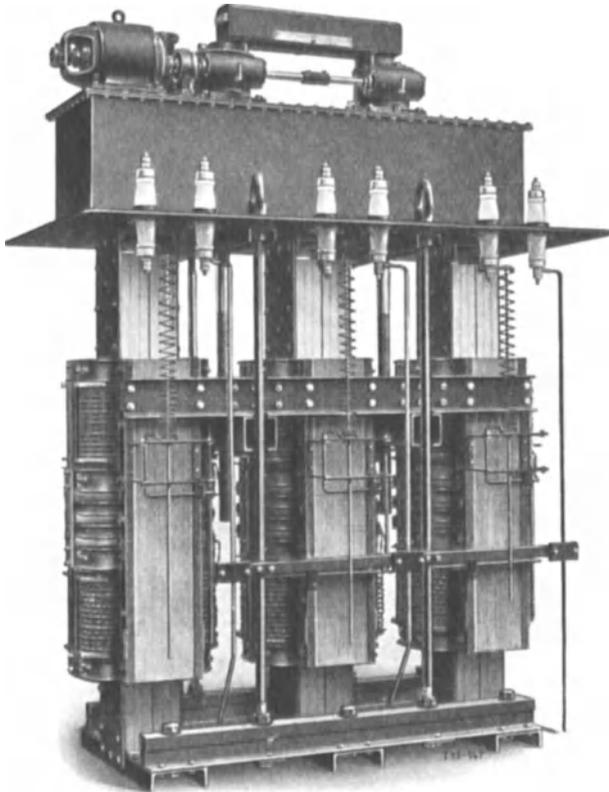


Abb. 326. Schubtransformator für Drehstrom von Koch und Sterzel.

motorisch und auch selbsttätig erfolgen. In Hochspannungsnetzen ist gegebenenfalls ein Erregertransformator erforderlich.

Schließlich soll noch kurz darauf hingewiesen werden, daß die AEG neuerdings eine stetige Regelung bei Stufentransformatoren dadurch herbeiführt, daß sie die einzelnen Schaltstufen durch eine Schaldrossel überbrückt.

6. Die synchrone und asynchrone Blindleistungsmaschine. Der Spannungsabfall in den Hauptzuführungsleitungen zusammen mit dem Spannungsabfall in den Haupttransformatoren ändert sich mit der

Höhe der Belastung nach Wirk- und Blindleistung. Es wird also die Spannungsregelung zu einem Teile diesen Spannungsänderungen Rechnung zu tragen haben. Die sog. Konstanten der fertigen Leitung (Ohmscher Widerstand, Reaktanz, Kapazität) können nicht geändert

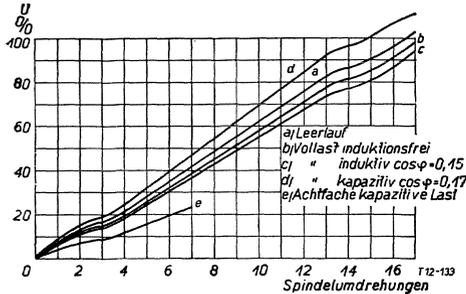


Abb. 327. Regelkennlinien des Schubtransformators bei verschiedenartiger Belastung.

werden, der Leistungsfaktor, mit welchem der Strom auf der Sekundärseite der Transformatoren abgenommen wird, ergibt sich als resultierender Leistungsfaktor der angeschlossenen Verteilungsnetze und -anlagen. Je nachdem der zu deckende Blindstrom zwischen großen und kleinen Werten schwankt, ändert sich auch die Spannung auf der Sekundärseite der Transformatoren und damit für die angeschlossenen Netzteile. Die Kompensation dieses Blindstromes in bezug auf die Primärseite der Transformatoren und die Generatoren im Kraftwerke hat demnach zur Folge, daß der Spannungsabfall auf der Sekundärseite der Transformatoren geändert, d. h. geregelt werden kann. Diese Art der Spannungsregelung verlangt also Erzeugung der Blindleistung auf der Sekundärseite der Transformatoren, so daß die Transformatoren, die Zuführungsleitungen und die Generatoren mit den Kraftwerkstransformatoren vom Blindstrom entlastet werden.

Zur Erzeugung von Blindleistung in großen Ausmaßen dienen, wie bereits mehrfach angegeben, Synchron- oder Asynchron-Phasenschieber oder auch Blindleistungsmaschinen genannt. Das sind leerlaufende Synchron- bzw. Asynchrongeneratoren, die durch die Einstellung bzw. Art ihrer Erregung keinen Wirkstrom, sondern nur Blindstrom erzeugen und hierin geregelt werden können. Ihre Größenbestimmung, also ihr Regelbereich, und die sonstige rechnerische Verfolgung dieser Art von Spannungsregelung kann hier im einzelnen nicht behandelt werden, weil das in das Kapitel der Fernleitungsberechnung fällt und erst im II. Bande ausführlich zur Besprechung kommt. Nur der Vollständigkeit wegen sollen daher noch einige allgemeinere Angaben gemacht werden, wann diese Regelungsform brauchbar, zweckmäßig und wirtschaftlich ist, um unnötige Untersuchungen zu vermeiden.

Brauchbar ist diese Regelart überall dort, wo mit großen Blindströmen der Abnehmer, also mit schlechtem Leistungsfaktor zu rechnen ist. Das ist bei allen ausgedehnten Netzen mit viel Kleinverteilung für kraftwirtschaftliche Zwecke der Fall, sofern die Kleinverteilung auch mit Drehstrom erfolgt. Hier schwanken die Leistungsfaktoren bezogen auf ein Haupttransformatorwerk wie schon des öfteren betont in der Hauptsache am Tage zwischen 0,5 bis 0,7 und gehen des Abends bis 0,9.

Es wird also die Spannungsregelung zu einem Teile diesen Spannungsänderungen Rechnung zu tragen haben. Die sog. Konstanten der fertigen Leitung (Ohmscher Widerstand, Reaktanz, Kapazität) können nicht geändert werden, der Leistungsfaktor, mit welchem der Strom auf der Sekundärseite der Transformatoren abgenommen wird, ergibt sich als resultierender Leistungsfaktor der angeschlossenen Verteilungsnetze und -anlagen. Je nachdem der zu deckende Blindstrom zwischen großen und kleinen Werten schwankt, ändert sich auch die Spannung auf der Sekundärseite der Transformatoren und damit für die angeschlossenen Netzteile. Die Kompensation dieses Blindstromes in bezug auf die Primärseite der Transformatoren und die Generatoren im Kraftwerke hat demnach zur Folge, daß der Spannungsabfall auf der Sekundärseite der Transformatoren geändert, d. h. geregelt werden kann. Diese Art der Spannungsregelung verlangt also Erzeugung der Blindleistung auf der Sekundärseite der Transformatoren, so daß die Transformatoren, die Zuführungsleitungen und die Generatoren mit den Kraftwerkstransformatoren vom Blindstrom entlastet werden.

Werden größere Netzteile aus Umformern gespeist, die ihrerseits den Leistungsfaktor ihrer Abnehmer regeln, so ist diese Art der Spannungsregelung durch besondere Maschinen von vornherein unwirtschaftlich also nicht brauchbar, weil sie nicht ausgenutzt werden kann, in Anschaffung und Betrieb dann auch zu teuer wird.

Zweckmäßig ist der Einbau von besonderen Phasenschiebern nur in großen Transformatorenwerken mit langen Hochspannungszuführungsleitungen mittlerer und hoher Spannung, um die Hauptregelung großer Gebiete von einer Stelle aus vornehmen zu können. Verteilung kleinerer Maschinen auf mehrere Anlagen wird — was rechnerisch leicht geprüft werden kann — unzulässig, weil wiederum Anschaffung mit allem Zubehör, Bedienung, Unterhaltung und Eigenverluste sich mit dem erreichbaren Nutzen wirtschaftlich nicht die Waage halten. Arbeitet die Fernkraftübertragung mit sehr hoher Spannung, dann wird unter Umständen die Regelung der Spannung durch Phasenschieber zur Notwendigkeit zum Ausgleich von Induktivität bei großer Belastung und Kapazität bei Leerlauf. Hier wird also auch eine Spannungserhöhung mit zu kompensieren sein.

Wirtschaftlich schließlich ist diese Art der Spannungsregelung gegenüber den anderen Formen in der Mehrzahl der Fälle nicht. Abgesehen von dem wesentlich größeren Kapitaldienste und den Nebenausgaben hat der Phasenschieber zur Deckung seiner Verluste einen Eigenverbrauch, der je nach der Maschinengröße bei kleinen Einheiten etwa 4 bis 10 vH, bei großen etwa 3 bis 4 vH der Maschinenleistung beträgt. Es ist ihm also noch Wirkstrom zu liefern und dieser demnach in der Selbstkostenrechnung für die Stromerzeugung oder Übertragung entsprechend zu berücksichtigen. Das ist mit der Hauptgrund, daß Phasenschieber nur verhältnismäßig selten und in der Hauptsache nur dort angewendet werden, wo die elektrischen Verhältnisse auf den Hochspannungsfernleitungen die Blindlastkompensation an sich fordern.

K. Schaltbild und Aufbau vollständiger Transformatorenanlagen.

56. Der Entwurf des Schaltbildes.

a) Allgemeine Regeln. Bevor man zum Entwurfe einer Transformatorenanlage, zur Ausgestaltung des Aufbaues, zur Feststellung des Raumbedarfes und zur Ermittlung der Kosten schreiten kann, muß ein Schaltbild 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 Schalt- und Meßgeräte notwendig, verlangt oder erwünscht sind. Das Schaltbild bildet das Gerippe für die Gesamtanlage bei Entwurf und Betrieb, gleichgültig ob nur ein

kleiner Transformator mit einem Anschluß oder mittlere und große Anlagen 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 Transformatoranschaltungen und die Aufgaben sind, die mit Hilfe dieser so außerordentlich einfachen und wirtschaftlich arbeitenden Geräte in dem großen Gebiete der Wechselstrom-Kraftübertragung gelöst werden können.

Nach dem Schaltbilde richtet sich sowohl der vollständige Aufbau einer Transformatoranlage, demnach also der Preis als auch die Bedienung, Aufsicht, Betriebsführung und Betriebssicherheit aller Einrichtungen. In jeder Anlage muß ferner nach den Vorschriften des VDE ein solches Schaltbild vorhanden und deutlich sichtbar befestigt sein, damit man sich jederzeit über den Stromlauf, die Zugehörigkeit von Geräten zu den einzelnen Stromkreisen usw. schnell unterrichten kann. Das ist für die Betriebsregelung und bei Untersuchungen bzw. Instandsetzungsarbeiten an einzelnen Anlagenteilen unbedingt notwendig, um Gefährdungen jeder Art zu verhüten.

Der Besprechung ausgeführter Anlagen kleiner und größter Leistungen und Spannungen soll zunächst die Behandlung der allgemeinen Gesichtspunkte für den Entwurf eines Schaltbildes und für die Wahl der Meßgeräte vorangehen, damit der entwerfende Ingenieur in erster Linie kennenlernt, wie er bei seinen Überlegungen vorzugehen hat. Bei der großen Zahl der Schaltungsverschiedenheiten und der Anlagenausrüstungen ist es natürlich nicht möglich, alle Schaltbilder zu behandeln. Dafür werden aber die gegebenen Schaltbilder nicht nur beschrieben, sondern auch kritisch geprüft werden. Ferner sind nur Drehstromanlagen in die Betrachtung gezogen worden, weil diese Stromart für die Kraftübertragungen heute in der Mehrzahl der Fälle zur Anwendung kommt, Einphasenstrom dagegen nur für Bahnzwecke benutzt wird. Es wird dann nicht schwer sein, aus dem Gesagten entsprechende Schlüsse für Ein- und Zweiphasenanlagen zu ziehen. Über die Schalt- und Meßgeräte und allgemeinere Fragen des Schaltanlagenbaues ist Ausführliches im IV. Bande gegeben.

Als eine Hauptbedingung für jede Anlage ist in erster Linie zu fordern, daß der Aufbau derselben einfach und klar gestaltet, an Schalt- und Meßgeräten nichts zu viel, aber auch nichts zu wenig genommen wird, und daß die Wahl und die Anordnung in den Ober- und Unterspannungstromkreisen streng nach der Eigenart der Anlage (Strecken-, Gruben-transformator), der Höhe der Spannung und Leistung, der unbedingt notwendigen Betriebssicherheit und dem Betriebswerte der Anlage (Hauptwerk, kleine Nebenanlage usw.) getroffen wird.

Hiernach und in Erweiterung dieser Hauptbedingungen sind ganz allgemein folgende Regeln für die elektrische Gestaltung zu beachten:

der Aufbau der Gesamtanlage soll soweit irgend möglich in allen Teilen übersichtlich gestaltet sein, um der Betriebsführung in den Schalthandlungen größte Sicherheit zu geben und dadurch Fehlschaltungen, die zu Stromunterbrechungen und Unglücksfällen führen, zu verhüten;

schnelle und sichere Eingrenzung von Fehlern und Störungen innerhalb der Anlage selbst insbesondere bei Ölbränden, Ölverqualmung, atmosphärischen Einwirkungen;

leichte Instandsetzung einzelner Teile ohne Betriebseinschränkungen bzw. Betriebsunterbrechungen, desgl. leichte und gefahrlose Reinigung;

gute Beobachtung nach allen Richtungen, leichte Erweiterungsfähigkeit; günstiges Baugelände mit einfacher An- und Abfuhr auch der schwersten Stücke (Gleisanschluß für große Werke), reine Luft der Umgebung (Sonderfälle ausgenommen), Vorhandensein von Wasser; günstige Lage des Werkes für das Eingreifen von Hilfskräften und zu den Unterkünften für die Bedienung;

Schutz vor dem Übergreifen von Brand und Naturereignissen aus der Umgebung (Überschwemmung).

Diese Regeln lassen erkennen, daß der Inangriffnahme eines Entwurfes sorgfältige Vorprüfungen vorausgehen müssen, will man nicht nach Erstellung der Anlage aus dem Betriebe heraus bald Schwierigkeiten gegenüberstehen, die dann zu beheben oftmals — wenn überhaupt möglich — große Geldaufwendungen verursachen. Die Wünsche der Betriebsführung müssen in erster Linie erfüllt sein und zu diesen gehören sämtliche in den Regeln genannten Punkte. Das gilt ganz besonders für alle Anlagen, die der öffentlichen Stromversorgung dienen, in denen also Störungen unter Umständen die schwersten Folgen nach sich ziehen können. Weitere Einzelheiten zu geben erscheint überflüssig, wenn bedacht wird, welche Gefahren bestehen, sofern z. B. eine Stadt mit Bahnhof, Theatern usw. in der abendlichen Hauptverkehrszeit plötzlich, und sei es auch nur auf kurze Zeit, ins Dunkel gesetzt wird.

b) Das Schaltbild. Für den Entwurf des Schaltbildes allgemein sind bestimmend der Anschluß des Werkes an einen Leitungsstrang überspannungsseitig als:

1. Kopfanlage,
2. Durchgangsanlage,

ferner die Ausgestaltung der Ober- und Unterspannungsseite:

3. ohne Sammelschienen,
4. mit Einfachsammelschienen,
5. mit Doppelsammelschienen.

Über diese 5 Punkte muß zunächst Entscheidung getroffen werden. Sie sind nach folgenden Gesichtspunkten zu beurteilen.

Bei der Kopfanlage (einfache Stickleitung, Radialanordnung in der Leitungsführung vom Kraftwerk oder einem Hauptspeisepunkte aus) endet die Stromzuführung im Werk, seien es nur ein Anschluß nach Abb. 328 oder zwei und mehrere nach Abb. 330. In Abb. 328 liegen die Transformatorenwerke A_1 bis A_4 parallel an der Hauptleitung, während im Werk A_5 die Leitung endet. In Abb. 328 bis 332 sind die Werke A_5 Kopfanlagen. Werden die in Abb. 328 bis 332 gezeichneten ein bzw. zwei Stromverteilungsleitungen (Hauptleitungen) von zwei Kraftwerken gespeist (wie rechts angedeutet), so sind in den Gesamtanlagen keine Kopfwerke im eigentlichen Sinne dieser Bezeichnung vorhanden.

Bei den Durchgangsanlagen allgemein liegen die einzelnen Werke überspannungsseitig gesehen hintereinander.

Schon aus der zeichnerischen Darstellung ist zu erkennen, welchen Raum für die Stromzuführung die verschiedenen Werksanschluß-

möglichkeiten erfordern. Hierin und in dem sich dadurch ergebenden Kostenunterschiede liegen einesteils die Unterscheidungsmerkmale. Anderenteils wird die Anschlußform bestimmt durch die sichere Aufrechterhaltung der Stromlieferung für den Fall, daß auf der Zuführungs- bzw. Hauptverteilungsleitung an irgendeiner Stelle oder in den miteinander verbundenen Werken einschließlich des oder der Kraftwerke Störungen eintreten. Die Wahl hat daher auch unter Einschluß der zu verwendenden oder bei Eingliederung neuer Anlagen in eine vorhan-

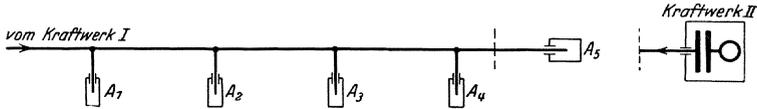


Abb. 328.

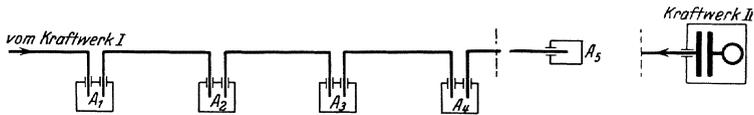


Abb. 329.

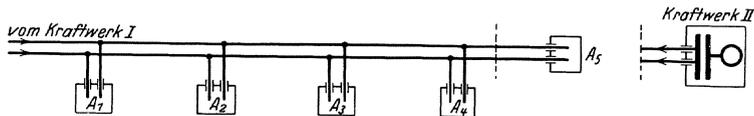


Abb. 330.

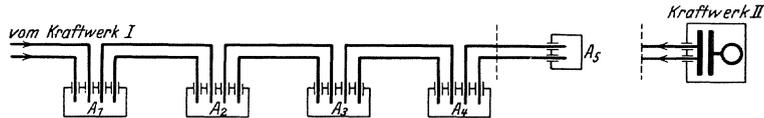


Abb. 331.

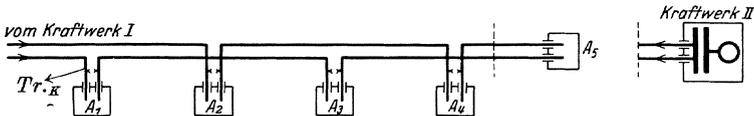


Abb. 332.

Abb. 328 bis 332. Verschiedene Anschlußformen von Transformatorenwerken an Einfach- und Doppelspeiseleitungen mit ein- oder zweiseitiger Stromzuführung.

dene Leitung des bereits vorhandenen Überstromschutzes zu erfolgen. Bei Einfachleitung, Parallelabzweigung also Kopfwerk und einseitiger Speisung beeinflusst eine Störung auf der Leitung alle zwischen Störungsstelle und Kraftwerk liegenden Werke. Wird die Durchgangsform gewählt, so wird dadurch eine Einschränkung der Störungsübertragung herbeigeführt. Die Doppelleitung vermindert naturgemäß die Störungsausdehnung weiter wesentlich. Der Anschluß der einzelnen Werke kann dann nach Abb. 330 oder 331 erfolgen.

Abb. 330 zeigt die Parallelabzweigung. Sie ist nach der bisher geübten Praxis in Vergleich zu stellen zu Abb. 331. Der Unterschied

hinsichtlich der Raum- und weiter auch der Anlagekosten für Schalter, Sammelschienen, Einführungen usw. ist aus den Zeichnungen ohne weiteres zu ersehen. Betriebstechnisch hat die Schaltung nach Abb. 330 wiederum Nachteile gegenüber Abb. 331 darin, daß Störungen auf den Leitungen größere Rückwirkungen auf alle Werke ausüben. So z. B. kann eine Störung an den Leitungseinführungen des Werkes A_5 (ungünstigster Fall) die betreffende Hauptleitung bis zum Kraftwerk und damit alle angeschlossenen Werke außer Betrieb setzen. Es ist dann zu prüfen, ob die nicht gestörte Hauptleitung die ganze Energiemenge bei ausreichenden Spannungsverhältnissen noch übertragen kann. In Abb. 331 würde bei dieser Störung nur der betreffende Leitungsstrang zwischen A_4 und A_5 ausfallen. Diese und ähnliche Untersuchungen sind durchzuführen, bevor zwischen den einzelnen Anschlußmöglichkeiten entschieden wird. Naturgemäß spielt dabei auch die Größe und Bedeutung der einzelnen Anschlußwerke eine ausschlaggebende Rolle.

Für die Schaltung nach Abb. 328 und 330 kann weiter kein sog. Wahlschutz (Selektivschutz) für den Überstromschutz zur Verwendung kommen, der nach den neuesten Betriebserfahrungen doch beachtliche Vorzüge besitzt. Bei kleinen unbewachten Werken wird der Wahlschutz nicht angewendet. Sie sind daher am besten parallel anzuschließen und in ihrem Überstromschutz derart auszubilden, daß Transformator- oder Sekundärstörungen lediglich das betreffende Werk abschalten. Bei Hauptwerken in Höchstspannungsnetzen wird dagegen die Schaltung nach Abb. 329 bzw. 331 vorzugsweise benutzt.

Zwischen den bisher behandelten Anschlußformen liegt die Schaltung nach Abb. 332, die noch wenig Eingang in die Praxis gefunden hat. Hier wird die Doppelleitung zu einer Ringleitung gestaltet durch wechselseitigen Anschluß der einzelnen Werke. Dabei ist es weniger von Bedeutung, ob einseitige oder zweiseitige Speisung erfolgt. Das besondere Studium dieser Anschlußform kann empfohlen werden, zumal sie sich dort, wo sie benutzt wird, bereits bewährt hat¹. Sie verbindet die Vorteile der Doppelleitung mit denen der Ringleitung und gestattet zudem mit einfacheren Mitteln die Benutzung des Wahlschutzes. Die Untersuchungen in leitungstechnischer Hinsicht sind im II. Bande durchgeführt. Allerdings bedarf diese Anschlußform noch einer Kunstschaltung, um der Doppelleitung nach Abb. 331 gleichwertig zu werden. Diese liegt darin, daß einmal die Innentrennschalter bei Gebäudeanlagen $Tr_{.1}$ (in den folgenden Schaltbildern) nach außen vor die Gebäudeeinführung gelegt werden und außerdem ein Kuppeltrennschalter Tr_K zwischen beiden Leitungen verwendet wird. Die betriebstechnischen Vorzüge werden weiter unten bei der Besprechung der Schaltbilder noch besonders behandelt werden. In Abb. 332 bzw. 341 ist der Kuppeltrennschalter angedeutet. Abb. 333 und 334 zeigen die Gegenüberstellung in der Trennschalteranordnung. Sind die überspannungsseitigen Anschlußleitungen von der Haupt-

¹ Diese Anschlußform zusammen mit der Kunstschaltung soll als Thüringenwerksschaltung bezeichnet werden, da die Thüringische Landeselektrizitätsversorgung sie, so weit bekannt, wohl zuerst entwickelt und angewendet hat.

leitung zum Transformatorenwerke von beträchtlicher Länge, so daß auch auf diesen unter Umständen Störungen vorkommen können, die in der Schaltung mit erfaßt werden sollen, so ist mit praktisch befriedigendem Erfolge am Abzweigmaste die Leitung derart ausgebildet worden, daß verhältnismäßig schnell eine Notverbindung als Ersatz des Kuppeltrennschalters geschaffen und die gestörte Anschlußleitung spannungslos gemacht werden kann, Abb. 334. Für den Fall, daß bei zunächst nur einer Hauptleitung und dem Werksanschluß nach Abb. 329 Erweiterungen die Verlegung des zweiten Stromkreises nötig machen, kann die Schaltung nach Abb. 332 mit ganz besonderem Vorteil und ohne die Einzelwerke zu ändern ebenfalls benutzt werden. Liegen die Durchgangswerke in der Hauptleitung nach

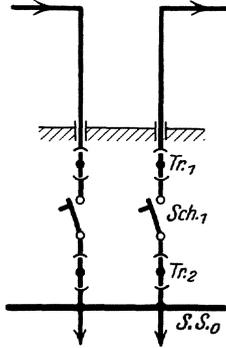


Abb. 333. Durchgangsspeisung mit Innentrennschaltern.

Abb. 335, so ist auch hier die Kuppelungsverbindung herstellbar dadurch, daß das entsprechende Werk umgangen wird. Bei zweiseitiger Speisung genügt es, nach Abschaltung der betreffenden Stromzuführung einfache Leitungstrennung durch Lösen der Isolatorbrücken an den Abspannmasten vor dem Werke vorzunehmen, die nach Beendigung der Instandsetzung zu geeigneter Betriebszeit wieder geschlossen werden. Bei einseitiger Speisung empfiehlt sich der Einbau von Trennschaltern an den Masten (Abb. 336). Diese und die Kuppeltrennschalter sind je nach den Betriebsanforderungen entweder von Hand oder motorisch mit Fernbetätigung schaltbar einzurichten.

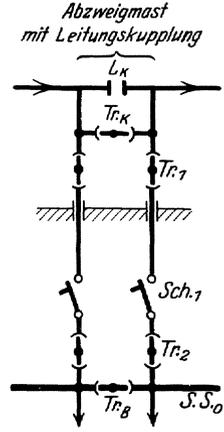


Abb. 334. Durchgangsspeisung mit Außentrennschaltern und Kuppeltrennschalter (Thüringenwerkschaltung).

Abb. 335, so ist auch hier die Kuppelungsverbindung herstellbar dadurch, daß das entsprechende Werk umgangen wird. Bei zweiseitiger Speisung genügt es, nach Abschaltung der betreffenden Stromzuführung einfache Leitungstrennung durch Lösen der Isolatorbrücken an den Abspannmasten vor dem Werke vorzunehmen, die nach Beendigung der Instandsetzung zu geeigneter Betriebszeit wieder geschlossen werden. Bei einseitiger Speisung empfiehlt sich der Einbau von Trennschaltern an den Masten (Abb. 336). Diese und die Kuppeltrennschalter sind je nach den Betriebsanforderungen entweder von Hand oder motorisch mit Fernbetätigung schaltbar einzurichten.

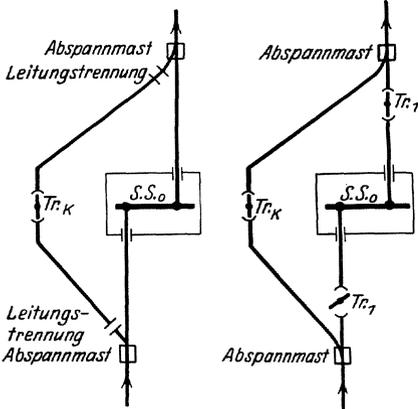


Abb. 335.

Abb. 336.

Abb. 335 und 336. Thüringenwerkschaltung bei zweiseitig gespeisten Durchgangswerken ohne und mit Trennschaltern.

Bei ausgedehnteren Überland- und Großversorgungen wird die Ausgestaltung der einzelnen Leitungsstrecken zu Ringen, sofern nur ein Kraftwerk zur Speisung vorhanden ist, immer mehr angestrebt. Das bisher Gesagte gilt auch für diesen Fall. In Abb. 337 bis 341 sind die verschiedenen Anschlußmöglichkeiten dargestellt.

Der Aufwand an Kosten, der sich nach den einzelnen Anschlußformen ergibt, wird sich ferner zu rechtfertigen haben aus der Bedeutung, die den einzelnen angeschlossenen Werken für eine möglichst ungestörte sekundäre Stromlieferung zuzumessen ist unter Berücksichtigung von Störungen, die auf der Primärseite der Werke und in den Hauptanschluß- und Verteilungsleitungen eintreten können. Hier müssen also die eingangs erwähnten Forderungen des Betriebes voll berücksichtigt werden. Bei den Kopfanlagen in Parallelabzweigung wird weiter zu unterscheiden sein zwischen Kleinanlagen mit nur einem Transformator für Gemeinden, Güter, kleinere Netzteile und ähnliche Anschlüsse und großen Werken mit ein oder mehreren Transformatoren, die zudem von Hoch- auf Mittelspannung übersetzen. Ferner ist auch wie bereits angedeutet mitbestimmend die Länge der Abzwegleitung.

Die große Zahl von Orts- und Güteranschlüssen in ausgedehnten Überlandanlagen bedingt — wo irgend durchführbar — entweder zweiseitige Speisung oder Ringleitung. Können die überspannungsseitigen Abzwegleitungen dann kurz gehalten werden, so daß Störungen auf ihnen kaum zu erwarten sind, so ist der Parallelanschluß als Kopfanlage die einfachste und billigste Form. Das gilt in gleichem Maße auch für größere Werke. Hat die Abzwegleitung beträchtliche Länge, so müssen aus Gründen der besseren Spannungsverteilung und des Betriebes an sich die Vorteile der Ring- oder auch der Doppelleitung ausgenützt werden. Es wird daher unter Abwägung aller Vor- und Nachteile betrieblicher und geldlicher Art, auch unter Berücksichtigung der

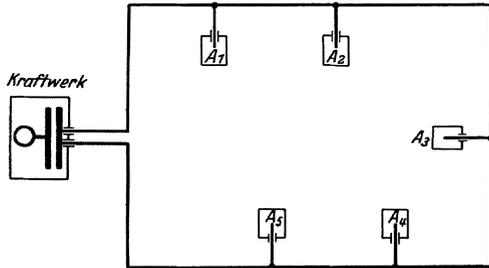


Abb. 337.

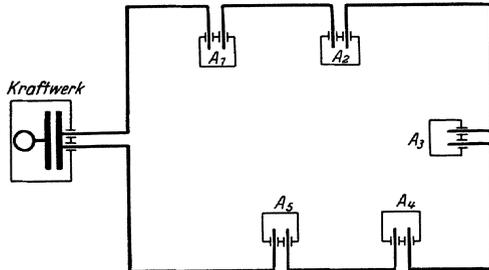


Abb. 338.

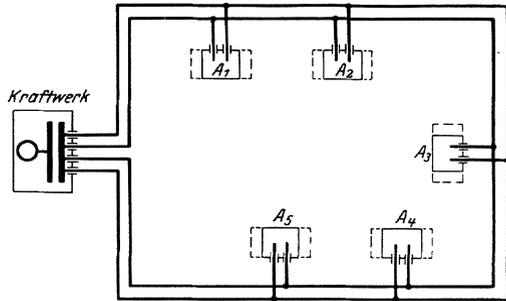


Abb. 339.

Abb. 337 bis 341. Verschiedene Anschlußformen von Transformatorwerken an Einfach- und Doppelleitungen.

Platzverhältnisse für die einzelnen Werke, die unter Umständen stark ins Gewicht fallen können, zunächst Klarheit darüber zu schaffen sein, welche Anschlußform für den ersten Ausbau und dann für Erweiterungen zu wählen ist, bevor zur weiteren Ausgestaltung des Schaltbildes geschritten wird.

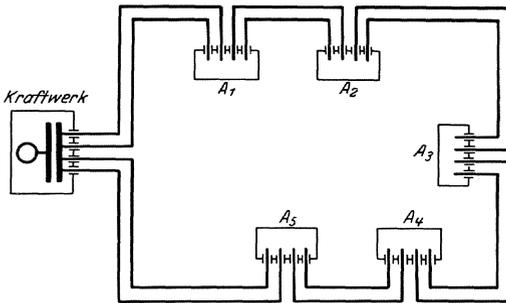


Abb. 340.

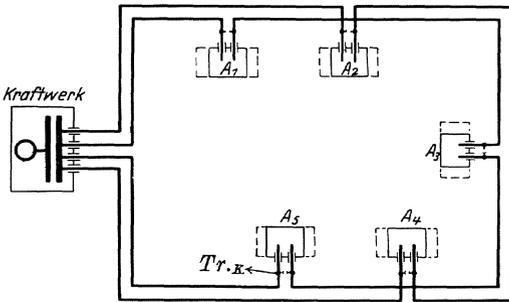


Abb. 341.

Abb. 337 bis 341. Verschiedene Anschlußformen von Transformatorwerken an Einfach- und Doppelsammelschienen.

Sammelschiene erforderlich (Abb. 342). Sind mehrere sekundäre Abzweige zu versorgen, wird man je nach der Höhe der Spannung die Einfach- oder Doppelsammelschiene wählen, Abb. 344.

In Abb. 343 ist das in Abb. 342 einpolig gezeichnete Schaltbild in dreipoliger Darstellung wiedergegeben und ohne besondere Erläuterung verständlich. Es bezeichnet hier und in allen folgenden Schalt-

gestritten wird. Besonders zu erwähnen ist schließlich noch, daß bei Kopfanlagen für hohe Primärspannung ein nicht zu unterschätzen noch, daß sie durch Überspannungen besonders aus atmosphärischen Ursachen herrührend stärker gefährdet werden als Durchgangsanlagen, weil sie einen Reflexpunkt im Verlauf der Überspannung bilden und demnach oft mehr als die doppelte Betriebsspannung aushalten müssen.

Die zweite grundlegende Entscheidung betrifft die Zahl der Sammelschienen¹.

Handelt es sich nur um einen Transformator und eine Zuleitung gleichgültig, ob die Anlage für kleine oder große Leistung bestimmt ist, dann ist oberspannungsseitig keine

¹ In den folgenden Schaltbildern sind für die Schalter *Sch.* immer Ölschalter mit selbsttätiger Ausschaltung ganz allgemein nach den DIN-Schaltzeichen gezeichnet, ohne besondere Angabe über die Art der Auslösung. Für die Trennschalter sind lediglich der Abwechslung wegen teilweise einpolige oder Dreh-Trennschalter angedeutet. Auch sind die Querstriche für die Pol- oder Phasenzahl bei den Geräten, Sammelschienen und Leitungen nach den DIN-Normen fortgelassen, einmal um die Zeichnungen nicht unklar zu machen und weiter, da alle Schaltbilder sich auf Drehstrom beziehen. Die Andeutung der Gebäudemauer mit Durchführungen ist ebenfalls teilweise unterlassen, um nicht immer wieder auf die Schaltung nach Abb. 342 mit der dort angegebenen Lage der Trennschalter *Tr.*₁ hinweisen zu müssen.

bildern Tr . Trennschalter, Sch . Schalter, Trf . Transformator, $S.S._o$ Sammelschiene oberspannungsseitig, $S.S._u$ Sammelschiene unterspannungsseitig, S . Sicherung.

Die in Abb. 342 bis 344 punktiert gezeichneten zweiten Trennschalter Tr_{r1} werden an dieser Einbaustelle, also außerhalb des Werkes, anzuordnen sein, wenn nach dem Vorhergesagten bei hoher Spannung die Gebäudeeinführung zusammen mit dem Transformatorenwerke abtrennbar sein, bei Störungen an dieser Stelle also die Zuführungsleitung nicht mit betroffen werden soll, ihre Abschaltung auch nicht zugänglich ist, weil andere Werke an sie angeschlossen sind. Wird diese Lage für Tr_{r1} gewählt, so entfällt der Trennschalter im Werke. Einer von beiden muß aber vorhanden sein, um die Anlage zur Untersuchung der Inneneinrichtung und besonders des Schalters Sch . spannungsfrei machen zu können.

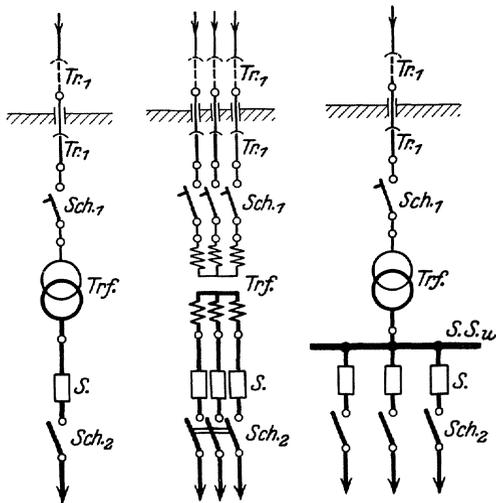


Abb. 342. Abb. 343. Abb. 344. Kleine Einfachtransformatoranlage in ein- und dreipoliger Darstellung ohne und mit Einfachsammschiene unterspannungsseitig.

Die Einfachsammschiene, Abb. 345 und 346, hat den Zweck, die zugeführte Leistung auf mehrere Transformatoren zu verteilen und die abgehende Leistung ebenfalls mehreren Abzweigen zuzuführen. Der Vorteil dieser Einfach- gegenüber der Doppelsammelschiene liegt lediglich in den geringeren Anlagekosten für Gebäude bzw. Grundfläche, Aufbauten und Schaltgeräte, dadurch aber auch besonders bei hohen Spannungen in der Herabsetzung der Gefahrenpunkte für Spannungsüberschläge durch wesentliche Verminderung der Isolatoren für die Sammelschienen und für die Trennschalter. Nachteilig ist für die

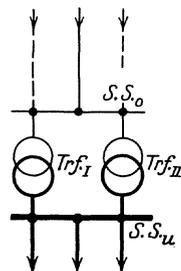


Abb. 345. Einfachspeisung, Einfachsammschiene beidersieits.

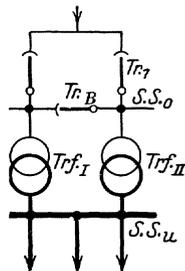


Abb. 346. Einfachspeisung, Aufteilung im Werk mit Blocktrennung.

den Sammelschienen selbst oder den Trennschalteranschlüssen nur geringe Schalt-, damit also Betriebsbeweglichkeit vorhanden ist. Es ist daher notwendig, schon bei zwei Transformatoren die sog. Blocktrennung in den Sammelschienen vorzusehen, die darin besteht, daß in die Sammelschiene noch ein Trennschalter Tr_B gelegt wird. In Abb. 346

ist diese Blocktrennung für nur eine Zuleitung, in Abb. 355 für zwei Zuleitungen gezeichnet. Wird für die Sammelschienausführung bei Durchgangsanlagen noch der Kuppeltrennschalter nach Abb. 334 (Thüringenwerksschaltung) zwischen den Leitungen angeordnet, so kann, wie schon hier bemerkt sei, in vielen Fällen selbst bei den größten Hauptwerken die Doppelsammelschiene vermieden werden. Jedenfalls sollten Untersuchungen nach dieser Richtung wiederum Gegenstand ernster Erwägungen sein. Die Kostenersparnisse einerseits und die Verminderung von Isolierstellen, damit von Gefahrenpunkten andererseits, die immer angestrebt werden muß, sind recht beachtliche Gründe. Die Betriebsbeweglichkeit erleidet keine wesentliche Einschränkung. Es ist hier auf das im 63. Kap. noch besonders Erläuterte hinzuweisen.

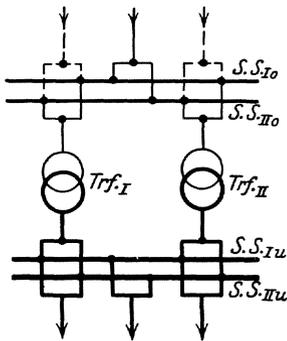


Abb. 347. Doppelsammelschienen, einpolige Darstellung.

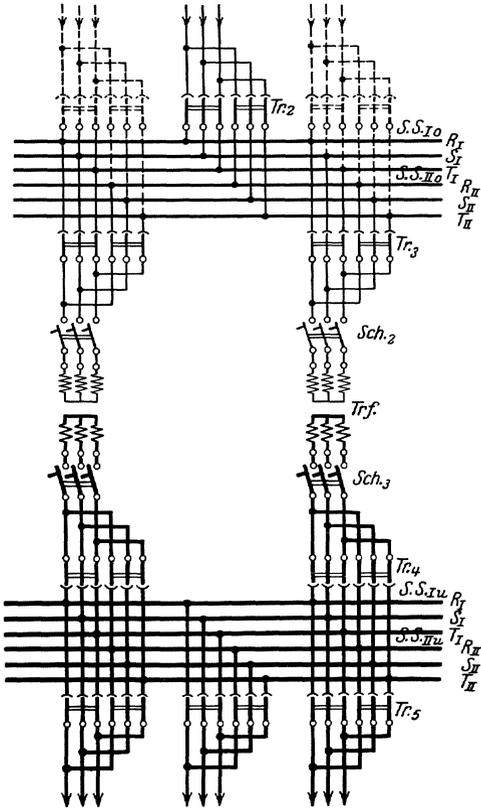


Abb. 348. Doppelsammelschienen, dreipolige Darstellung.

Die Doppelsammelschiene in Abb. 347 einpolig und in Abb. 348 dreipolig gezeichnet besteht darin, daß zu der einfachen Sammelschiene noch eine zweite angeordnet wird, und die ankommenden und abgehenden Leitungen, sowie die Transformatoren durch Trennschalter wahlweise an die eine oder die andere Sammelschiene gelegt werden können. Es ist unschwer zu erkennen, daß hier in sich eine vollständige Reserve geschaffen wird, Instandsetzungsarbeiten, Messungen, Untersuchungen, Erweiterungen u. dgl. leicht und ohne jede Beeinträchtigung des anderen Betriebes an jeder Stelle vorgenommen werden können. Andererseits aber fallen naturgemäß Raumbeanspruchung, Isolatorenzahl und Anlagekosten wesentlich größer aus als bei der

Einfachsammelschiene. Bei hohen Spannungen ist das außerordentlich von Bedeutung (S. 504).

Diesen Nachteilen gegenüber steht der Betriebsvorteil großer Betriebsbeweglichkeit, der indessen nicht überschätzt werden soll. Jedenfalls liegt oftmals eine Überschätzung auf der Oberspannungsseite vor, wenn nicht mehr als zwei Transformatoren vorhanden sind oder überhaupt für ein Werk in Frage kommen. Lediglich sofern eine größere Transformatoranzahl von vornherein oder in Zukunft aufzustellen ist, hat die Doppelsammelschiene überspannungsseitig volle Berechtigung. Auch dann, wenn bei Doppelleitung etwa mit zwei Spannungen gefahren werden soll, ein Fall, der zwar zu erwähnen, aber in der Praxis bisher selten zu finden ist, ist die Doppelsammelschiene geboten.

Auf der Unterspannungsseite dagegen ist besonders bei Hochspannung und mehreren Abzweigen die Doppelsammelschiene häufig unbedingt zu fordern, um volle Betriebsbeweglichkeit auch schon bei zwei Transformatoren zu gewinnen. Mit zwei Spannungen wird hier häufiger gearbeitet, dazu geben die Wicklungsanzapfungen der Transformatoren ohne zusätzliche geldliche Belastung der Anlage leicht die Möglichkeit. Auch besondere Spannungsregelungsvorrichtungen werden auf der Unterspannung heute häufiger anzuordnen sein. Kommt auf der Unterspannungsseite Parallelbetrieb mit anderen Kraftwerken in Frage, muß die Doppelsammelschiene gewählt werden. Über die Blocktrennung gilt das für die Einfachsammelschiene Gesagte in gleichem Maße. Für Spannungen bis etwa 30 kV ist die Raumbeanspruchung bei geschicktem Anlagentwurf nicht wesentlich größer als bei der Einfachsammelschiene.

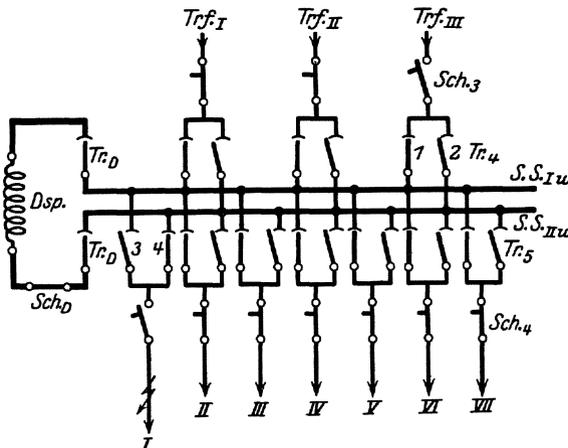


Abb. 349 a. [Hilfsschaltung für Störungsfälle mit Drosselspule über Doppelsammelschienen.

In ausgedehnten Überlandnetzen mit einer großen Zahl von Mittelspannungsleitungen auf Holzmasten werden sich Störungen bei Sturm, Raureif und Gewitter schwer vermeiden lassen. Beim Zuschalten der gestörten Leitung auf die noch nicht beseitigte Fehlerstelle insbesondere dann, wenn das liefernde Kraftwerk große Leistung besitzt, und dem-

zufolge mit großer Kurzschlußenergie zu rechnen ist, tritt unter Umständen eine im ganzen übrigen Netze sehr unangenehm empfundene Spannungsabsenkung ein. Um diese wesentlich zu mildern, kann die in Abb. 349 gezeichnete Schaltung angewendet werden, bei der das Zuschalten über die zweite Sammelschiene und eine Strombegrenzungs-drosselspule erfolgt. Diese Schaltung hat sich in der Praxis gut bewährt. Abb. 349 zeigt die betriebsmäßige Stellung der Öl- und Trennschalter. Ist der Ölschalter Sch_4 der Leitung I gefallen und ist die Art der Störung nicht bekannt, muß also nochmals zugeschaltet werden, ehe die endgültige Außerbetriebsetzung und das Absuchen der Leitung erfolgt, so kann die Benutzung der Drossel derart geschehen,

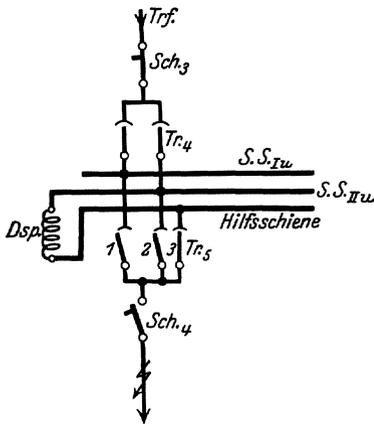


Abb. 350. Hilfsschaltung für Störungsfälle mit Drosselspule über Hilfsschiene.

daß alle anderen Leitungen z. B. auf $S.S.uI$ gelegt werden, die Drossel eingeschaltet, der Trennschalter Tr_4 der Leitung I auf $S.S.uII$ gelegt und nun der Schalter Sch_4 geschlossen wird. Ist die Störung nur vorübergehend gewesen, hält also der Schalter, so wird Trennschalter Tr_3 geschlossen, damit die Stromlieferung wieder auf $S.S.uI$ umgelegt und die Drossel durch Öffnen des Schalters Sch_D und des Trennschalters Tr_D abgeschaltet. Bei kleineren Leistungen kann Sch_D auch fortgelassen werden. Es ist dabei zu empfehlen, die Schalterrelais auf kürzeste Zeit und kleinsten Strom einzustellen.

Eine andere Schaltung, die nur angedeutet sein mag, ist die, eine Hilfsschiene für die Zuschaltung mit Drossel zu benutzen

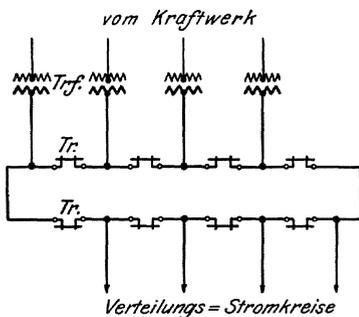


Abb. 351. Ringsammelschiene unterspannungsseitig.

Sie ist dann besonders zweckmäßig, wenn die beiden Sammelschienen aus Betriebsgründen für solche Schaltungen nicht freigemacht werden können. Ist die Drosselspule nicht vorhanden, dann kann das Probezuschalten der gestörten Strecke auch über einen vorhandenen, nicht in Betrieb befindlichen Transformator vorgenommen werden.

Die Ringsammelschiene (Abbild. 351) wird heute nicht mehr angewendet, weil sie keine Vorteile gegenüber der Doppelsammelschiene aufweist. Nur der Vollständigkeit wegen soll daher Abb. 351 einen Vergleich schalttechnisch mit der Doppelsammelschiene gestatten. Näheres dazu auszuführen erübrigt sich.

Ist auch über die Zahl der Sammelschienen Entscheidung getroffen, dann kann nunmehr das Gesamtschaltbild entworfen und die Schaltanlage insgesamt durchgebildet werden.

Für den Entwurf des Schaltbildes im besonderen, d. h. für die Auswahl der Schalt- und Meßgeräte sowie sonstiger Einrichtungen sind bestimmend:

1. die Höhe der Ober- und Unterspannung,
2. die Bedeutung des Werkes im Rahmen der Gesamtanlage,
3. besondere Aufgaben, die dem Werke noch zufallen.

Bei der nun folgenden Besprechung der hauptsächlichsten Schaltbilder wird hinsichtlich des Einbauens von Schaltgeräten nur das unbedingt Notwendige behandelt. An sich sind die Schaltbilder für Transformatorenwerke selbst für die höchsten Spannungen sehr einfach im Grundaufbau. Nur die Verwendung von Spannungsreglern, Meß- und Sicherheitseinrichtungen

sowie Zählern machen das Schaltbild verwickelter.

e) Transformatorenwerk mit einer Speiseleitung.

Für alle kleinen Ortstransformatoren wird das Schaltbild nach Abb. 343 benutzt. Zum Einschalten des Transformators $Trf.$ dient der Ölschalter $Sch_{.1}$ auf der Oberspannungsseite, der mit einer Höchststromauslösung zu versehen ist.

Unterspannungsseitig ist ein Transformatorschalter nicht mehr erforderlich. Über die Anordnung der Trennmesser (Trennschalter) $Tr.$ ist bereits gesprochen worden. Auf der Unterspannungsseite genügt zumeist die Einfachsammelschiene $S.S_{.u}$, sofern mehrere Abzweige vorhanden sind. In Abb. 343 bzw. 344 sind diese abgehenden Stromkreise mit Sicherungen $S.$ und Schaltern $Sch_{.2}$ versehen.

Handelt es sich um zwei und mehr Transformatoren, so ist eins der Schaltbilder nach Abb. 352 oder 353 zu wählen. Der Unterschied dieser beiden Schaltbilder liegt in der Zahl der Trenn- und Ölschalter auf der Oberspannungsseite. Muß sehr billig gebaut werden, dann genügt in der Speiseleitung ein Trennschalter $Tr_{.1}$ und ein Ölschalter $Sch_{.1}$. Die Transformatoren $Trf.$ erhalten oberspannungsseitig nur Trennschalter $Tr_{.3}$, unterspannungsseitig dagegen selbsttätige Schalter $Sch_{.3}$ und wiederum Trennmesser $Tr_{.4}$. Die abgehenden Verteilungsleitungen sind

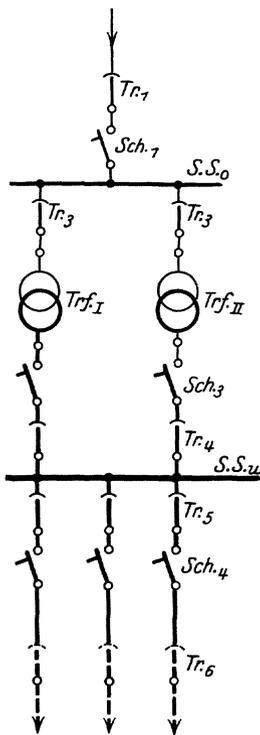


Abb. 352. Kopfanlage mit einer Speiseleitung, einfachste Schaltung, beiderseits Einfachsammelschiene

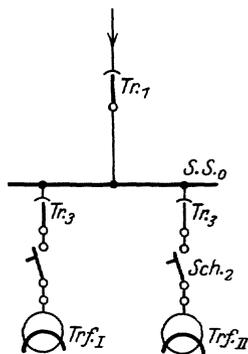


Abb. 353. Kopfanlage nach Abb. 352, verbesserte Schaltung überspannungsseitig.

mit Trennschaltern Tr_5 an den Sammelschienen $S.S_{II}$ und selbsttätigen Schaltern Sch_4 oder Sicherungen zu versehen. Sind diese Leitungen in irgendeiner Weise untereinander verbunden, so daß Rückspannung auftreten kann, dann müssen noch hinter den Schaltern die punktiert gezeichneten Trennmesser Tr_6 eingebaut werden, um die Schalter für Untersuchungen spannungsfrei machen zu können.

Dieses Schaltbild überspannungsseitig ist nur unter bestimmten Voraussetzungen anwendbar, denn die bei größeren Werken zu fordernde Betriebsbeweglichkeit ist hier in bezug auf das Zu- und Abschalten der Transformatoren nicht vorhanden. Soll der erste Transformator

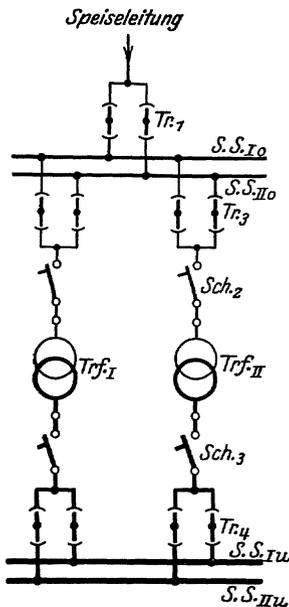


Abb. 354. Kopfanlage mit einer Speiseleitung, beiderseits Doppelsammelschiene.

in Betrieb genommen werden, so ist er nach Einlegen des Trennschalters Tr_3 mit dem Ölschalter Sch_1 der Speiseleitung zu erregen und dann sein Unterspannungsschalter Sch_3 zu schließen. Soll der zweite Transformator zugeschaltet werden, dann ist er durch seinen Unterspannungsschalter Sch_3 zu erregen und darauf erst durch seinen Überspannungstrennschalter parallel zu schalten. Das Außerbetriebsetzen der Transformatoren einzeln erfolgt sinngemäß in umgekehrter Reihenfolge, indem beim zweiten Transformator zuerst der Überspannungstrennschalter Tr_3 und dann der Unterspannungsschalter Sch_3 , beim ersten Transformator dagegen erst der Unterspannungsschalter Sch_3 , dann der Freileitungsschalter Sch_1 und zuletzt der Überspannungstrennschalter Tr_3 geöffnet wird. Der letzte Transformator könnte auch unmittelbar mit dem Freileitungsschalter Sch_1 ausgeschaltet werden. Es empfiehlt sich aber, die erwähnte Reihenfolge in der Betätigung der Schalter einzuhalten, damit diese stets betriebsbereit stehen.

Eine Störung in einem der beiden Transformatoren hat zur Folge, daß der Ölschalter Sch_1 in der Speiseleitung auslöst, wodurch die ganze Anlage abgeschaltet wird. Das ist in der Mehrzahl der Fälle betrieblich unzulässig. Aus diesem Grunde ist es ratsamer, auch auf der Überspannungsseite der Transformatoren selbsttätige Ölschalter Sch_2 zu benutzen. Ohne Bedenken kann dann der Schalter in der Speiseleitung fortgelassen werden. In Abb. 353 ist das abgeänderte Schaltbild nur für die Überspannungsseite gezeichnet. Um an Relais mit ihren Strom- und gegebenenfalls Spannungswandlern zu sparen, kann der Transformator-Unterspannungs- und Überspannungsschalter gemeinsam vom Höchststromrelais des Überspannungsschalters zur Auslösung gebracht, also entsprechend zusammengeschaltet werden. Für unbewachte Anlagen sind zweckmäßig noch Buchholzschutz und Wärme-

auslöser für jeden Transformator vorzusehen, die auf die elektrisch gekuppelten beiden Transformatorschalter wirken.

Für mittlere Spannungen genügt ober- und unterspannungsseitig die Einfachsammelschiene, sofern die Isolation der Sammelschiene so hoch gewählt wird, daß Überschläge an diesem Teile der Anlage nicht eintreten können. Bei hohen Kurzschlußleistungen muß dazu noch eine besonders sichere mechanische Ausführung gewählt werden. Wird weitere Betriebsbeweglichkeit verlangt, dann ist die Blocktrennung nach Abb. 355 anzuwenden. Mit dieser ist allen Betriebsanforderungen auch bei den höchsten Spannungen, wie praktische, jahrelange Erfahrungen gezeigt haben, zu genügen. Die Behandlung der gleichen Frage auf S. 502 bestätigt dieses.

Wie bereits gesagt, ist die Frage in bezug auf die zu wählende Zahl der Sammelschienen nicht immer kurzerhand mit der Doppelsammelschiene zu beantworten. Um daher auch diesen Fall im Schaltbilde zu behandeln, ist in Abbild. 354 für beide Seiten die Doppelsammelschiene gezeichnet.

d) **Transformatorwerk mit zwei Speiseleitungen** (Abb. 355, Kopfanlage). Unter Berücksichtigung des bisher Gesagten gilt für dieses Schaltbild folgendes:

Werden die Transformatoren ober- und unterspannungsseitig mit Ölschaltern versehen, so können die Ölschalter *Sch.₁* und ein Satz Trennschalter *Tr.₂* in den Speiseleitungen fortfallen. Vorzunehmende Schaltungen bedingen keine Betriebsunterbrechung trotz der Einfachsammelschiene auf der Oberspannungsseite, sofern in dieser die Blocktrennung vorgesehen wird. Eine Störung auf einer der beiden Anschlußleitungen kann allerdings bewirken, daß das Transformatorwerk vollständig außer Betrieb kommt, weil durch Rückwärtsspeisung die in ihren Ansprungsverhältnissen gegenüber den Kraftwerksschaltern geringer eingestellten Transformatorenschalter eher zur Auslösung kommen als der Kraftwerksschalter der gestörten Leitung. Hier ist daher bei der Wahl des

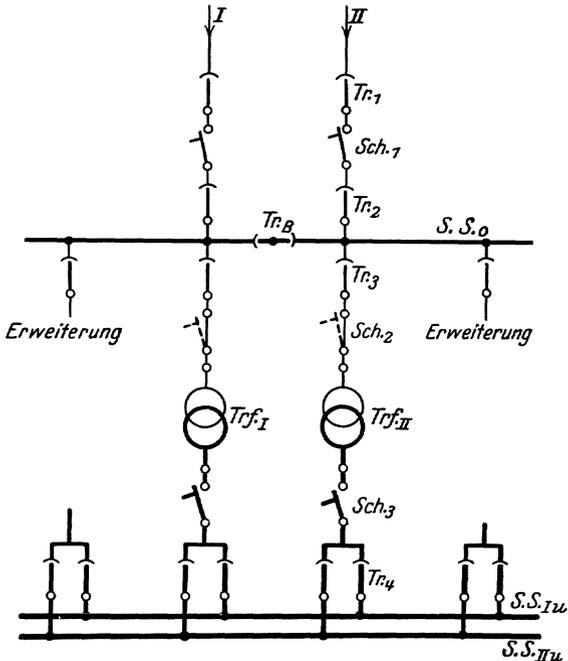


Abb. 355. Kopfanlage mit zwei Speiseleitungen, Einfachsammelschienen oberspannungs-, Doppelsammelschienen unterspannungsseitig. Blocktrennung in der Oberspannungssammelschiene.

Überstromschutzes besondere Vorsicht zu üben. Die Doppelsammelschienen auf der Oberspannungsseite anzuwenden, ist hier eher gerechtfertigt, da es sich bereits um größere Werke handeln wird. Hinsichtlich des Einbauens der Schalter $Sch_{.1}$ bzw. $Sch_{.2}$ gilt das für Abb. 352 bzw. 353 Gesagte sinngemäß. Auf der Unterspannungsseite ist wieder

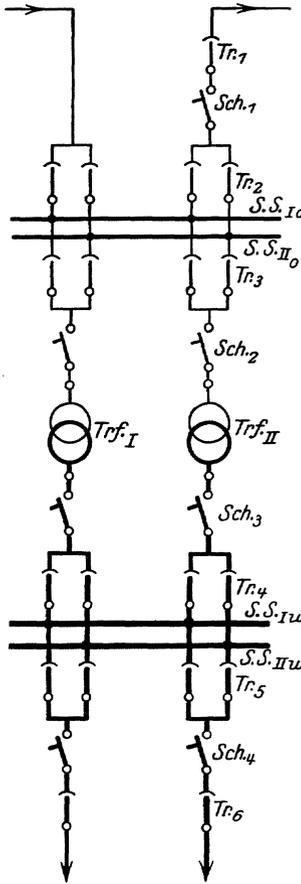


Abb. 356. Einseitige Speisung für eine Durchgangsanlage, beiderseits Doppelsammelschiene.

notwendig, damit zur Behebung von Störungen oder bei Instandsetzungsarbeiten an der Sammelschienenanlage durch Umlegen auf die zweite Schiene die nachfolgenden Werke nicht gestört werden. Die Blocktrennung kann bei dieser Art der Durchgangsanlage nicht zur Anwendung kommen. Will man hinsichtlich der Anlagekosten wiederum alles ersparen, was möglich ist, ohne Betriebssicherheit und Betriebsbeweglichkeit zu beschränken, so ist die Schaltung nach Abb. 357a zu

der Wahl zu treffen zwischen Einfach- und Doppelsammelschienen.

e) Transformatorwerk als Durchgangsanlage für einseitige Speisung (Abb. 329). Für eine Durchgangsanlage dieser Art ist in Abb. 356 das einfachste Schaltbild gezeichnet unter der Voraussetzung, daß keine zweiseitige Speisung stattfindet. Dann kann in der ankommenden Speiseleitung der Öl-schalter fortgelassen werden. Störungen auf der Hauptleitung werden für die in Richtung nach dem Kraftwerke von der Störungsstelle aus liegenden Werke durch den Schalter in der abgehenden Leitung abgeschaltet. Sollen alle Schaltungen ohne Betriebspausen erfolgen, so dürfen die Schalter auf der Unterspannungsseite des Transformators nicht

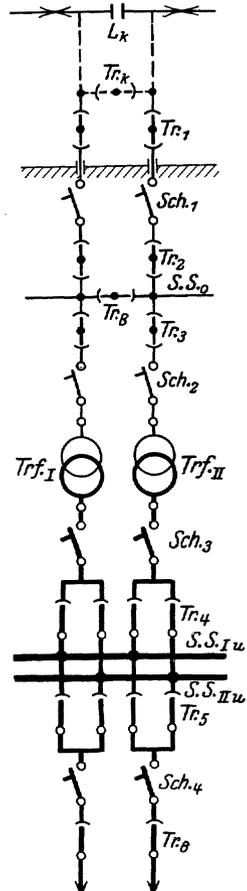


Abb. 357a. Einseitige bzw. zweiseitige Speisung einer Durchgangsanlage, Oberspannung, Einfachsam-melschiene, Blocktrennung, Kuppeltrennschalter, Unterspannung, Doppel-sammelschiene.

wählen, die dann sowohl für eine Durchgangsanlage mit einseitiger Speisung als auch für eine solche mit Stromlieferung aus zwei Kraftwerken oder innerhalb einer Ringleitung Geltung hat. Dabei ist die Lage und Schaltung der Trennschalter bei Gebäudewerken nach Abb. 334 mit berücksichtigt. Es genügt überspannungsseitig vollauf die Einfach-

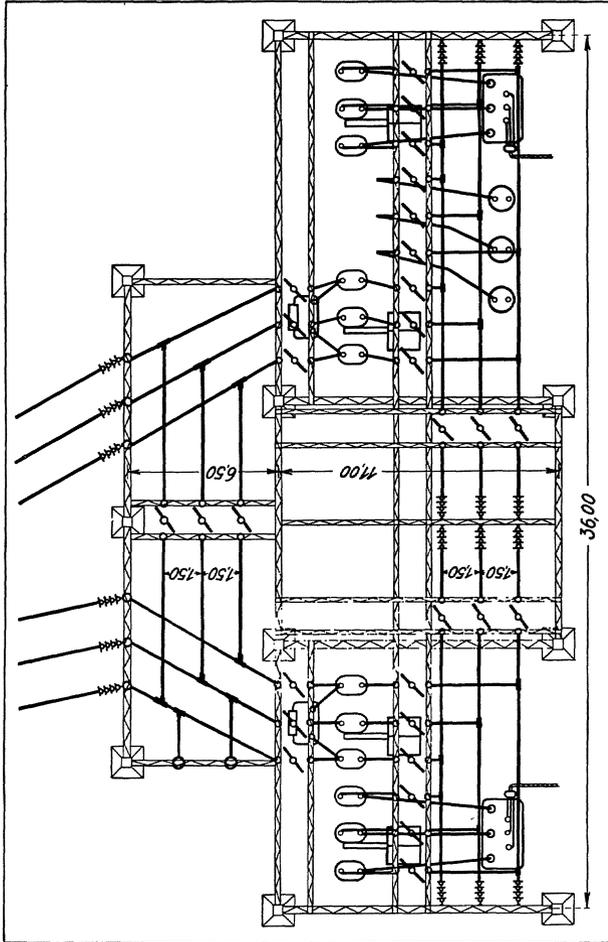


Abb. 357b. Grundriß eines Freiluftspannwerkes mit Kuppeltrennschalter auf der 50-kV-Seite der Zugangs- und Abgangsleitung.

sammelschiene. Jeder Stromkreis ist nunmehr mit Trennschalter Tr_3 und Ölschaltern Sch_2 auf der Überspannungsseite, sowie Sch_3 auf der Unterspannungsseite ausgerüstet. Dieses Schaltbild ist für die größten Anlagen geeignet. Nur wenn mehr als zwei Transformatoren vorhanden oder in Zukunft aufzustellen sind, wird die Vervollständigung der Überspannungsseite zur Doppelsammelschiene schon beim ersten Ausbau vorzusehen sein. Die behelfsmäßige Leitungskupplung L_k nach den Angaben auf S. 412 ist in Abb. 357a ebenfalls angedeutet.

Abb. 357b zeigt die praktische Ausführung dieser Schaltung für ein 50/6 kV-Freilufttransformatorwerk als Durchgangsanlage mit einseitiger Speisung. Die Lage des Kuppeltrennschalters ist deutlich zu ersehen. Diese Thüringerwerkschaltung hat sich bisher durchaus bewährt.

f) Transformatorwerk als Durchgangsanlage in einer Ringleitung oder für zweiseitige Speisung (Abb. 357a). Hier soll in den ankommenden und abgehenden Speiseleitungen je ein Ölschalter Sch_1 mit Relais vorhanden sein,

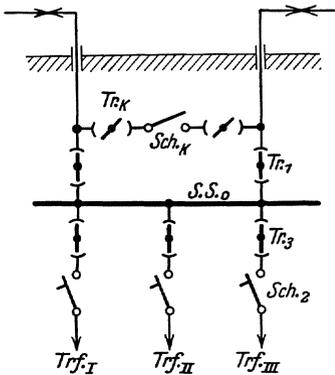


Abb. 358. Durchgangswerk, ein- oder zweiseitige Speisung. Sachsenwerksschaltung für Oberspannungsschalter.

um bei Störungen auf der Hauptleitung die Schalter in den der Störungsstelle nach beiden Seiten benachbarten Werken zur Auslösung zu bringen, dadurch die Störung sofort einzugrenzen und die Stromlieferung von beiden Seiten aus nicht zu unterbrechen. Der Wahlschutz ist besonders zu empfehlen. Wird der oberspannungsseitige Kuppeltrennschalter Tr_k nicht eingebaut, kann die erforderliche Betriebsbeweglichkeit oberspannungsseitig die Doppelsammelschiene notwendig machen.

Muß wiederum besonders billig gebaut werden oder verlangt der zur Verfügung stehende Bauplatz tunlichste Einschränkung in der Zahl der Schaltgeräte, so kann nach der

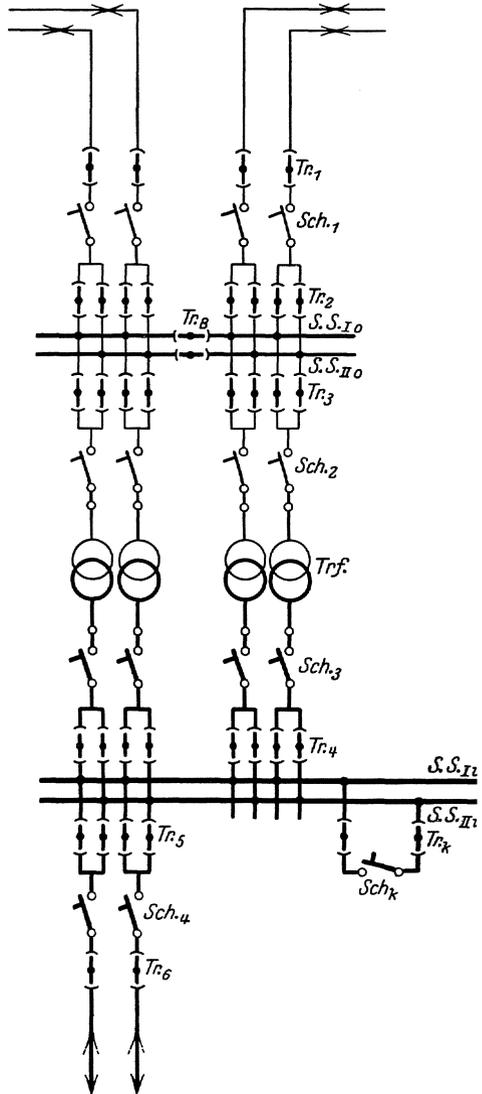


Abb. 359. Zweiseitige Speisung mit Doppelleitungen, Doppelsammelschienen ober- und unterspannungsseitig, Blocktrennung in der Oberspannungs-, Kuppelschalter in der Unterspannungssammelschiene.

vom Sachsenwerk angegebenen Schaltung (Abb. 358) ein Ölschalter hochspannungsseitig in den Zuführungsleitungen gespart werden. An Stelle der beiden Schalter $Sch_{.1}$ tritt der zwischen Trennschaltern $Tr_{.k}$ liegende Schalter $Sch_{.k}$. Eine ähnliche Schaltung ist in Abb. 375 gezeichnet und zum Vergleich heranzuziehen.

Zur Vervollständigung ist schließlich noch in Abb. 359 das Schaltbild für ein Großwerk mit Ein- und Ausführung einer **Doppelleitung** und für vier Transformatoren gezeichnet, wie es heute fast stets zur Anwendung kommt. Wohl aber ist darauf hinzuweisen, daß auch bei Großanlagen sorgfältiges Studium des einfachsten Schaltbildes vorausgehen soll.

Liegt das Werk unterspannungsseitig im Parallelbetriebe mit anderen Kraftwerken, ist zweckmäßig die Doppelsammelschiene noch mit einem Ölschalter als Kuppelschalter $Sch_{.k}$ zu versehen, um schnell parallel-schalten zu können. Naturgemäß gilt das auch in entsprechendem Falle für die Oberspannungsseite.

g) Transformatorenwerk mit Einphasentransformatoren in Drehstromschaltung. Auf S. 377 wurde bereits erwähnt, daß für sehr große Anlagen unter Umständen die Drehstromtransformatoren aus drei Einphasentransformatoren zusammengesetzt werden können, um dann nur einen Einphasentransformator als Aushilfe beschaffen zu müssen. Der letztere kann entweder nach Abklemmen einer gestörten Einheit eingefahren und angeschlossen oder auch elektrisch zugeschaltet werden. Die Ansichten über die Zweckmäßigkeit der einen oder anderen Ausführungsform sind geteilt. Da heute selbst die größten Leistungen bis etwa 100000 kVA als Drehstromeinheiten auch bei einer Ober-spannung von 220 kV gebaut und vor allen Dingen auf deutschen Hauptbahnen befördert werden können, ist die Benutzung von Einphasentransformatoren in Deutschland in den Hintergrund getreten. Sie kann aber keineswegs als überholt angesehen werden, sofern es sich um ein sehr großes Transformatorenwerk für Höchstspannung handelt. Vielmehr wird auch hier die betriebswirtschaftliche Bedeutung des Werkes im Rahmen der Gesamtanlage und im Hinblick auf die Anlagekosten sowie die Ausnutzung im Vergleich zu diesen, ferner die Möglichkeit, sich bei Störungen vorübergehend anderweitig helfen zu können, ausschlaggebend sein müssen. Festumrissene Richtlinien lassen sich nicht geben, sofern die Gewichtseinheiten für den Transport nicht überschritten werden (Zahlentafel 27).

In Abb. 360 ist für ein derart aufgebautes Werk das Schaltbild dreipolig gezeichnet, das in der linken Hälfte die drei Einphasentransformatoren und in der rechten Hälfte den umschaltbaren Aushilfs-transformator zeigt. Wird die Umschaltung nicht gewählt, bleibt die linke Hälfte unverändert bestehen. Die Transformatoren sind ober-spannungsseitig in Dreieck, unterspannungsseitig in Stern geschaltet. Die Schalter $Sch_{.2}$ und $Sch_{.3}$ sind erforderlich, um einen gestörten Transformator selbsttätig abzuschalten.

Dieses Schaltbild zeigt noch eine besondere Ausführung der ankommenden Leitung insofern, als nur ein Stromkreis vollständig und vom zweiten lediglich eine Phase verlegt

worden ist (vierte Phase)¹. Auf S. 498 wird hierauf besonders zurückgekommen. Der Leitungölschalter *Sch*₁ und die Trennschalter *Tr*₂ aus

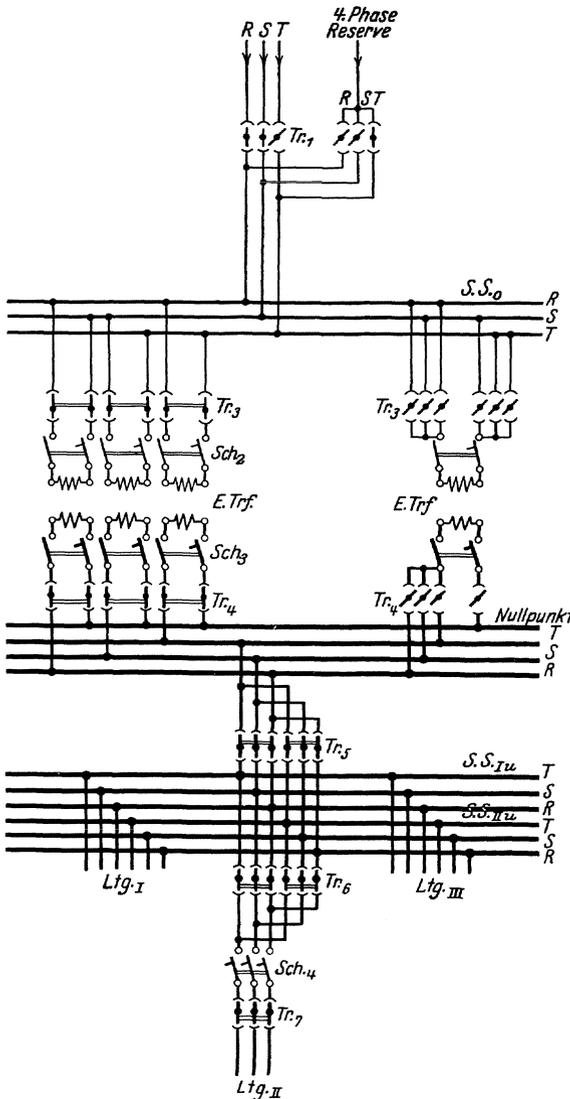


Abb. 360. Drehstromwerk mit Einphasentransformatoren und umschaltbarem Reservetransformator, sowie Hochspannungspeiseleitung mit vierter Phase, spannungslos umschaltbar.

Hierin ist also der Kostenaufwand bereits ins Gewicht fallend. Entscheidend sind weiter die Leitungs- und Transformatorenkosten.

anderen Schaltbildern können selbst bei den höchsten Spannungen und größten Leistungen fortgelassen werden, wenn es sich wie in Abb. 360 um eine Kopfanlage handelt. Besonders beachtlich und die Vorteile klar beleuchtend ist ein Vergleich dieses Schaltbildes mit der Schaltung nach Abb. 355. Handelt es sich z. B. um ein Transformatorenwerk für Spitzenleistungsübertragung bei 220/110 kV Spannung — ein Fall, der immer mehr an Bedeutung gewinnt — so wird die Schaltung nach Abb. 360 für viele Fälle vollauf genügen. Der Vergleich mit Abb. 355 ergibt in bezug auf die Öl- und Trennschalter, daß für die Schaltung nach Abb. 360 erforderlich sind auf der 220-kV-Seite 18 (einpolige) Trennschalter und 4 zweipolige Ölschalter, auf der Unterspannungsseite 16 Trenn- und 4 Ölschalter gerechnet bis zu den Doppelsammelschienen, während für Abb. 355 die Zahlen lauten: oberspannungsseitig 21 und 4 dreipolig, unterspannungsseitig 12 und 2.

¹ D.R.P. 417650 des Verfassers mit Dr. Lulofs.

57. Die Schaltgeräte¹.

a) **Die Trennschalter (Trennmesser).** Um die Transformatorenanlage in einzelnen Teilen oder vollständig von der Hochspannung abtrennen zu können, ohne daß die Fernleitungen jedesmal im Kraftwerke spannungslos gemacht, also abgeschaltet werden, was namentlich dann, wenn an diesen Leitungen noch andere Werke angeschlossen sind, nicht statthaft ist, müssen Schalter vorhanden sein, die diesen Zweck leicht erfüllen lassen. Die Hauptschalter hierzu zu benutzen, ist bei Spannungen über 250 V aus dem Grunde nicht möglich, weil die Klemmen dieser Schalter und damit natürlich die Schalter selbst auf der Seite der ankommenden Leitungen unter Spannung stehenbleiben und eine Untersuchung derselben nur möglich ist, wenn die betreffende Leitung im Kraftwerke bzw. Hauptspeisepunkte ausgeschaltet wird. Das soll aber vermieden werden, und daher fügt man sog. Trennmesser *Tr.* ein, die in einfachster Art aus drehbar gelagerten Kupferstücken bestehen und wohl für die Spannung isoliert, nicht aber für die Unterbrechung größerer Leistung bemessen sind. Abb. 361 zeigt einen solchen einpoligen Trennschalter. Die Bedienung erfolgt mit 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 oder dgl.) noch besonders zu isolieren, um jede Gefährdung des den Schalter Bedienenden auch bei feuchter Stange zu vermeiden. 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 mittels Seilzug und Kurbel oder besser unter Benutzung von festen Gestängeantrieben. Auf eine dauernd zuverlässige Erdung aller Eisenteile ist besonders zu achten².

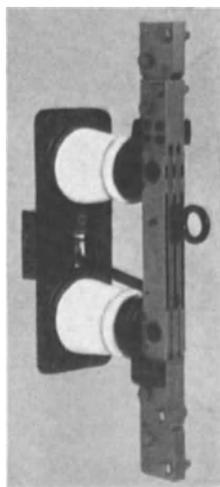


Abb. 361. Einpolige Trennschalter mit Meldekontakt.

Die Anwendung der Trennschalter beginnt etwa von 750 V an aufwärts, weil Arbeiten an Schaltgeräten unter Spannung auch mit Isolierzangen, Gummihandschuhen usw. über 750 V 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 50000 V wird der Drehtrennschalter mit zweifacher Unterbrechung benutzt (Abb. 362).

¹ Die Behandlung der Schalt- und Meßgeräte ist nur kurz gehalten. Ausführliches bringt der IV. Band.

² Leitsätze für Schutzerdungen in Hochspannungsanlagen des VDE.

In der Mehrzahl der Fälle bis etwa 30 kV 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 Abschaltern 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,

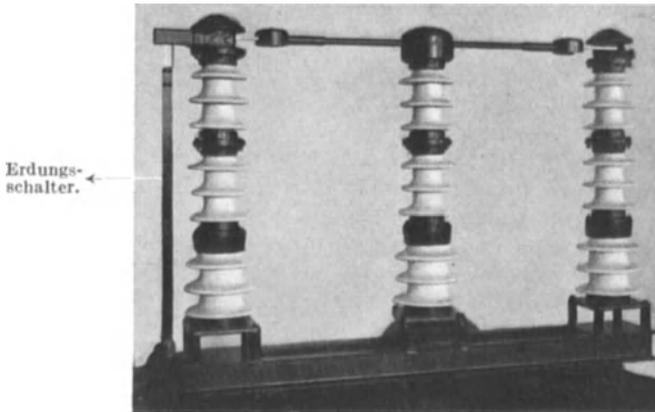


Abb. 362. Dreipoliger Drehtrennschalter (Freiluftausführung) mit Erdungsschalter.

dann wählt man besser die Trennschalter für Drehstrom dreipolig. Bei höherer Spannung wird nur die dreipolig gekuppelte Bauweise benutzt. Es gibt ferner noch eine Reihe von Sonderbauformen, so z. B. für Doppelsammelschienen, Umschalter, wagerecht und senkrecht liegende Schaltmesser usw., auf die hier nicht weiter eingegangen werden kann. Die Anwendung dieser richtet sich ganz nach den örtlichen Verhältnissen.

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. Überspannungsschutzgeräte, abgehende Stromkreise, Sammelschienenabschnitte usw., zeigt Abb. 363. Jede Fernleitung ist im Kraftwerke und in den parallel an dieser (l_I und l_{II}) liegenden Transformatorenwerken mit Trennschaltern $Tr.$ versehen. Soll in der Fernleitung l_I gearbeitet werden, so sind die Trennschalter im Kraftwerke und in den Anlagen ($Tr.$, $Tr. \frac{1}{A}$, $Tr. \frac{1}{B}$, $Tr. \frac{1}{C}$) zu öffnen, da anderenfalls die Leitung l_I über l_{II} und die Sammelschienen in einem der Werke unter Spannung stehen würden, selbst wenn sie im Kraftwerke abgeschaltet wären. Sind andererseits im Werke B am Transformator und seinen Schaltern Untersuchungen vorzunehmen, so ist $Tr. \frac{2}{B}$ und $Tr. \frac{4}{B}$ zu öffnen. Wird $Tr. \frac{4}{B}$ nicht aus-

geschaltet, so würde der Transformator infolge der Verbindungsleitung $l_{A,B}$ rückwärts transformieren und damit die Hochspannungsseite wieder unter Spannung setzen, wenn sein Ölschalter versehentlich eingeschaltet wäre. Soll schließlich ein Teil des sekundären Ringverteilungsnetzes der Anlage C untersucht oder erweitert werden, dann ist der benachbarte Streckentrennschalter und der zugehörige Sammelschienentrennschalter zu öffnen.

Abb. 363, die besonders zu studieren empfohlen werden kann, läßt erkennen, wie außerordentlich vorsichtig man in der Wahl der Trennstellen sein muß, um größte Beweglichkeit in der Betriebsführung der Anlage auch bei Störungen zu erhalten und andererseits die Arbeiter bei Untersuchungen usw. nicht zu gefährden.

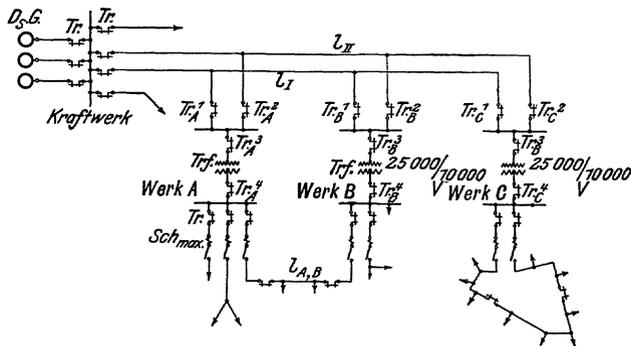


Abb. 363. Trennschalteranordnung in den Anlagen eines größeren Hochspannungsnetzes.

Das Schaltbild läßt vollständig erkennen, an welchen Stellen Trennschalter erforderlich sind. Auf das bei der Besprechung der einzelnen Schaltbilder Gesagte muß nochmals hingewiesen werden.

Es liegen in Abb. 359 die Transformatoren-Ölschalter und der Kuppelschalter zwischen Trennschaltern, weil bei Untersuchungen oder Instandsetzungen z. B. an einem der beiden Transformatorstromkreise dieser vollständig außer Betrieb gesetzt werden muß, ohne andere Teile der Anlage ebenfalls ausschalten zu müssen. Die dann insgesamt noch zu übertragende Leistung ist natürlich auf die Hälfte zurückgegangen, doch ist das bei den gewöhnlichen Untersuchungen und Prüfungen nicht von besonderer Bedeutung, wenn diese an den Sonntagen, in den späten Abend- und Nachtstunden oder am Tage zu Zeiten geringer Belastung vorgenommen werden. Damit auch Sammelschienenabschnitte spannungslos gemacht werden können, sind ebenfalls Schalter einzubauen, die z. B. in Abb. 359 als Trennmesser ausgeführt sind. Oftmals werden an Stelle dieser Trennschalter selbsttätige Ölschalter benutzt, um beim Parallelbetrieb mehrerer Transformatoren in Störungsfällen sofort auch eine Sammelschienentrennung und damit eine Störungseingrenzung zu erreichen, was mit Trennmessern, die das Schalten unter Strom nicht zulassen, nicht durch-

führbar ist. Selbstverständlich ist an Trennschaltern tunlichst zu sparen, da sie Geld und Platz beanspruchen,

Sind die Trennschalter für einen Stromkreis in verschiedenen Stockwerken angeordnet, so empfiehlt es sich, sie noch mit besonderen Hilfskontakten auszurüsten, die dazu dienen, in einer bestimmten Stellung Meldelampen im Bedienungsgang oder auf einem Blindschaltbilde (Abb. 374 u. 410), Alarmglocken usw. zu betätigen. Auf diese Weise können falsche Schaltungen mit Hilfe der Trennmesser und vor allen Dingen Unglücksfälle beim Arbeiten in einem Stromkreis durch Rücktransformierung vermieden werden. Abb. 361 zeigt diesen Hilfsschalter am Trennschalter. Bei gekuppelten Trennschaltern und bei höheren Spannungen werden die Meldekontakte besser am Gestänge angebracht derart, daß sie auch im Betriebe nachgesehen werden können. Das ist bei der Ausführung nach Abb. 361 nicht möglich. Die Meldelampen mehrerer Trennmesser eines Stromkreises werden vorteilhaft in Reihe geschaltet, um weitere Schaltsicherheit zu erhalten und gegebenenfalls auch prüfen zu können, ob etwa eine Lampe oder der Hilfsstromkreis gestört ist (S. 442 u. Abb. 368).

Die Leitungstrennschalter werden bei höheren Spannungen noch mit Erdungsschaltern (Abb. 362) ausgerüstet, um auf diese Weise eine schnelle, sichere und gefahrlose Erdung der Freileitung zu erzielen und nicht mit Erdungsstangen, Erdungsketten u. dgl. arbeiten zu müssen. Solche Erdungsschalter sind dann aber mit dem Antriebe des betreffenden Leitungstrennschalters mechanisch so zuverlässig zu verriegeln, daß sie erst eingelegt werden können, wenn der Trennschalter geöffnet ist und umgekehrt.

Die Leistung, die mit einem Trennschalter abgeschaltet werden darf, beträgt je Funkenstrecke etwa 50 kVA. Hieraus kann angenähert auf die zulässige Leistung des mit solchen Trennschaltern auszuschaltenden Transformators geschlossen werden. Sie ist abhängig von der Betriebs- und Kurzschlußspannung, sowie von der Anzahl der parallel arbeitenden Transformatoren, wenn angenommen wird, daß die Abschaltung eines Transformators im allgemeinen schon erfolgen wird, sobald bei n Transformatoren die Leistung des abzuschaltenden Transformators um ein n tel gesunken ist. Da bei einer größeren Anzahl parallel arbeitender Transformatoren hierbei sich nahezu der volle Nennstrom für die Unterbrechung am Trennschalter ergibt, so soll der Rechnung stets der volle Nennstrom des Transformators zugrunde gelegt werden. Wenn von n parallel arbeitenden Drehstrom-Transformatoren gleicher Leistung mit einer verketteten Spannung U und e_k vH Kurzschlußspannung einer durch einen dreipoligen Trennschalter mit m Unterbrechungsstellen je Pol abgeschaltet werden soll, dann ist beim Öffnen des Trennschalters zu Anfang die Spannung am beginnenden Lichtbogen angenähert Null, der Strom nach obiger Annahme gleich dem Nennstrom des Transformators. Die Spannung steigt im abreißen Lichtbogen auf die Kurzschlußspannung des vollbelasteten Transformators, der Strom sinkt auf Null. Bezeichnet

man, wie allgemein bei Schaltern, als Schaltleistung des Trennschalters das Produkt aus Strom und Spannung, so erhält man die Beziehung:

$$3 \cdot \left(\frac{e_k}{100} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot I_{Trf} \right) = 3 (m \cdot 50),$$

I_{Trf} = Nennstrom des Transformators, U = Spannung in kV,

oder:

$$\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{Trf} = \frac{300}{e_k} (m \cdot 50).$$

Hierin gibt $\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{Trf}$ die Leistung des Transformators in kVA an. Für $e_k = 6$ vH und $m = 2$ ergibt sich:

$$\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{Trf} = \frac{300}{6} 2 \cdot 50 = 5000 \text{ kVA.}$$

Trotz dieses rechnerischen Ergebnisses ist es nicht zulässig, Trennschalter bei Spannungen über 6 kV zum betriebsmäßigen Schalten von Transformatoren an Stelle von Ölschaltern zu benutzen, weil der auftretende Lichtbogen Überspannungen erzeugt und infolge seiner außerordentlichen Beweglichkeit schon bei geringem Luftzuge zu einem Kurzschluß zwischen zwei Phasen führen kann.

b) 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 unter Last 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.

Das auf S. 145 über Sicherungen und Luftschalter Gesagte gilt hier in gleichem Maße, so daß Einzelheiten nicht weiter zu behandeln sind.

Bei den Ölschaltern, deren Schaltmesser in einem mit Öl gefüllten, aus Eisenblech gefertigten, vollständig gegen die Umgebung abgedichteten Kessel liegen, kann eine Lichtbogenbildung beim Ausschalten nur unter Öl stattfinden, weil die Stromunterbrechung unter Öl erfolgt, d. h. weil Öl zwischen die Kontakte tritt. Diese Schalter müssen in Mehrphasenanlagen stets derart ausgeführt sein, 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 verketteten Zweiphasenstrom ein dreipoliger Schalter am einfachsten für den Mittelleiterstrom bemessen zu verwenden sind. In Drehstromnetzen sind dreipolige Schalter zu benutzen, deren Messer entweder zusammen in einem Ölkessel liegen (Einkesselschalter), oder die bei sehr großen Stromstärken bzw. hohen Spannungen aus drei einpoligen Schaltern (Dreikesselschalter) zusammengesetzt sind, die aber mechanisch starr miteinander verbunden sein müssen, damit die Unterbrechung stets gleichzeitig in allen drei Phasen erfolgt. Die Auflösung des dreipoligen Schalters in drei Einzelschalter ist besonders bei sehr großen

Schaltleistungen empfehlenswert, wenn zu befürchten ist, daß die Stromunterbrechung in einem Einkessel-Ölschalter unter Umständen ohne Zerstörungen innerhalb des Schalters nicht mehr möglich ist. Schalterexplosionen, die dabei auftreten können, gehören zu den unangenehmsten Betriebsvorkommnissen, weil mit ihnen gewöhnlich ein Ölbrand verbunden ist, der zu unabsehbaren Folgen führen kann. Das früher geübte Aufstellen je eines Kessels in einer Zelle ist heute dank der zuverlässigen baulichen Durchbildung nicht mehr erforderlich. Besonders das Sachsenwerk hat aber in neuester Zeit selbst für 100 kV und sehr große Abschaltleistung Drehstrom-Einkesselschalter gebaut, die sich bisher bewährt haben, worauf besonders hingewiesen werden soll. In Abb. 364 ist ein Dreikessel- und in Abb. 365

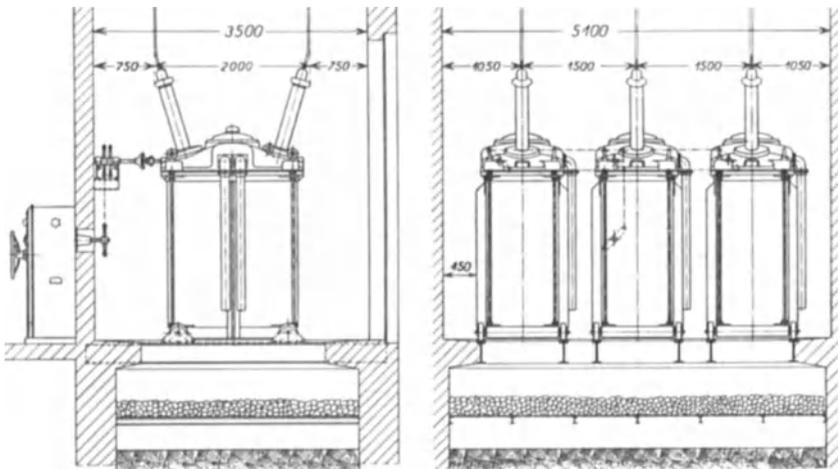


Abb. 364. Dreikessel-Ölschalter für 100 kV.

ein Einkessel-Ölschalter abgebildet. Die Beschaffungskosten einerseits und die Raumbeanspruchung andererseits sind naturgemäß außerordentlich unterschiedlich und sprechen sehr zugunsten der Einkesselschalter. Die Leitungsführung kann bei letzterem ebenso klar wie beim Dreikesselschalter durchgebildet werden. Aus Abb. 365 ist zu ersehen, wie sich die Zellenabmessungen ändern, was für die Baukosten beachtlich ist.

Das Einschalten des Ölschalters erfolgt in Transformatorenwerken je nach dem Aufbau der Gesamtanlage und der Größe des Schalters von Hand oder elektrisch durch Motor bzw. Drehmagnet. Das Ausschalten desselben kann entweder von Hand oder selbsttätig durch die Relais geschehen, die auf eine Auslösvorrichtung am Schalter wirken. Im letzteren Falle ersetzt der Schalter gleichzeitig die Sicherungen.

Die Anzahl der Relais für jeden Schalter richtet sich nach dem Stromsystem. Bei Einphasenstrom genügt ein Relais. Bei Zweiphasen-

strom 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.

Als Relais benutzt man solche, die entweder vom Strome unmittelbar durchflossen, oder die bei Hochspannung bzw. großen Stromstärken unter Zwischenschaltung besonderer Meßwandler an die Stromkreise angeschlossen werden. Man unterscheidet dabei Relais mit Augenblicksauslösung, die sofort ansprechen, wenn der Strom eine ein-

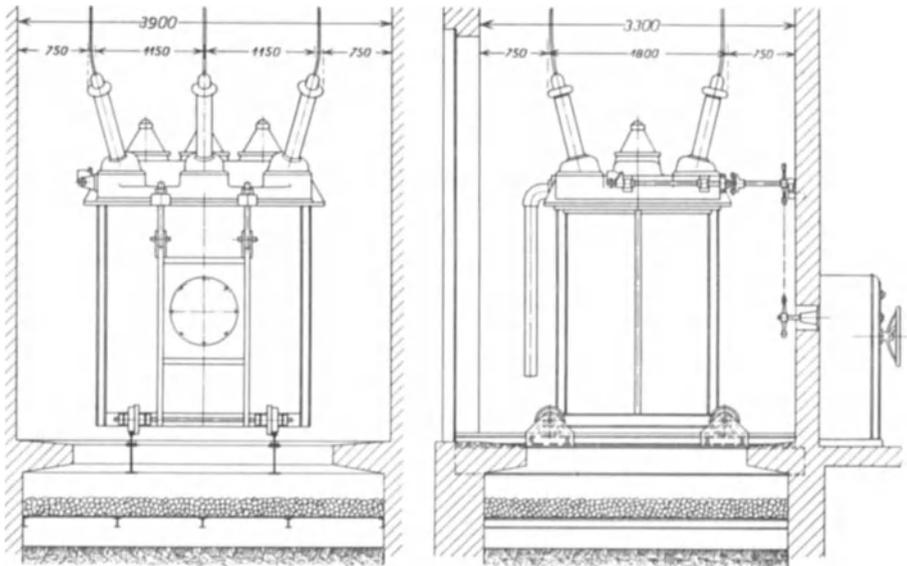


Abb. 365. Einkessel-Ölschalter für 100 kV.

gestellte Höchstgrenze überschreitet (Maximalrelais), und solche, die erst ein zwischengeschaltetes Uhrwerk auslösen, das nach Ablauf die Klinkvorrichtung des Schalters betätigt (Zeiteinstellung). Schalter mit Relais der letzten Art sind für Transformatoren die vorteilhafteren, weil die Transformatoren selbst kurzzeitig stark überlastbar sind, und die ganze Sekundäranlage bei plötzlichen Stromstößen nicht stets unterbrochen wird.

Ferner ist noch kurz zu erwähnen, daß erstlich das Öl ähnliche Eigenschaften aufweisen muß, wie für die ölisierten Transformatoren, und daß weiter jeder Ölkessel mit einer Sicherheitseinrichtung gegen den inneren Gasdruck beim Ansprechen des Ölschalters, einem Ölablaß und einem Ölstandszeiger ausgerüstet sein soll. Schließlich ist es notwendig, daß der Ölkessel leicht entfernt, also abgesehen werden kann, um die Schaltmesser bequem und schnell untersuchen bzw. an Ort und Stelle instandsetzen zu können.

Für sehr hohe Spannungen und Leistungen werden die Ölschalter als sog. Schutzschalter ausgeführt, wie sie auf S. 148 für große Drehstrommotoren beschrieben wurden. Sie gestatten ein allmähliches „Unterspannungsetzen“ des Transformators und begrenzen die Überspannungsgefahr beim plötzlichen Einschalten der Hochspannungsseite. Ihre Benutzung ist stark umstritten. Der Betrieb vermeidet sie gern, weil das Zu- und Abschalten der im Kessel liegenden Widerstände nicht immer völlig zuverlässig erfolgt, und beim Versagen oder bei einem Fehler im Schutzwiderstande eine außerordentliche Gefährdung des Ölschalters durch den unter Strom bleibenden Widerstandes eintritt. Manche Schalterexplosionen sind hierauf schon zurückzuführen gewesen. Das Herauslegen dieser Widerstände aus dem Schalter ist vereinzelt vorgenommen worden, hat aber ebenfalls seine Nachteile und vergrößert zudem den erforderlichen Raum für den Schalter beträchtlich.

Sollen in kleinen Anlagen statt der selbsttätigen Ölschalter Streifen-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.

Um die Betriebsstellung des Ölschalters an den verschiedenen Bedienungsplätzen innerhalb des Werkes sofort erkennen zu können, ist derselbe wiederum mit einer Meldevorrichtung zu versehen, die aus zwei Glühlampen — in der Regel eine rote für „Aus“ und eine grüne für „Ein“ — besteht. Das erleichtert die Betriebsführung außerordentlich.

Die Meldelampen sind selbstverständlich auch bei den Steuerschaltern für den elektrischen Antrieb auf der Schalttafel oder dem Schaltpulte unterzubringen. Parallelgeschaltete Lampen bei den Schaltern selbst sind dann empfehlenswert, wenn die Stellung des Schalters von außen nicht ohne weiteres schnell und sicher erkannt werden kann.

c) **Die Meßgeräte.** Die notwendigsten Meßgeräte, 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 genügt ein Spannungszeiger primär, um jederzeit feststellen zu können, ob die Zuleitung unter Spannung steht, und ein Stromzeiger für die Beobachtung der Belastung. Der Einbau eines Zählers wird sich nach der Verrechnungsform der Stromlieferung oder nach statistischen Zwecken zu richten haben. In solchen Werken dagegen, die größeren Umfang haben und die deshalb unter ständiger Aufsicht stehen, wählt man auf der Sekundärseite Strom-, Spannungs-, Leistungsfaktor- und vereinzelt Leistungszeiger, sowie gegebenenfalls Zähler. Wohl zu beachten ist bei der Wahl dieser Geräte, 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. Um nach dieser Richtung unabhängig zu sein, werden heute nur Geräte für ungleichbelastete Phasen verwendet, obgleich ihre Beschaffungskosten höher sind, da sie Strom- und Spannungswandler für zwei Phasen erfordern.

Auf der Oberspannungsseite auch großer Werke soll man ebenfalls tunlichst sparsam mit Meßgeräten sein, weil die Beschaffung der dann notwendigen Meßwandler sehr teuer und der Raumbedarf für die Unterbringung letzterer einschließlich der Leitungsführung beträchtlich ist.

Sind Kraftwerk und Transformatorenwerke in einer Hand, so genügen Spannungszeiger wieder für die Zuführungsleitungen, die von 50 kV ab an die als Kondensatoren ausgebildeten Gebäudeeinführungen angeschlossen werden. Bei geringerer Spannung sind Meßwandler erforderlich. Die Belastung der Transformatoren wird oberspannungsseitig an einem unmittelbar in die Hochspannung eingebauten Stromzeiger beobachtet. Die Stromrelais der Ölschalter erfordern Stromwandler, die entweder als getrennte Wandler aufgestellt oder als sog. Durchführungstromwandler z. B. in den Ölschalter- oder Deckendurchführungen ausgeführt werden. Bei größerer Kurzschlußleistung des Kraftwerkes müssen diese Wandler kurzschlußsicher sein. Mechanisch bestehen trotz der Erschütterungen beim Schalten großer Schalter für die Durchführungswandler keine Bedenken. Unterspannungsseitig werden zumeist erforderlich sein: Spannungszeiger für jeden Transformator oder für die Sammelschienen zur Überwachung der gelieferten, d. h. also abgegebenen Spannung, Stromzeiger oder Leistungszeiger und gegebenenfalls Zähler. Der Einbau von schreibenden Geräten wird im allgemeinen nicht erforderlich sein, da das Kraftwerk alle betrieblich wissenswerten Vorgänge aufzeichnen wird.

Wesentlich mehr Geräte sind nötig für den Betrieb größerer Werke, die aus fremder Stromquelle Energie beziehen. Die Stromlieferungsverträge werden hierfür in der Hauptsache bestimmend sein. So sind neben den Spannungs- und Stromzeigern für eine oder alle Phasen Leistungs- und Leistungsfaktorzeiger, sowie Frequenzmesser zumeist unentbehrlich. Arbeiten zwei fremde Stromquellen zusammen, würden zu diesen Geräten noch schreibende Geräte und eine Parallelschaltvorrichtung hinzutreten. Die Schreibstreifen geben zur Aufklärung von Betriebsvorkommnissen (Spannungsschwankungen, Pendelungen, Frequenzschwankungen, Lage von Störungsstellen und vielem mehr) die beste Handhabe und überwachen zudem das Betriebspersonal vorzüglich. Gleiche Geräte ergänzt durch Zähler werden oft auch auf der Unterspannungsseite nicht fehlen dürfen.

Alle diese Anzeigevorrichtungen werden dann zusammen mit den Steuerschaltern für die Ölschalter und den Meldelampen für die Trennschalterstellungen sowie andere Überwachungsvorrichtungen wie Buchholzschutz, Gefahrmelder für Transformatoren, Wandler und Ölschalter, Temperaturmeßvorrichtungen für die verschiedenen Stellen selbst und

fremdgekühlte Transformatoren in einem besonderen Schaltraum, dem Hauptbedienungsgehe oder der Warte (Zentralkommandoraum), vereinigt. Im IV. Bande sind alle Einzelheiten behandelt. Die Angaben auf S. 445 und in der Besprechung eines großen Transformatorenwerkes im 63. Kap. sind hier zur Ergänzung heranzuziehen. In dieser Warte hält sich die Bedienung auf, überwacht den Gesamtbetrieb und erhält alle Ferngespräche, Betriebsanweisungen u. dgl.

d) Der Überspannungsschutz¹. Schließlich soll noch Einiges über den Einbau von Überspannungsschutzgeräten gesagt werden. Hier gehen heute noch die Ansichten weit auseinander; bindende Regeln für alle Fälle lassen sich nicht aufstellen. Auf eine nähere Schilderung der einzelnen elektrischen Vorgänge, die für die Wahl dieser Schutzgeräte bestimmend sind, und auf die verschiedenen Geräte selbst ist im IV. Bande ausführlicher eingegangen.

Für Anlagen bis 1000 V werden heute keine Schutzgeräte mehr eingebaut. 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. Die Überspannungsschutzsicherung im Kraftwerk genügt zumeist zur Ableitung.

Über diese Spannung hinaus bis etwa 6000 V genügen Hörnerfunkenstrecken, die bei größeren Anlagen zur Begrenzung der beim Ansprechen der Schutzvorrichtung nach Erde fließenden Stromstärke Dämpfungswiderstände erhalten. Diese Widerstände bestehen entweder aus Carborandum oder einem ähnlichen Baustoff oder aus Draht (Nickelin, Konstantan usw.), der in Spulen gewickelt in einem eisernen, mit Öl gefüllten Kessel untergebracht ist (Ölwiderrstand).

In Anlagen mit höherer Spannung können die Überspannungen eine solche Höhe erreichen, daß die Isolation der Schaltgeräte, Sammelschienen usw. nicht mehr ausreicht oder auch die Transformatorwicklungen Gefahr laufen, durchschlagen zu werden. Um daher die Überspannungen zunächst von den Transformatoren fernzuhalten, wurde und wird auch heute noch den letzteren ein hoher induktiver Widerstand in Form einer Kupferspirale mit zahlreichen Windungen vor-

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.

Müller, Dr.-Ing. H.: Wanderwellenversuche in betriebsmäßigen Schaltungen an Transformatorenstationen für 15-kV-Netze. Elektrizitätswirtschaft 1928, Nr. 463.

Finckh, F.: Spannungsstöße auf Freileitungen bei Blitzentladungen, ihre Hochtransformierung in den Transformatoren der Überlandnetze und ihre Bekämpfung. Elektrizitätswirtschaft 1926, Nr. 413.

VDE: Leitsätze für den Schutz elektrischer Anlagen gegen Überspannungen.

geschaltet. Man nennt eine solche Spule eine Drosselspule (Induktionsspule), weil sie 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 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 mit Dämpfungswiderständen, deren Schlagweite so eingestellt ist, daß sie bei einer bestimmten, durch die zu schützenden Einrichtungen bedingten Spannungshöhe überbrückt werden kann. Wird der von der Drosselspule zurückgeworfenen Spannungswelle eine künstliche Ableitung durch die Funkenstrecken nicht geboten, dann sucht sich dieselbe einen anderen Weg zur Erde und zwar in Form eines Lichtbogens entweder durch einen Überschlag nach benachbarten, geerdeten Eisenteilen oder über einen bzw. mehrere Isolatoren der Sammelschienen, Durchführungen u. dgl. oder der Freileitung. Das muß nach Möglichkeit verhindert werden, da im ersteren Falle Zerstörungen in der Schaltanlage und im zweiten Falle Störungen in der Fernleitung hervorgerufen werden, die zu unliebsamen Betriebsunterbrechungen führen. Bei Kabeln tritt natürlich eine Beschädigung der Isolation an einer schwächeren Stelle und damit eine Zerstörung dieses Teils der Kabelstrecke ein. Es werden daher zur Ableitung an die Fernleitungen oder an die Sammelschienen wiederum Hörnerfunkenstrecken mit Dämpfungswiderständen angeschlossen.

Neueste Erfahrungen und Untersuchungen haben gezeigt, daß der Schutzwert der einfachen Drosselspulen gering ist, sogar in das Gegenteil umschlägt, wenn Resonanz zwischen Spuleninduktivität und Netzkapazität eintritt. Dann können Transformatoren und Maschinen unmitttelbar gefährdet werden.

Der Drosselspule kommt daher nur dann ein tatsächlicher Schutzwert zu, wenn der Überspannungs-Wanderwelle durch eine Überbrückung der Spule mittels entsprechender Ohmscher Widerstände die Möglichkeit gegeben wird, ihre Energie in

einer für die Transformatoren und Maschinen ungefährlichen Form abzugeben. Eine entsprechend gebaute Schutzdrossel ist die sog. Campospule¹, deren Wirkungsweise das in Abb. 366 gezeichnete Schaltbild erkennen läßt.

Eine ankommende Wanderwelle findet im Augenblicke ihres Auftreffens auf eine Campos-Drosselspule den Weg nicht vollkommen

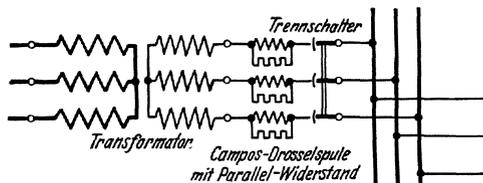


Abb. 366. Schaltbild für Überspannungsschutz mit Campos-Drosselspule.

¹ Gabor: Einige Untersuchungen mit dem Kathodenoszillographen zur Aufklärung von Überspannungserscheinungen. Elektrizitätswirtschaft 1926, Nr. 413, S. 307.

versperrt, sondern gibt einen Teil ihrer Energie über den Ohmschen Widerstand ab, wo er in Joulesche Wärme umgesetzt wird. Die Campospule hat also die Fähigkeit, einer sie durchlaufenden Welle dauernd Energie zu entziehen, während die gewöhnliche Drosselspule den Energiebetrag, den sie der Wanderwelle anfangs entzieht, später wieder restlos an die Leitungen abgibt.

Allgemein sind alle diese Schutzdrosselspulen nur dann von Wert, wenn sie eine Induktivität von mindestens 5 mH und mehr besitzen. Für die Berechnung des Gesamtspannungsabfalles auf der Unterspannungsseite der Transformatoren ist der Spannungsabfall in den Schutzdrosselspulen zu berücksichtigen. Er beträgt etwa 0,3 bis 0,5 V für 1 A und 1 mH.

Die Gegenüberstellung des Schutzwertes und der Beschaffungs- und Einbaukosten der Drosselspulen zu den verstärkt isolierten Eingangswindungen größerer und größter Transformatoren hat heute dazu geführt, daß für größere Anlagen mit höheren Spannungen Drosselspulen nicht mehr verwendet werden. Die Betriebserfahrungen aus sehr gewitterreichen Gegenden und aus Anlagen mit 50 und 100 kV, in denen zudem sehr viel geschaltet wird, haben diese Ansicht bestärkt und ergeben, daß die Nichtbenutzung von Drosselspulen keinerlei Betriebsnachteile mit sich gebracht hat.

Für Mittelspannungsanlagen bis etwa 15 kV wird man die Drosselspule noch benutzen, sofern die Transformatoren nicht mit entsprechend verstärkter Isolation ausgeführt sind.

Will man trotz der Vermeidung von Drosselspulen besonders sicher gehen, so kann an Stelle dieser ein Kabelstück genügender Länge eingeschaltet werden, um durch die Erhöhung der Kapazität der Strombahn der Überspannung entgegenzuwirken. Die Isolation solcher Kabel muß mindestens der doppelten Betriebsspannung entsprechen, um gegen Durchschlag die notwendige Sicherheit zu gewährleisten. Auch die Kabelendverschlüsse müssen dieser Bedingung genügen. Weiter ist rechnerisch zu ermitteln, welche Länge diesem Schutzkabel gegeben werden muß, um bei der betreffenden Betriebsspannung den notwendigen Kapazitätswert zu erreichen. So beträgt z. B. die Kabellänge bei 50 kV etwa 40 bis 50 m. Für die Bemessung des Kabelleiterquerschnittes und der Kabelendverschlüsse ist die Höhe und Dauer der Kurzschlußleistung bestimmend, die an der Einbaustelle auftreten kann.

Erfahrungen zum Vergleich des Schutzwertes beider Ausführungsformen liegen nicht vor. Sie werden auch außerordentlich schwer zu sammeln sein, da die Überspannungsbeanspruchungen naturgemäß stark wechseln und bei der Zerstörung einer Schutzdrosselspule nicht mit Sicherheit behauptet werden kann, daß eine Kabelstrecke besseren Schutzwert gewährt hätte.

Betrieblich zu beachten ist der Umstand, daß, sofern der zu schützende Transformator nicht gelitten hat, eine zerstörte Drosselspule bei entsprechenden Einbauverhältnissen leicht überbrückt und der Betrieb dann schnell wieder aufgenommen werden kann (aus Abb. 279 leicht zu ersehen), während das bei einem zerstörten Kabel zumeist

nicht der Fall ist, die Betriebsstörung vielmehr bis zur Herstellung einer Notverbindung wesentlich längere Zeit in Anspruch nimmt. Nach dieser Richtung wird daher auch zu prüfen sein, ob das Schutzkabel zwischen Abspannmast und Transformatorenwerk oder zwischen Ölschalter und Transformator einzufügen ist. Die letztere Anordnung ist im Hinblick auf leichtere Instandsetzungsarbeiten zumeist empfehlenswerter.

Der Preis für einen Kabelschutz nach Baustoffen, Einbau usw. ist wesentlich höher als derjenige für eine Drosselspule, wenn für letztere der erforderliche Platz im Bau an sich vorhanden ist. Man sollte daher immer mehr verlangen, daß durch entsprechende Ausbildung der Transformatorwicklungen und durch Erhöhung der Isolation der Gesamtanlage besondere Überspannungsschutzgeräte überhaupt entbehrlich werden.

Außer den bisher genannten Überspannungsschutzgeräten kommt bei ausgedehnten Hochspannungsleitungsnetzen noch die Erdung des Transformatornullpunktes über einen Widerstand oder eine Drosselspule zur Anwendung. Diesem Schutz fällt die Aufgabe zu, 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 gefährbringende Spannungshöhe erreichen kann, dauernd nach Erde abzuleiten. Bei mehreren Transformatoren kann man, wie das in Abb. 367 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 Geräte, die Raumbeanspruchung usw. wesentlich verringert. In Anlagen mit geerdetem Nulleiter ist dieser Schutz naturgemäß nicht erforderlich.

Nur kurz ist weiter auf den Einbau von Petersenspulen und Löschtransformatoren hinzuweisen zur Kompensierung des Erd-schlußstromes der Leitungen. Über die Herausführung der Nullpunkte der Transformatorwicklungen ist bereits gesprochen worden.

Besonders sei noch darauf aufmerksam gemacht, daß sämtliche Überspannungsschutzgeräte stets unter Zwischenschaltung von Trennmessern an die zu schützende Leitung anzuschließen sind, damit man sie auch im Betriebe abtrennen und gefahrlos nachsehen, instandsetzen oder auswechseln kann.

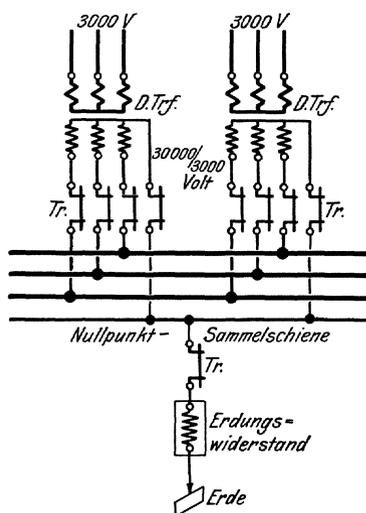


Abb. 367. Nullpunktserdung bei Transformatoren zur Ableitung statischer Ladungen.

58. Der Aufbau der Schaltanlage und die Aufstellung der Transformatoren.

a) **Allgemeine Gesichtspunkte.** Ist das Schaltbild festgelegt und sind die Meß- und Schaltgeräte 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 Entwurfes eines Transformatorenwerkes sind mit die schwierigsten. Sie bedürfen großer Überlegung, sowie langjähriger praktischer Erfahrungen, wenn sie nach jeder Richtung zweckentsprechend, allen Ansprüchen über Betriebs- und Bedienungssicherheit und den Regeln auf S. 408 Rechnung tragen sollen. Die Zahl der Ausführungsmöglichkeiten ist hierfür außerordentlich groß. Der eingehenderen Besprechung sollen wiederum einige allgemeine Gesichtspunkte vorangestellt werden.

Zunächst richtet sich der Aufbau der Schaltanlage und die Aufstellung der Transformatoren nach dem zur Verfügung stehenden Platze, wobei bereits 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. Auch heute noch findet man Schaltanlagen, die allein schon zu betreten lebensgefährlich ist ganz abgesehen davon, daß in solchen beschränkten Räumen auch noch betriebsmäßige Schaltungen, Instandsetzungsarbeiten, Untersuchungen u. dgl. vorgenommen werden müssen. Ist ein in Aussicht genommener Raum zu klein, dann bestehe man unter allen Umständen darauf, daß derselbe durch einen Umbau oder Anbau vergrößert wird, denn insbesondere bei Hochspannungsanlagen soll die Schaltanlage nicht nach dem Raume, sondern umgekehrt der Raum nach der Schaltanlage entworfen werden, sonst sind Betriebsstörungen durch Vorkommnisse in den Schaltgeräten und Leitungsanordnungen und Gefährdungen 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 übergehen, ein besonderes Transformatorenhaus auf Grund eines zeichnerisch vollständigen Entwurfes der Gesamtanlage zu bauen. Dabei soll auch die äußere Form des Gebäudes nach der Umgebung architektonisch, selbstverständlich aber in einfachsten Linien, ausgeführt werden. Wie auf das gesamte Landschaftsbild störend wirken bei Überlandwerken

oftmals die Transformatorhäuser, obgleich ohne wesentliche Erhöhung der Baukosten weit Besseres und Geschmackvolleres hätte geschaffen werden können. Der entwerfende Ingenieur darf in solchen Fällen nicht nur ein einseitiger Techniker sein, sondern er muß auch den Architekten zu Rate ziehen, wenn er nicht selbst über etwas Kunstsinn verfügt. Maß und Ziel ist hierbei aber natürlich nicht aus

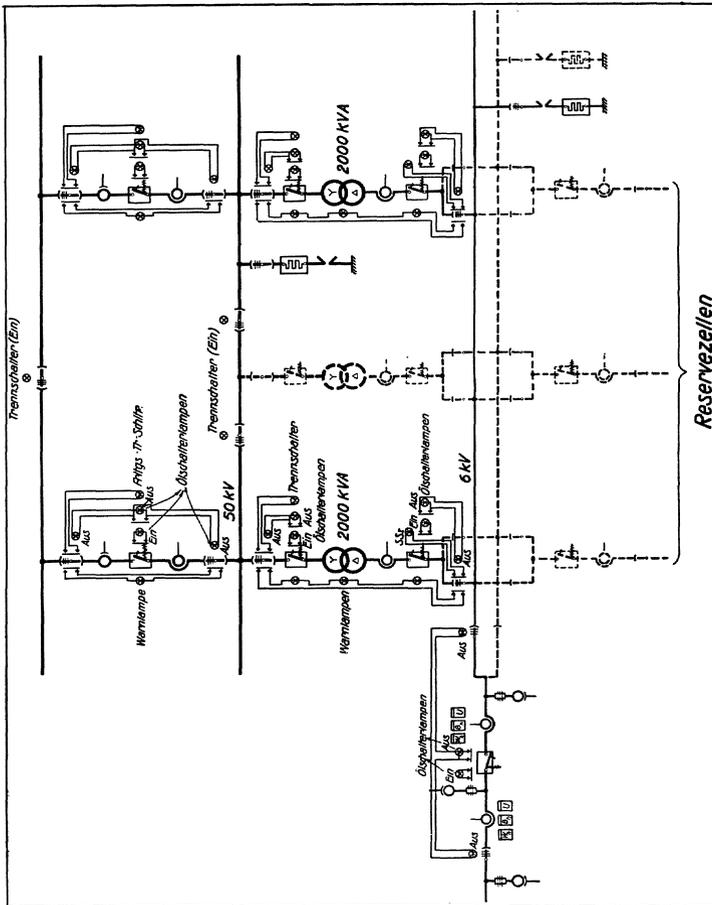


Abb. 368. Schaltbild der Meldelanlage eines Transformatorwerkes.

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.

Der innere Aufbau richtet sich 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. Auf Erweiterungen ist ebenfalls von vornherein Rücksicht zu nehmen, was nicht vergessen werden darf.

Hierher gehört auch die Beachtung des auf S. 351 über die Lage der Transformatorzellen zur Himmelsrichtung Gesagten.

Die Schaltgeräte jedes Stromkreises für Hochspannung werden in Zellen untergebracht, die nach dem Bedienungsgange offen sind. Für mittlere Spannungen werden zum Abschluß gegen Berührung Holzleisten oder besser aufklappbare Drahtgitter vorgesetzt, um an Raumbeanspruchung zu sparen. Bei höheren Spannungen läßt man die Zellen oft ohne solchen Schutz, weil die Abstände spannungsführender

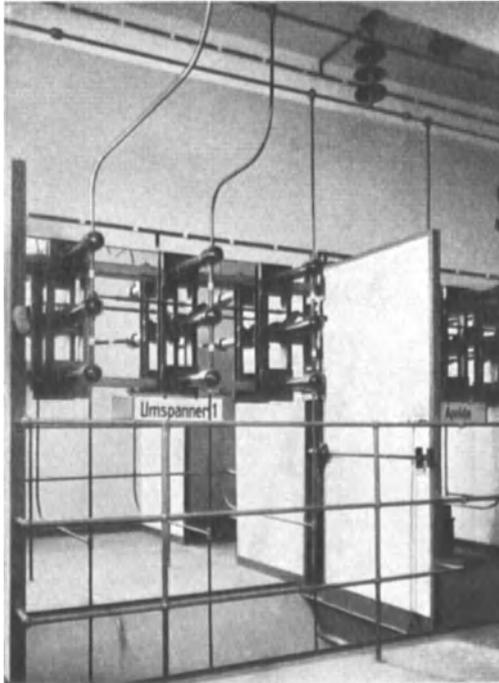


Abb. 369. 50-kV-Sammelschienenzelle des Transformatorwerkes nach Abb. 372; Ölschalterauslampe auf der Zellenwand teilweise sichtbar.

Teile von Erde bzw. vom Bedienenden selbst so groß sind, daß Berührung nur mit besonderen Hilfsmitteln oder mutwillig bzw. durch grobe Fahrlässigkeit möglich ist.

Um der Bedienung anzuzeigen, ob diese Schaltzellen betreten werden dürfen, soll jede Zelle eine Meldelampe erhalten, die nur brennt, wenn die Zelle allseitig spannungsfrei ist, und damit anzeigt, daß Arbeiten in der Zelle gefahrlos vorgenommen werden

können. Diese Sicherheits-schaltung zwingt dazu, beim Versagen der Lampe festzustellen, auf welche Ursache das Versagen zurückzuführen ist, um jede Gefahrmöglichkeit sofort zu erkennen. Auch eine zerstörte Lampe zwingt zur Auswechslung, bevor die Zelle freigegeben werden darf.

Während des Arbeitens in der Zelle muß die Lampe dauernd eingeschaltet sein. Zur Stromersparnis an sich wird jede Lampe mit einem Schalter versehen. Abb. 368 zeigt das Schaltbild für eine solche Gefahrlampen-Meldeanlage. Die Öl- und Trennschalter müssen zu diesem Zwecke mit den bereits erwähnten Meldekontakten in der „Aus“-Stellung versehen sein. Die Lampen eines Stromkreises sind hintereinanderschalten.

In Abb. 369 und 370 sind solche Schaltzellen mit Gefahrlampe, in Abb. 371 die Lampe selbst in einer besonderen Ausführung mit beleuchtetem Transparent wiedergegeben. Auch in Abb. 428 u. f. sind diese Lampen für die einzelnen Geräteeinbauten zu sehen.

In der räumlichen Aufteilung der Schaltzellen auf das Erd- und Obergeschoß und der Lage zu den Transformatoren, zu den an- und abgehenden Leitungen u. dgl. soll streng übersichtlich verfahren werden, um die Betriebsführung und Betriebsüberwachung so klar und einfach wie möglich zu gestalten. Lagenvertauschung der Zellen gegenüber dem Verlauf der einzelnen Stromkreise durch die Gesamtschaltanlage sollen tunlichst vermieden werden, Stromkreiskreuzungen und Umführungen nicht vorkommen, der Überblick über den Stromverlauf in deutlicher Form und tunlichst in Übereinstimmung mit dem Schaltbilde gewährleistet sein.

Alle Räume mit Schaltgeräten, die Öl enthalten, sollen nach Spannungen zusammengefaßt und vom

Hauptbedienungsgange, von dem aus geschaltet wird und der die Meßgeräte, Fernsprecher usw. enthält, in dem sich also die Bedienungsmannschaft aufhält, qualm- und feuersicher abgeschlossen werden (Abb. 372).

In Erfüllung dieser Forderung müssen alle Mauer- und Deckendurchbrüche für die Leitungsführung mit Durchführungsisolatoren versehen sein. Innerhalb der Räume dagegen, die einer Verqualmungsfahr nicht ausgesetzt sind, bleiben die Durchbrüche offen, um an Isolatoren zu sparen und die Gesamtübersicht zu erhöhen. An Stelle der Durchführungsisolatoren treten bei höheren Spannungen die als solche ausgebildeten Stromtransformatoren.

Die Sammelschienen, die nach Zahl und Ausdehnung die Raumgröße und Raumgestaltung wesentlich bestimmen, werden entweder

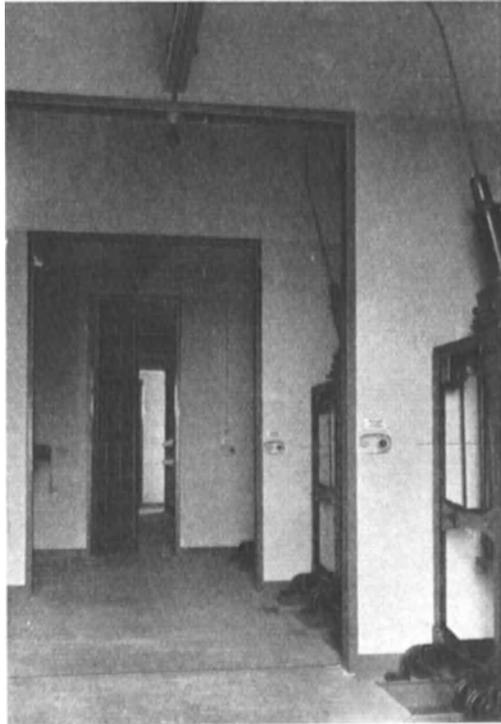


Abb. 370. 50-kV-Ölschalterraum des Transformatorenwerkes nach Abb. 372; Unterteilung durch Schottentür, Warnlampen auf den Zellenwänden.



Abb. 371. Gefahr Lampe.

444 Schaltbild und Aufbau vollständiger Transformatoranlagen.

auf Stützern oder an Hänge-Isolatoren befestigt. Die letztere Ausführung bürgert sich selbst für Spannungen bis 10 kV herunter

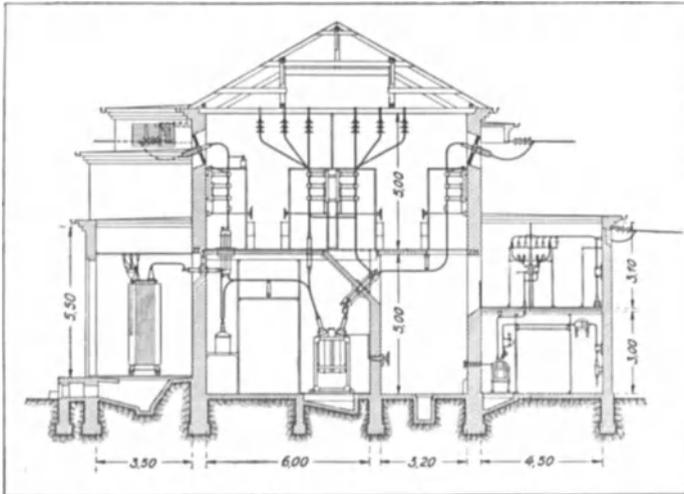


Abb. 372 a. Schnittzeichnung durch ein Transformatorwerk für 50/10 kV.

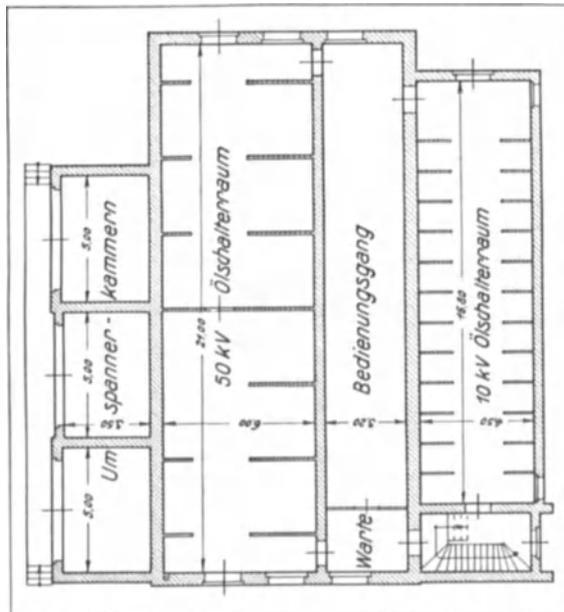


Abb. 372 b. Grundriß.

immer mehr ein, weil sie sich unter Benutzung der Decken zumeist leicht, übersichtlich und bequem bauen läßt und Raumersparnis gestattet. Instandsetzungsarbeiten und Reinigung ist zwar etwas um-

ständlicher, was indessen betrieblich nicht von Belang ist. Weiter für den Betrieb übersichtlicher und besser, wenn auch in der Beanspruchung des umbauten Raumes größer ist die vollständige räumliche Trennung der Ober- und Unterspannungssammelschienen. Wenn irgend möglich sollte diese daher gewählt werden. Wird ferner von den in Zukunft vorgesehenen Doppelsammelschienen im ersten Ausbau nur eine Sammelschiene verlegt, dann ist der Bauentwurf unbedingt auf der Doppelsammelschiene von vornherein aufzubauen. Andernfalls



Abb. 373. Hauptbedienungsang des Transformatorenwerkes nach Abb. 372; Kraftspeicherantrieb für die 50-kV-Freileitungölschalter, für die übrigen Ölschalter Handantrieb, im Hintergrunde die Warte.

ist es später infolge des dann fehlenden Raumes besonders bei höheren Spannungen nicht mehr möglich, eine zweite Sammelschiene einzubauen.

In größeren Transformatorenwerken wird der Hauptbedienungsang neuerdings derart gestaltet, daß von ihm aus die Gesamtanlage der Sammelschienen, Leitungsein- und -ausführungen, Trennschalter und sonstigen Schalteinrichtungen möglichst vollständig überblickt werden können. Die Abb. 372 zeigt Schnitt und Grundriß durch ein nach diesen Gesichtspunkten gebautes 50/10-kV-Transformatorenwerk und bedarf hier zunächst keiner weiteren Erläuterungen. Das Mauerwerk zum 10-kV-Sammelschienenraum ist nach dem Hauptbedienungsang durchbrochen, um die Ruf- und Augenverbindung zu diesem zu ge-

währleisten. Die Decke des Ölschalterraumes 50-kV-seitig ist abgeschrägt, um einen freien Blick zum Obergeschoß zu erhalten. Am Ende des Hauptbedienungsanges ist eine kleine Warte durch Einfügen einer Glaswand geschaffen. Abb. 373 und 374 zeigen die Einzelheiten. Bei ständig besetztem Werke kann sich der Wärter in diesem leicht heizbaren Raume aufhalten, den Bedienungsang vollständig übersehen

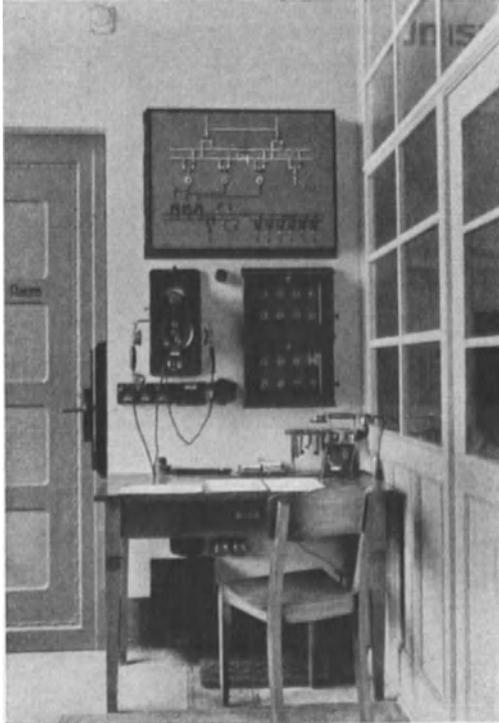


Abb. 374. Warte des Transformatorwerkes nach Abb. 372 mit Leuchtschaltbild, Gefahrmeldeklappenschrank, Post- und Betriebsfernsprecher.

und den sonstigen Betrieb führen. Ein Leuchtschaltbild der Gesamtanlage zeigt ihm die jeweilige Stellung der Trenn- und Ölschalter an. Fallklappenmeldevorrichtungen mit Lätewerk unterstützen diese Einrichtung. Betriebs- und Staatsfernsprecher stehen der Betriebsführung zur Verfügung.

Je nach der Größe des Bauplatzes ist dann der Bauentwurf nach dem Schaltbilde des Werkes in seinen ersten Grundzügen darauf zu behandeln, ob Flach- oder

Stockwerksbau in Frage kommt. Wohl zu beachten ist hierbei von vornherein der in Zukunft etwa zu erwartende Vollausbau des Werkes. Da für diesen einmal die Größe der Transformatoren, dann die Zahl der ankommenden und ab-

gehenden Leitungen als Freileitungen oder Kabel in der Hauptsache bestimmend sind, wird man zweckmäßig derart verfahren, daß die Transformatorkammern für größere Transformatorleistungen bemessen und mit ihren Schaltern und Trennmessern zur Gesamtanlage so gegliedert werden, daß entweder zu beiden oder zu einer Seite die Erweiterungsmöglichkeit vorgesehen wird.

Für den Gesamtraumbedarf sind bestimmend die Abstände zwischen den einzelnen Phasen eines Stromkreises und zwischen benachbarten Stromkreisen. Der VDE hat hierfür Mindestmaße in seinen Vorschriften für die Errichtung und den Betrieb von Starkstromanlagen festgelegt. Für erste Entwurfsarbeiten kann die Feldbreite eines Stromkreises für Drehstrom etwa angenommen werden zu:

10,0 m für	150 kV	Betriebsspannung
7,5—8,0 „ „	100 „	„
3,5—4,0 „ „	50/60 „	„
2,0—2,5 „ „	30 „	„
1,0 „ „	15 „	„
0,8 „ „	10 „	„

In der Zahl der Stockwerke soll man sich die größte Beschränkung auferlegen, da die Gesamtanlage für den Betrieb unübersichtlicher und schwerer bedienbar wird, Fehlschaltungen insbesondere durch Bedienen falscher Trennmesser häufiger möglich sind und die Prüfgänge der Schaltwärter zu lang und anstrengend werden. Aufmerksamkeit und Zuverlässigkeit leiden darunter. Bei Störungen und deren Beseitigung sind lange Wege innerhalb der Schaltanlage besonders unerwünscht und verschlechtern nur die Betriebsführung. Die Gliederung in Erd- und Obergeschoß läßt sich in den meisten Fällen ermöglichen. Die Forderungen des Betriebes werden hier am besten erfüllt. Die Flachbauweise mit nur einem Erdgeschoß ist nicht immer die beste. Hierfür gilt das auf S. 460 bei den Freiluftanlagen Gesagte sinngemäß.

Kann die Mehrgeschoßanlage nicht vermieden werden, so ist je nach dem Einbau ölenthaltender Schaltgeräte und der Lage dieser zum Gesamtbau bzw. den Treppen und Bedienungsgängen für schnelle Beseitigung einer Ölverqualmung besonders Sorge zu tragen. Der Brandbegünstigung durch Luftzug ist erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken. Mit gutem Erfolge sind besondere Mauerkanäle benutzt worden, die mit natürlichem oder künstlichem Zug die teilweise Belüftung bestimmter Räume ermöglichen.

Der Entscheidung, welche Bauform zu wählen ist, muß wiederum eine konstruktive Durcharbeitung der gesamten Anlage vorausgehen, die mit zu den interessantesten Aufgaben zählt. Selbstverständlich bedarf es hierzu ganz besonders reicher Erfahrungen und sollte daher jeder Fachingenieur aus den Veröffentlichungen in den Fachzeitschriften und durch das Studium ausgeführter Werke immer neue Anregungen schöpfen, um der schnellen Entwicklung einerseits und vor allen Dingen den immer steigenden Anforderungen des Betriebes andererseits folgen zu können. Das betrieblich Beste — und darauf kommt es in erster Linie an — zusammen mit geringsten Anlagekosten für das Gesamtwerk, also einschließlich der Baulichkeiten, wird schon für mittlere, ganz besonders aber für große Werke nur auf Grund der Vergleiche der verschiedenen Bauformen zu finden möglich sein. Fast jedes neu zu errichtende Werk ist anders anzufassen. Während man bis vor wenigen Jahren nur die Unterbringung der Gesamtanlage in einem mehrstöckigen Gebäude zur Ausführung brachte, geht die Entwurfsbearbeitung heute von dieser Gebäudeform über die vielen Zwischenlösungen bis zur Freiluftanlage. Das Nachfolgende wird die Mannigfaltigkeit auch in der baulichen Ausgestaltung zeigen und soll aus der Kritik ermöglichen, schon bei der ersten Entwurfsbearbeitung die Fälle einzugrenzen, die für bestimmte Neuanlagen oder Erweiterungen der Untersuchung wert sind.

Für den Zusammenbau zwischen Transformatoren und Schaltgeräten haben sich heute folgende Ausführungsformen herausgebildet, die kritisch nach der technischen und preislichen Seite hin untersucht werden sollen. Besondere Einzelheiten in Anlehnung und Vervollständigung des bisher Gesagten werden dabei ebenfalls noch zur Sprache kommen, so daß erst das Studium aller dieser Bauformen ein abschließendes Gesamturteil gestatten wird. Kleine Anlagen für Mittelspannungen werden am Schluß dieses Kapitels behandelt, da ihre Durchbildung dann einfacher und leichter zu übersehen sein wird.

Gesamtanlage im geschlossenen Gebäude mit Abtrennung der Öl enthaltenden Einrichtungen von den übrigen Teilen der Anlage (Kammerbau);

Gesamtanlage im geschlossenen Gebäude ohne Abtrennung einzelner Anlageteile (Hallenbau);

Schaltanlage im geschlossenen Gebäude, Aufstellung der Transformatoren im Freien;

Freiluftanlage.

Da der Vergleich die beste Möglichkeit bietet, den Unterschied der einzelnen Bauformen nach allen Richtungen hin erkennen und beurteilen

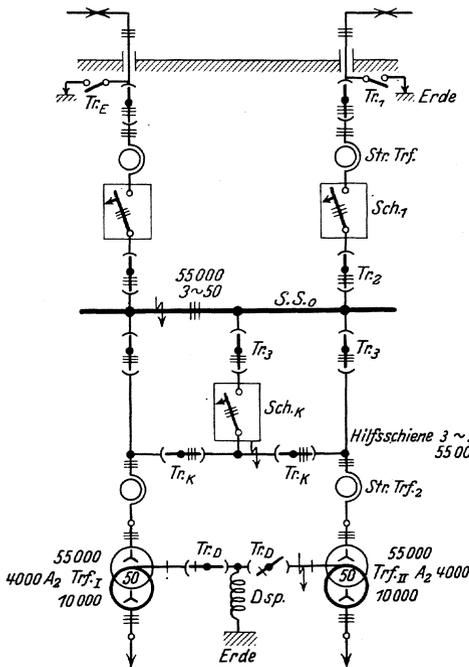


Abb. 375. Schaltbild zu den Schaltanlagen
Abb. 376 bis 380 und 384.

zu können, ist für Abb. 376 bis 380 und 384 das in Abb. 375 gezeichnete Schaltbild für zwei Transformatoren von je 4000 kVA bei 55/6 kV, Drehstrom, Frequenz 50 zugrunde gelegt. Die verschiedenen Bauformen sind nur für die 55-kV-Seite durchgebildet. Eine Erweiterung auf der Oberspannungsseite ist für später in Aussicht genommen. Wird sie notwendig, so soll sie auf einer Stirnseite des Werkes vorgenommen werden. Die Unterspannungsseite wird erst nach dem Vergleich zusammen mit kleineren Mittelspannungsanlagen besprochen werden.

Das Schaltbild ist auf der Verwendung der geringsten Zahl von Oberspannungsölschaltern aufgebaut. Es zeigt gegenüber Abb. 355 und 357 eine andere Lösung dergestalt, daß die beiden Freileitungen (Durchgangsanlage)

ihre Ölschalter erhalten haben, die Transformatoren dagegen mit dem Ölschalter *Sch.* über eine Hilfsschiene einzeln zu- und abgeschaltet werden. Es wird dadurch ein Ölschalter erspart. Unter Berücksichtigung

der Blocktrennung nach Abb. 355 werden zwei Trennschalter und die Hilfsschiene mehr erforderlich. Der Preisunterschied geht zugunsten dieser vereinfachten Schaltung, da für die Hilfsschiene an umbautem Raum, d. h. an Gebäude- und Grundstückskosten keine Mehraufwendungen zu machen sind, weil der Raum an sich anfällt. Für die Erdschlußlöschung ist noch eine Petersenspule umschaltbar auf jeden der beiden Transformatoren oberspannungsseitig vorgesehen. Auf die Lage der Trennschalter *Tr.* gegenüber dem zu Abb. 357 Gesagten sei kurz aufmerksam gemacht.

b) Gesamtanlage im geschlossenen Gebäude mit Abtrennung der Öl enthaltenden Einrichtungen von den übrigen Teilen der Anlage (Kammerbau). Das Grundsätzliche dieser Bauform liegt darin, daß Transformatoren und Schaltgeräte in einem massiven Gebäude untergebracht sind und weiter, daß die Öl enthaltenden Einrichtungen innerhalb des Gebäudes in besonderen Räumen aufgestellt werden, die von den Sammelschienen und Meßgeräten, sowie dem Aufenthalt der Bedienung baulich abgetrennt sind. Ölqualm und Ölbrand bzw. auch Zerstörung oder Explosion der Schaltgeräte mit Öl bleiben dann räumlich eng begrenzt und können dadurch den Betrieb nicht im ganzen gefährden oder gar lahmlegen.

Abb. 376 zeigt Schnitte und Grundrisse einer solchen Anlage, die durchaus neuzeitlich ist. Sie gliedert sich in ein Erd- und Obergeschoß. Im Erdgeschoß befinden sich durch massive Mauern vom Bedienungsgange getrennt in 3 Kammern die 3 Ölschalter und die Stromwandler der Freileitungen, in 3 weiteren Kammern die beiden Transformatoren und die Erdschlußlöschspule. Alle Geräte sind von außen zugänglich und nach außen ausfahrbar. Im Obergeschoß liegen sämtliche Trennschalter mit ihren Antrieben, die Sammelschienen und die Hilfsschiene. Die Freileitungen treten im Obergeschoß ein bzw. aus (Schnitt *C—C*), gehen über die Trennschalter *Tr.₁* unter Zwischenschaltung von Durchführungen zu den Stromwandlern und Ölschaltern im Erdgeschoß, von letzteren wieder unter Benutzung von Durchführungen über die Trennschalter *Tr.₂* zu den Sammelschienen *S.S.₀*, von diesen über die Trennschalter *Tr.₃* (Schnitt *D—D*) zur Hilfsschiene, von dort über die als kurzschlußsichere Schleifenstromwandler in den Transformatorkammern untergebrachten Stromwandler *Str.Trf.₂* zur Oberspannungsseite der Transformatoren *Trf.* Der transformierte Strom wird durch Kabel abgeleitet. Die Transformator-Nullpunkte sind über eine mit Trennschaltern *Tr._D* versehene Leitung, die unter Einfügung von Durchführungen die Kammer für die Petersenspule durchfährt, mit letzterer zu verbinden.

Die Sammel- und Hilfsschienen sind an Hängeisolatoren aufgehängt, eine Ausführung, die der Befestigung auf Stützisolatoren wegen der besseren Übersicht und der allgemeinen Vorteile der Hängegegenüber den Stützisolatoren (Unterteilung der Isolatoren auf 3 Einzelisolatoren, geringeren Einfluß von Staub und Schwitzwasser, größere Übersicht, billigere Anlage unter Benutzung der an sich nötigen Dachkonstruktionen) hier durchweg vorgezogen worden ist. Als Trenn-

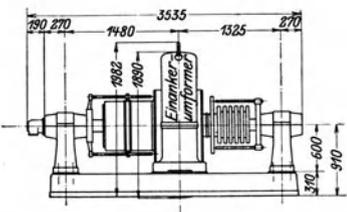
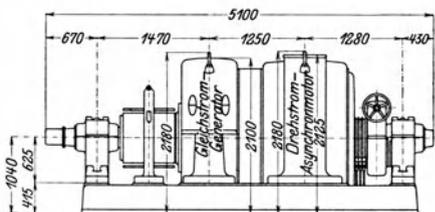
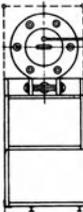
1	Bezeichnung										
2	Anzahl der Lager	4									
3	Abmessungen										
4	Gleichstromleistung kW	1000									
5	Spannung	<table border="0"> <tr> <td rowspan="2" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">{</td> <td>Gleichstr. Volt</td> <td>550</td> </tr> <tr> <td>Drehstr. Volt</td> <td>bis 6500</td> </tr> </table>	{	Gleichstr. Volt	550	Drehstr. Volt	bis 6500				
{	Gleichstr. Volt	550									
	Drehstr. Volt	bis 6500									
6	Drehzahl in der Minute	600									
7	Frequenz	50									
8	Gesamt-Wirkungsgrad in % bei $\cos \varphi = 1$ (bei $\cos \varphi = 0,8$) und Belastung	<table border="0"> <tr> <td rowspan="4" style="font-size: 4em; vertical-align: middle;">{</td> <td>$\frac{4}{4}$</td> <td>89,0 (87,8)</td> </tr> <tr> <td>$\frac{3}{4}$</td> <td>87,4 (86,1)</td> </tr> <tr> <td>$\frac{2}{4}$</td> <td>84,0 (82,0)</td> </tr> <tr> <td>$\frac{1}{4}$</td> <td>75,0 (72,5)</td> </tr> </table>	{	$\frac{4}{4}$	89,0 (87,8)	$\frac{3}{4}$	87,4 (86,1)	$\frac{2}{4}$	84,0 (82,0)	$\frac{1}{4}$	75,0 (72,5)
{	$\frac{4}{4}$	89,0 (87,8)									
	$\frac{3}{4}$	87,4 (86,1)									
	$\frac{2}{4}$	84,0 (82,0)									
	$\frac{1}{4}$	75,0 (72,5)									
9	Erregermaschine	<table border="0"> <tr> <td rowspan="2" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">{</td> <td>Leistung kW</td> <td>10,8</td> </tr> <tr> <td>Spannung Volt</td> <td>65 bis 220</td> </tr> </table>	{	Leistung kW	10,8	Spannung Volt	65 bis 220				
{	Leistung kW	10,8									
	Spannung Volt	65 bis 220									
10	Transformator bei $\cos \varphi = 1$. . kVA	1130									
11	Elektrische Ausführung	m									
12	Mechanische Ausführung	mit gemeinsar									
13	{	Einzelgewichte in kg	{	Gleichstrom- maschine	Ständer mit Wendepolen	9050					
					Anker	3000					
					Welle	450					
					Lager	1300					
					Kupplung.	560					
			{	Drehstrom- motor	Ständer.	7885					
					Läufer	4800					
					Schleifringe	65					
					Welle	700					
					Lager	660					
Grundrahmen	5200										
Erregermaschine.	500										
14	Gesamtgewicht ohne Transformator kg	34179									

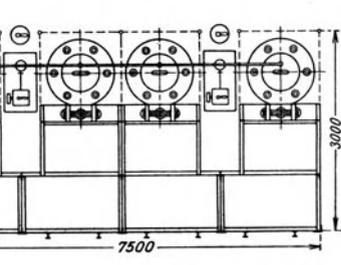
Zusammenstellung der elektrischen und mechanischen Werte für die verschiedene Synchron-Motorgeneratoren

Synchron-Motorgenerator		Asynchr.-M
3	2	3
		<p>vom Syn- Motorge- nur unwe- abweic- (Erreger- fällt f</p>
1000	1000	1000
550	550	550
bis 6500	bis 6500	bis 6500
600	600	600
50	50	50
89,0 (87,8)	89,1 (87,9)	$\cos \varphi \begin{cases} 0, \\ 0, \\ 0, \\ 0, \end{cases}$
87,4 (86,1)	87,5 (86,2)	
84,0 (82,0)	84,1 (82,1)	
75,0 (72,5)	75,0 (72,5)	
10,8	10,8	
65 bis 220	65 bis 220	—
1130	1130	1000
mit Wendepolen	—	mit Wendepolen
auf dem Grundrahmen und angebaute Erregermaschine, ohne Anwurfsmotor		mit gemeinsamer Grundrahmen
9050	9050	9050
3000	3000	3000
400	(gemeinsam) 1900	400
770	(gemeinsam) 880	(1 Lager) 770
560	—	560
7885	7885	7885
4800	4800	4800
65	65	65
650	—	650
330	—	(2 Lager) 330
3800	2900	3800
500	500	500
31810	30980	31810

(siehe S. 251 u. f.)

verschiedenen Ausführungen eines Drehstrom-Gleichstrom-Umformers.

Motorgen.	Einankerumformer	Kaskadenumformer	Qu
	2	2	
Asynchron-Generator (essentially mech. machine (port.))			
1000	1000	1000	
550	550	550	
1000	Transformatorspannung primär beliebig	bis 7500	Transfo
750	750	500	
50	50	50	
91	89,3	93,0 (—)	
90	88,4	92,2 (—)	
86	85,5	90,0 (—)	
—	77,0	82,5 (—)	
—	—	—	
—	—	—	
1080	1040	1060	
Wendepole	6 Schleifringe, Wendepole, Dämpferwicklung	Zwölfphasig, Wendepole, Dämpferwicklung	
Grundrahmen	Grundplatte, ohne Anwurfsmotor	mit gemeinsamem Grundrahmen, besondere Luftführung	
1050	6450	9280	Gesam I
1000	2440	(beide Maschinen) 8725 (mit Welle)	
1450	500	—	
1330	730	1600	
1560	—	—	
1000	—	5910	
1200	—	—	
1100	300	(Bürstenbrücke) 420	
1300	—	—	
1320	—	—	
1200	1900	(mit Luftführung) 2550	
—	—	—	
10510	12320	28485	

Quecksilberdampf-Gleichrichter		Bezeichnung	1
		Anzahl der Lager	2
		Abmessungen	3
1000	Gleichstromleistung	kW	4
550	Spannung	Gleichstr. Volt	5
Transformatorspannung primär beliebig		Drehstr. Volt	
ruhend	Drehzahl in der Minute		6
50	Frequenz		7
96,0	Gesamt-Wirkungsgrad in % bei $\cos \varphi = 1$ (bei $\cos \varphi = 0,8$) und Belastung	$\frac{4}{4}$	8
96,0		$\frac{3}{4}$	
96,0		$\frac{2}{4}$	
95,3		$\frac{1}{4}$	
—	Erreger- maschine	Leistung kW	9
—		Spannung Volt	
2×820	Transformator bei $\cos \varphi = 1$	kVA	10
sechsheisig	Elektrische Ausführung		11
vier Zylinder parallel	Mechanische Ausführung		12
Gewicht 4950	Ständer mit Wendepol.	Gleichstrommasch.	Einzelgewichte in kg
	Anker		
	Welle		
	Lager		
	Kupplung		
	Ständer	Drehstrommotor	
	Läufer		
	Schleifringe		
	Welle		
	Lager		
600	Grundrahmen		
—	Erregermaschine		
15550	Gesamtgew. ohne Transform.	kg	14

schalter wie überhaupt über den Sammelschienenraum wird weiter durch den Deckendurchbruch ermöglicht. Zur Verbesserung ist auch hier wieder die Mauerkante der Ölschalterkammer abgeschragt. Der Grundriß *A—A* gibt weitere Einzelheiten des Sammelschienenraumes.

Für die vergleichende Beurteilung der verschiedenen Bauformen ergibt sich folgendes:

Dadurch, daß die Ölschalter und Transformatoren in allseitig geschlossenen Kammern stehen und für den Durchtritt der Leitungen durch das Innenmauerwerk Durchführungen benutzt sind, ist jede Verqualmungsgefahr des Sammelschienen- und Bedienungsraumes ausgeschlossen (Grundriß *B—B*). Bei zweckentsprechender Wahl und Anordnung der Meldelampen (auch bei den Ölschaltern und Transformatoren) für völlige Spannungsfreiheit kann die Bedienung in jeder Weise sicher und zuverlässig gehandhabt werden. Allerdings werden Fehler in den Ölschaltern und Transformatoren nur auf den Prüfgängen festzustellen sein. Es ist daher zu empfehlen, zum mindesten die Transformatoren mit Fernthermometern auszurüsten, die im Bedienungs-gange angebracht werden. Die Wege für die Bedienung sind innerhalb des Werkes einfach und kurz. Schwitzwasserbildung im Sammelschienenraum kann bei richtiger Ausführung des Mauerwerkes und zweckentsprechende Lüftung vermieden werden. Betriebstechnisch nachteilig ist die große Zahl von Durchführungen, die einschließlich Gebäudeeinführungen mit 32 Stück vorhanden sind. Sie lassen sich indessen bei der geschlossenen Gebäudeform dieser Art nicht vermeiden. Gut ist der Aufbau in nur 2 Stockwerken; er sollte, wie bereits früher gesagt, stets angestrebt werden.

Die Zahlentafel 28 gibt für den Vergleich besonders wertvolle Einzelheiten und bedarf daher hier zunächst keiner weiteren Erläuterung.

Bei dieser Bauform sind noch einige Sonderheiten elektrischer und bautechnischer Art erwähnenswert, da sie für die kritische Beurteilung der folgenden Baugestaltung von besonderer Bedeutung sind.

Die Ein- und Ausführung der Leitungen erfolgt in Abb. 376 unter Zwischenschaltung von Durchführungen. Auf die Betriebsgefährdungen durch Störungen an diesen ist bereits wiederholt hingewiesen worden. Das hat Veranlassung gegeben, nicht nur bei Mittelspannung, sondern herauf bis zu 100 kV die Durchführungen durch einfache Maueröffnungen, die mit Glasplatten abgeschlossen werden, zu ersetzen. Der Glasplattenabschluß hat bei geringeren Spannungen ohne betriebliche Nachteile wiederholt Anwendung gefunden. Bei 50 kV und mehr müssen die Glasplatten und die Durchtrittsöffnungen durch sie außerordentlich große Abmessungen erhalten, um Überschlag über die Platte nach Erde und dann unter Umständen Zerstörung der Platte zu verhüten. Bei unreiner Luft, aus der sich Staub, Ruß usw. auf der Glasplatte absetzen und durch Feuchtigkeitshinzutritt verkrusten kann, ist diese Art der Leitungseinführung nicht anzuwenden. Vor starker Benetzung durch Regen und Schnee, ferner vor Vereisung ist die Platte durch entsprechende bauliche Überdachung zu schützen. Auswechslungen gestalten sich schwieriger als bei der Porzellandurchführung.

Da auch unter sonst günstigen Verhältnissen Betriebserfahrungen über lange Jahre bisher nicht vorliegen, kann diese Form der Leitungseinführung nicht zuverlässig empfohlen werden. Besonders zu beachten ist bei der Plattendurchführung noch die Temperaturregelung im Sammelschienenraum, die bei Höchstspannung, also großem Lochdurchmesser, unter Umständen auf Schwierigkeiten stößt.

Über die bauseitige Gestaltung der Leitungseinführung für hohe Spannungen sei auf das im 63. Kap. Gesagte verwiesen. Die leichte Zugänglichkeit zur Reinigung und Auswechslung der Durchführungen muß unbedingt vorhanden sein, zumal die Durchführungen von außen einzusetzen sind und bei höheren Spannungen recht beachtliches Gewicht (bei 50 kV etwa 500, bei 100 kV etwa 900 kg) besitzen. Bei mittleren Spannungen können Leitern benutzt werden. Bei hohen Spannungen wird entweder das Dach entsprechend ausgebildet, oder es werden Balkone unter den Durchführungen angebracht, die dann gefahrlos betretbar sein müssen.

Zum Vergleich mit Abb. 376 ist nunmehr Abb. 372 heranzuziehen für ein ähnliches 50-kV-Werk, das gleichzeitig die Unterspannungsanlagen umschließt.

Weiter unterschiedlich ist in Abb. 372 die Aufstellung der Ölschalter, die nicht unmittelbar ins Freie gefahren werden können, sondern innerhalb des Werkes Aufstellung finden mußten, um die Unterspannungsanlage unmittelbar anbauen zu können. Auch die geschlossenen Kammern sind vermieden und durch Zellen, die nach dem Fahrgange zu offen sind, ersetzt. Bei dieser Aufstellung und einer größeren Zahl von Ölschaltern ist die Unterteilung des Fahrganges durch eine oder zwei eiserne, nach beiden Seiten aufschlagende Türen in Schotten zur Eingrenzung von Verqualmung und Explosionsausdehnung erforderlich (Abb. 370). Die Schottentüren sollen außerdem nicht fest verschlossen sein, um bei einer Explosion eine Raumentlastung durch einen Druckausgleich nach dem benachbarten Raum zu gewinnen.

Wesentlich bei dem Bau nach Abb. 372 ist ferner, daß auch die Unterspannungsölschalter in einem vom Hauptbedienungsgange abgeschlossenen Raume stehen, über dem sich die Doppelsammelschienen und Trennschalter befinden. Auf die Gesamtübersicht vom Hauptbedienungsgange ist nochmals besonders aufmerksam zu machen.

c) Hallenbau. Eine erst in den letzten Jahren besonders von B.B.C. und S.S.W. durchgebildete Bauform mit massivem Gebäude unter Vermeidung der zahlreichen Durchführungen und Gewinn an Übersichtlichkeit ist die in Abb. 377 gezeichnete. Sie unterscheidet sich grundsätzlich von den bisher besprochenen Aufbauformen darin, daß die Ölschalter und Wandler mit ihren Ölkesseln versenkt in den Fußboden eingebaut werden. Dadurch wird für die gesamte Schaltanlage eine freie Halle gewonnen. Die Transformatoren stehen wiederum in besonderen Kammern.

Dieser Hallenbau hat den betriebstechnischen Vorteil, daß innerhalb der eigentlichen Schaltanlage alle trennenden Zwischenwände fortfallen. Die Übersicht ist, wie die Praxis bestätigt, vorzüglich. Eine

ausführliche Beschreibung eines 100-kV-Transformatorwerkes dieser Ausgestaltung ist im 63. Kapitel gegeben. Jede Gefährdung durch Verqualmung ist bei sachgemäßer Ausführung der Ölschalterkessel mit ihren Befestigungen an den Ölschalterplatten ausgeschlossen. Auch

Explosionswirkungen können nicht gefährlich werden, wenn die Ölkessel mechanisch derart bemessen sind, daß sie gegebenenfalls nach unten abgetrieben werden. Das Untergeschoß hat in Abb. 377 Austritt ins Freie erhalten. Ölbrand und Explosion wirken sich in die freie Umgebung des Werkes aus. Von dem Bedienungsgange läßt sich die Gesamtanlage auf das beste übersehen. Die Trennschalter sind an eisernen Gerüsten befestigt, die die Übersicht nicht stören, zweckentsprechende Durchbildung naturgemäß vorausgesetzt.

An Durchführungen sind nunmehr nur noch wiederum einschließlich der Gebäudeeinführungen und der als kurzschlußsichere Durchführungswandler ausgebildeten Stromwandler *Str. Trf.* insgesamt 14 Stück vorhanden, ein Vorteil, den der Betrieb sehr begrüßt.

Hinsichtlich der Ausführung von Untersuchungs- und Instandsetzungsarbeiten bestehen gegenüber der Anlage nach Abb. 376 keine nennenswerten Nachteile. Die Untersuchung der Ölschalterkontakte — eine oft vorzunehmende Arbeit — ist im Gegenteil hier wesentlich einfacher, weil die Ölkessel einfach abgesehen werden können. Das Herausheben des Schalters aus dem Ölkessel ist umständlicher, weil dann stets Leitungsabklemmungen und andere Hilfsarbeiten notwendig werden. Bei der Bauform nach Abb. 376 muß der Ölschalter ausgefahren werden, wenn er nicht in ein Eisengestell eingelagert ist, das die vollständige Absenkung des Ölkessels gestattet.

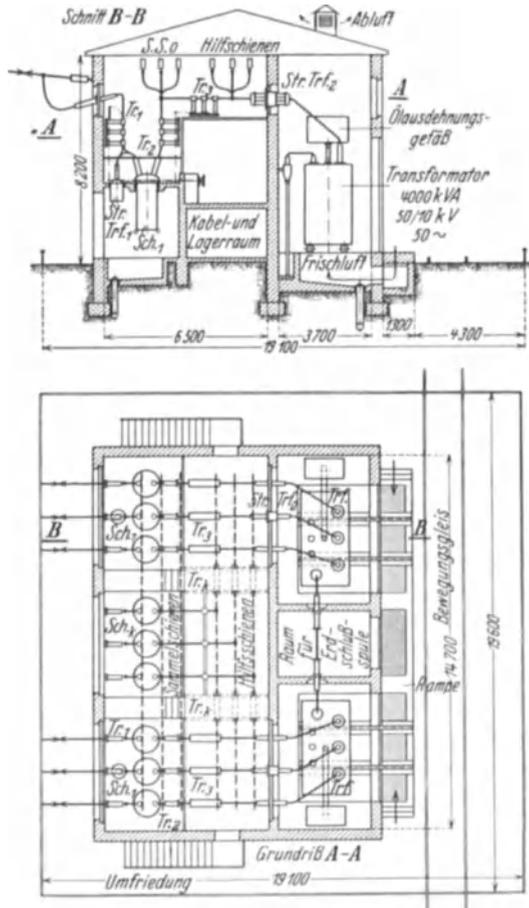


Abb. 377. Transformatorenwerk in Hallenbauform mit versenktem Ölschaltereinbau.

Aus der Zahlentafel 28 sind die für den Vergleich weiter besonders wissenswertes Daten zu ersehen.

d) Gesamtanlage im geschlossenen Gebäude ohne Abtrennung einzelner Anlagenteile (Abb. 378). Dieser Aufbau unterscheidet sich von den bisherigen darin, daß er als Hallenbau auch noch die

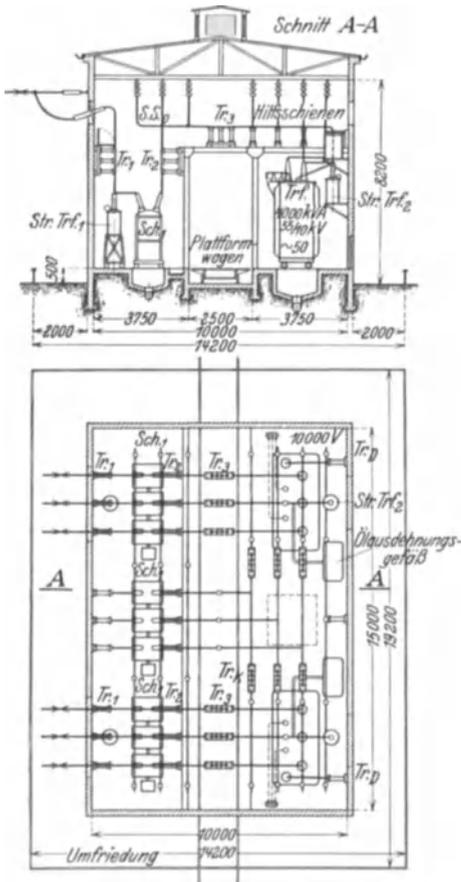


Abb. 378. Transformatorwerk ohne Einbauterteilungen (Hallenbau).

Transformatoraufnimmt. Obgleich diese Ausführung z. B. in der Schweiz bereits ausgeführt worden ist¹, und sich auch bewährt hat, können die Vorteile geringerer Anlagekosten und gewonnener Übersichtlichkeit gegenüber Abb. 377 die betriebstechnischen Bedenken nicht aufheben. Welcher Art diese Bedenken sind, ist aus dem bisher Gesagten unschwer festzustellen (Verqualmung, kein geschützter Aufenthalt für die Bedienung usw.). Für Durchgangswerke größeren Umfanges und besonderer Bedeutung würde der Verfasser diese Bauform jedenfalls nicht wählen. Für vereinzelt Kopfanlagen könnten die Bedenken unter Umständen zurücktreten, sofern das aufzuwendende Anlagekapital letzten Endes ausschlaggebend ist. Tatsächlich ist diese Bauform die billigste nach der Zahlentafel 28, wobei aber die Ausführung des Hochbaues selbst die konstruktive Durchbildung der Schaltgeräte und demnach den Gesamtpreis bestimmt. Entweder kann das Gebäude nach den allgemeinen Regeln für den Hochbau massiv angelegt oder in der sog. Leichtbauweise

hergestellt werden, bei welcher die Umfassungswände mit Dach lediglich eine einfache Schutzummantelung gegen unmittelbare Witterungseinflüsse darstellen. Wird das Gebäude massiv ausgeführt, um die Temperaturverhältnisse im Raume zu beherrschen, dann unterscheidet sich diese Bauform von der unter b) behandelten lediglich bautechnisch darin, daß die Zwischenwände fortgelassen sind. Ein Eisengerüst für die Trennschalter durchzieht den Mittelteil der Halle. Alle Schaltgeräte

¹ Bindschedler, R.: Die Unterzentrale Töß der Nordostschweiz. Kraftwerke. Schweiz. Bauz. Bd. 90, Dez. 1927.

und die Leitungsverlegung bleiben unverändert. Die Zahl der Durchführungen ist nunmehr auf die geringst mögliche herabgegangen, nämlich auf 6 Stück. Die Zahl der Stützer ist lediglich bei der Nullschiene gestiegen, was weniger von Bedeutung ist. Der Vorteil der geringsten Zahl von Gefahrenpunkten ist vollständig erreicht, was ausdrücklich anerkannt werden muß.

Die Leichtbauweise dagegen gestattet dieses nicht mehr. Der Grund für diese Form in baulicher Beziehung liegt lediglich in der Kostenersparnis für den Hochbau. Wie bereits gesagt, sollen Mauerwerk und Dach nunmehr nur eine Witterungsummantelung einfacher Art für die Schaltgeräte und Transformatoren darstellen. In der Schweiz ist man noch einen Schritt weitergegangen, indem man das Mauerwerk durch einfaches Wellblech ersetzte. Genügende Betriebserfahrungen liegen biher nicht vor. Der Standpunkt des Betriebes, daß die Leichtbauweise die Beherrschung der Raumtemperatur und damit der Schwitzwasserbildung außerordentlich erschwert, wenn nicht zeitweise sogar unmöglich macht, ist als durchaus gerechtfertigt anzusehen. Man sollte daher die elektrische Ausgestaltung der Anlage sehr vorsichtig wählen und mindestens für alle Isolierteile, die der Raumluft unmittelbar ausgesetzt sind, Porzellan vorschreiben. Stützer u. dgl. aus Hartpapier oder anderem hygroskopischen Baustoff sind zu vermeiden. Vom Standpunkte der Betriebssicherheit würde sich die Ausführung der Schaltgeräte und Transformatoren für den Einbau in Freiluftanlagen empfehlen. Geschieht dieses, dann allerdings geht der preisliche Vorteil der Leichtbauweise zusammen mit dieser Hallenbauform an sich nach der Zahlentafel 28 verloren.

Der Fortfall aller wagerechten und senkrechten Trennwände bietet — allerdings nur bedingt — den Vorteil größerer Übersicht, sofern sonst die Übersicht infolge der Leitungsverbindungen zu den Schaltgeräten und Sammelschienen nicht leidet. Bei großen Werken — im Vergleich mit den Ausführungen im 63. Kap. — verlangt diese Bauform für die „Warte“ (den Zentral-Kommandoraum), sofern eine solche angelegt wird, eine hohe Lage, damit die gute Übersicht tatsächlich erreicht wird.

Aus Abb. 378 ist schließlich noch zu erkennen, daß in der Mitte der Halle ein Gleis liegt, auf welchem ein Plattformwagen läuft, der für die Bewegung der Transformatoren und Ölschalter dient.

In dem Bestreben, an Gebäude- und an Grunderwerbskosten immer mehr zu sparen und trotzdem die Vorteile, die mit dem Einbau der Schaltanlage im geschlossenen Gebäude unzweifelhaft bestehen, zu gewinnen, dabei die Zahl der Durchführungen und gegebenenfalls auch der Stützer für die Leitungsführung auf die geringst mögliche Zahl herabzudrücken, sind die nachfolgenden zwei Bauformen entstanden.

e) **Schaltanlage im geschlossenen Gebäude, Aufstellung der Transformatoren im Freien.** Grundsätzlich wird von vornherein zuzugeben sein, daß für die Gebäudeanlage lediglich die Hallenform nach Abb. 377 die vorteilhafteste ist. Ihr nicht vollständig gleichwertig ist die Geräteaufstellung nach Abb. 378. Trotzdem sind den beiden Entwürfen in Abb. 379 und 380 diese Hallendurchbildungen zugrunde gelegt. Das zu

der Gebäudeanlage Gesagte gilt hier naturgemäß unverändert. Dem versenkten Einbau der Schaltgeräte wird der Vorzug zu geben sein. Die Transformatoren ins Freie zu stellen, ist durchaus zweckmäßig. Bedenken hiergegen bestehen nur dann, wenn sie für Freiluftanlagen an sich bestehen. Es muß daher das unter e) hierzu Gesagte berücksichtigt werden. Fenster in der Umfassungsmauer nach den Transformatoren werden die ständige Beobachtung sehr erleichtern. Auf weitere Einzelheiten einzugehen kann nach dem bisher Gesagten unterbleiben.

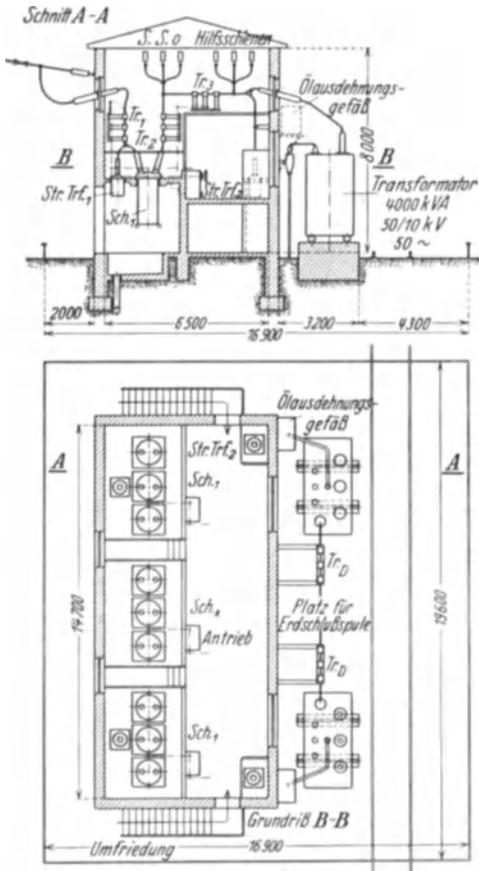


Abb. 379. Transformatorenwerk in Hallenbauform mit außenstehenden Transformatoren.

Witterungsverhältnissen und auf die Dauer gewährleistet wäre, sind diese Bedenken heute als nach jeder Richtung beseitigt anzusehen. Es sind in den letzten Jahren größte Transformatorenwerke in dieser Bauart erstellt worden. Erfahrungen liegen in vollem Umfange für Konstruktion und Betrieb vor. Ungünstiges grundsätzlicher Art ist nicht eingetreten.

Die Gründe für die Wahl der Freiluftausführung sind in der Hauptsache in betriebstechnischer Hinsicht: leichter Überblick über die ge-

bautoren werden die ständige Beobachtung sehr erleichtern. Auf weitere Einzelheiten einzugehen kann nach dem bisher Gesagten unterbleiben.

Auch für diese Bauform ist der Vergleich in der Zahlentafel 28 durchgeführt.

Abb. 381 zeigt ein Transformatorenwerk dieser Bauweise für 100 kV. Zwei Drehstromtransformatoren mit je 30000 kVA Leistung, 100/26 kV Spannung, in Freiluftausführung und für Ölumlaufrückung durch Wasser nach Abb. 263 sind hier unmittelbar an das Schaltgebäude für 26 kV herangerückt. Die Kühlanlage befindet sich in einem massiven Vorbau des Gebäudes und ist infolgedessen den Witterungseinflüssen entzogen. Der Aufbau ist außerordentlich einfach und übersichtlich.

f) Die Freiluftausführung. Während man noch vor wenigen Jahren nur zögernd an den Bau großer Transformatorenwerke in Freiluftausführung heranging, weil man fürchtete, daß die Betriebssicherheit gegenüber der Gebäudeausführung nicht mit der gleichen Sicherheit bei allen

samte Schaltanlage und damit über alle Vorkommnisse und Schaltungen, in wirtschaftlicher Hinsicht geringere Anlage- und Unterhaltungskosten (allerdings nur unter bestimmten Voraussetzungen zutreffend), leichtere Erweiterungsfähigkeit, leichter nachträglicher Einbau von Zusatzgeräten wie Spannungswandler, Überspannungsschutzgeräten, kürzere Bauzeit. Sind Beschaffung und Heranbringen von Baustoffen besonders schwierig z. B. im Gebirge, dann wird die Freiluftbauweise an sich unter Umständen die gegebene sein können. Trotz der bisher gemachten guten Erfahrungen und der genannten Gründe für diese Bauart kann man indessen auch heute noch geteilter Ansicht sein, ob die Freiluftausführung so überragende Vorteile gegenüber der Gebäudebauweise aufweist, daß letztere gewissermaßen als veraltet anzusehen ist. Schon hier sei bemerkt, daß dieses in keiner Weise zutrifft. Nach dem bisher Gesagten kann gegebenenfalls die Verbindung beider Bauformen die größten Vorteile bringen (Abb. 379 bis 381). Ein besonderer Vorzug liegt allerdings darin, daß die bei allen

Gebäudeanlagen am meisten gefährdeten und zu Störungen Veranlassung gebenden Durchführungen in Fortfall kommen. Bevor der Vergleich fortgesetzt wird, soll zunächst die Freiluftbauweise im einzelnen eingehender behandelt werden.

Besondere Untersuchungen haben ergeben, daß die Freiluftausführung erst bei Spannungen von etwa 50 kV aufwärts billigeren Gesamtpreis ermöglicht (Abb. 383 in Schaulinien). Daher sind bis heute Schaltgeräte nur von dieser Spannungsgrenze an aufwärts entwickelt worden. Demzufolge sind die Unterspannungsanlagen in einem Gebäude

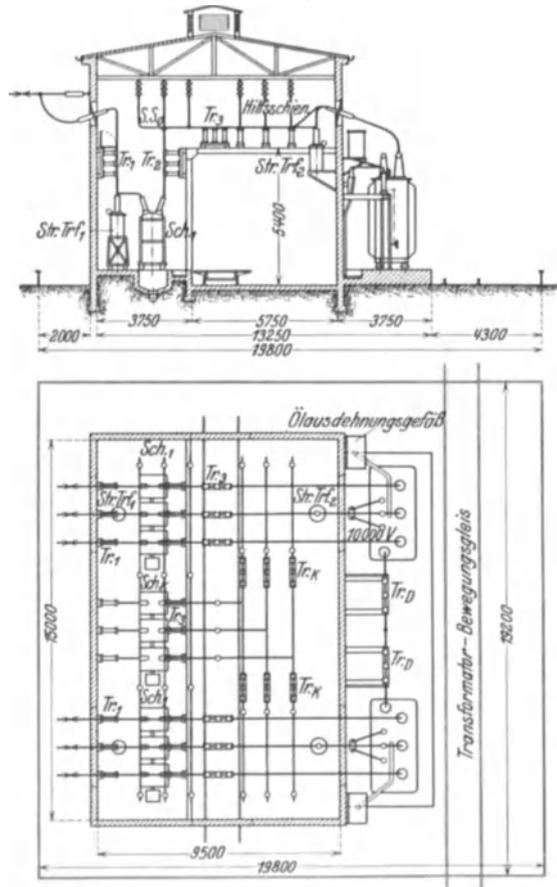


Abb. 380. Transformatorenwerk ohne Einbauunterteilung (Hallenbau) mit außenstehenden Transformatoren.

wie bisher unterzubringen. Also kann letzteres zumeist an und für sich nicht entbehrt werden.

Bei der Entscheidung über die Wahl der Freiluftbauweise sind folgende Gesichtspunkte grundsätzlich zu beachten:

Die umgebende Luft muß frei sein von allen schädlichen Beimengen wie Salz, chemischen Verunreinigungen, besonderem Staubgehalt durch Zement- und Brikettfabriken, Kohlenstaub in der Nähe großer Eisenbahnanlagen, schädlichen Gasen und ähnlichem, weil alles dieses die Isolation der Anlage auf die Dauer stark gefährden und dann nicht nur zu häufigen umfangreichen und unangenehmen Betriebseinschrän-

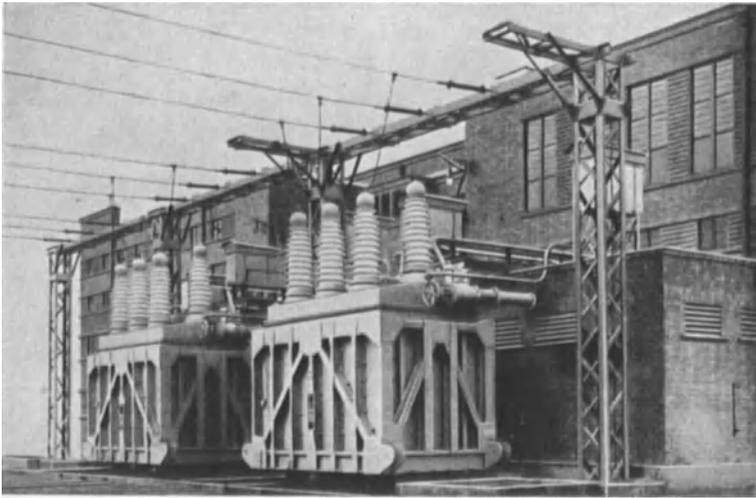


Abb. 381. Transformatorenwerk nach Bauweise Abb. 379 mit außenstehenden Transformatoren 100/26 kV (Bergmannwerke).

kungen und -unterbrechungen, sondern auch zu Zerstörungen an Baustoffen führen kann. Sich nach dieser Richtung nur auf die Windverhältnisse zu verlassen, die auf Grund von Beobachtungen eine Verstaubungsgefahr ausschließen, ist trotzdem unzweckmäßig.

Der Aufstellungsplatz soll möglichst frei gelegen sein, damit bei Ölbränden der Ölqualm schnell und ohne Belästigung der Umgebung abziehen kann und die Anlage sofort betretbar wird.

Das Baugelände muß, falls in der Nähe eines Flusses gelegen, überschwemmungsfrei und ferner möglichst eben sein, um beste Übersicht zu erhalten.

Der Platz soll tunlichst nicht in einer gewittergefährdeten Gegend und auf einem Felde liegen, auf welchem leichte Halmfrüchte und Heu geerntet werden, sofern nicht besonders dafür gesorgt ist, daß im Sturm hochgewirbelte Halme nicht in die Anlage geraten können. Andernfalls sind zum mindesten die Phasenabstände besonders reichlich zu wählen.

Die ankommenden und abgehenden Leitungen müssen sich frei entwickeln können.

Eine Freiluftanlage erfordert an Grundfläche für den Hochspannungsteil stets größeres Gelände als eine Gebäudeanlage. Es ist daher schließlich noch Voraussetzung, daß der Grund und Boden billig zu haben ist (Tafel III, Zahlentafel 28).

Die Feldbreite für Freiluftanlagen beträgt etwa:

10 m für	150 kV	Betriebsspannung
8 „ „	100 „	„
6 „ „	50/60 „	„
4 „ „	30 „	„

Die Phasenabstände sollen betragen:

2,50 m bei	150 kV	Betriebsspannung
2,00 „ „	100 „	„
1,50 „ „	50/60 „	„
1,00 „ „	30 „	„

Bei der Flachbauweise sind sie noch reichlicher zu wählen.

Rauhreif, Frost, starke Regengüsse, Sturm und ähnliche Witterungserscheinungen haben dagegen bisher keinerlei nachteilige Wirkungen gezeigt. Gefährdungen durch böse Hand, durch Schüsse, Steinwürfe u. dgl. konnten ebenfalls bisher die Betriebssicherheit nicht beeinträchtigen.

Je nach der Anordnung der Trennschalter, die für das Ausmaß stark bestimmend ist, unterscheidet man zwischen der Bauweise in Stockwerken und der Flachbauweise. In Tafel III bis V sind drei Ausführungsformen für das auf Tafel III dargestellte Schaltbild gezeichnet, die von der AEG entworfen worden sind. Die Abmessungen der umbauten Grundfläche zeigen sehr große Abweichungen.

Vom betriebstechnischen Standpunkte ist zu diesen drei Ausführungsformen zu sagen:

Die Anordnung der Trennschalter nach Form A Tafel III über den Ölschaltern also gewissermaßen in einem höheren Stockwerke ergibt die kleinste Grundfläche. Das ist an sich gut, vermindert die Anlagekosten, kann aber die Übersicht beeinträchtigen, wenn nicht die Warte so hoch liegt, daß dadurch dieser Nachteil aufgehoben wird. Handelt es sich um 100 kV und höhere Spannungen, dann wird der Aufbau außerordentlich hoch und damit schwer begehbar. Die Traggerüste sollten in diesem Falle als Laufgänge ausgebildet sein. Die Übersicht erleidet Einbuße an sich, die Leitungsführung wird unklar. Der Antrieb der Trennschalter mittels Gestänge wird schwer, wenn nicht überhaupt undurchführbar, weil lange Gestänge beim Schalten stark federn oder bei Zwischenlagerungen so schwer gehen, daß ein Mann zu ihrer Bedienung nicht mehr ausreicht; auch besteht Vereisungsgefahr im Winter. Der ferngesteuerte Antrieb wäre dann zu wählen, der aber häufige Beaufsichtigung notwendig macht, die bei dieser Bauform erschwert ist. Günstiger ist daher der Aufbau nach Form B Tafel IV, die dann hinsichtlich der Beaufsichtigung und des Überblickes über die Trennschalterstellungen von einer Warte aus vorteilhaft ist.

Als besonderer Vorzug der Form B ist darauf hinzuweisen, daß die Begehung der gesamten Anlage ohne Gefährdung der Bedienung möglich ist. Alle spannungsführenden Teile liegen so hoch, daß selbst zufälliges Hantieren mit einer Leiter oder ähnlichem noch keine unmittelbare Gefährdung ergibt. Ein Eingittern der Bedienungsgänge ist nicht erforderlich. Hinsichtlich der Leitungsführungen von und zu den Schaltgeräten und der Gerüstanordnung ist darauf zu achten, daß die Ölschalter mittels eines beweglichen Krangerüstes herausgehoben werden können, ohne mehr als nur die Verbindungsleitungen entfernen zu müssen. In dieser Form erspart man bei Besichtigung und Instandsetzungsarbeiten das Herausfahren der Ölschalter zur Reparaturwerkstatt.

Bei der Anordnung der Beleuchtung der Anlage ist hier begreiflicherweise besonders sorgfältig vorzugehen, um Schattenbildungen zu vermeiden.

Die Flachbauweise nach Form C Tafel V unterscheidet sich von der Stockwerksbauweise darin, daß sämtliche Trennschalter zu ebener Erde aufgestellt werden. Diese Bauform erfordert den größten Platz. Ob die Übersichtlichkeit gewinnt, ist mehr oder weniger Geschmackssache. Der Verfasser steht auf dem Standpunkte, daß der Stockwerksbau vorteilhafter auch nach dieser Richtung ist. Die Trennschalterstellungen mit dem Auge von einer selbst zentral gelegenen Warte aus zu erkennen, dürfte schon bei Anlagen mittleren Umfanges sehr schwer sein. Bei großen Anlagen ist sie kaum möglich. Zudem wird diese Sicht noch behindert durch die zumeist hohen Einfriedungen der Bedienungsgänge, die unbedingt erforderlich sind. Verkannt soll indessen der Vorteil nicht werden, daß die Trennschalterantriebe kurz und einfach ausfallen und Besichtigungen und Instandsetzungen leichter ausführbar sind. Das gilt besonders bei motorischen Antrieben.

Die Traggerüste werden entweder in Form von eisernen Masten und Gitterträgern oder in Blechträgern hergestellt. Vereinzelt ist auch Beton zu finden. Der Preisunterschied ist zumeist nicht bedeutend. Hier entscheidet mehr der Geschmack als Gründe der Zweckmäßigkeit. Die Gitterträger geben dem Gesamtbau ein leichtes, gefälliges Aussehen, verhindern die Sicht zumeist auch nicht. Die Blechträger wirken schwerer und ruhiger. Unterhaltung und Anstrich sind hier bequemer. Die Traggerüste in Beton herzustellen, empfiehlt sich nicht. Erstlich fällt der Preis hoch aus, dann wirkt diese Bauform zu schwer und Änderungen lassen sich später kaum vornehmen. Die Ersparnisse an Anstrich und Unterhaltung sind zumeist belanglos.

Die Schaltgeräte für Freiluftanlagen sind naturgemäß teurer als solche für Innenraumaufstellung. Das liegt an der erhöhten Isolation, die ihnen in Stützern, Durchführungen und ihren Abständen gegeben werden muß. Alle Öl enthaltenden Geräte müssen so durchgebildet sein, daß sie das Eindringen von Feuchtigkeit sicher vermeiden. Da auch mit unmittelbarer Einwirkung höchster und tiefster Temperaturen zu rechnen ist, sind gegebenenfalls Ölausdehnungsgefäße vorzusehen. Die Spannungs- und Stromwandler werden mit diesen neuerdings ausgerüstet. Für diese und die Ölausdehnungsgefäße der Transformatoren

ist vorzuschreiben, daß die Temperatur für deutsche Verhältnisse zwischen $+45^{\circ}\text{C}$ und -35°C schwanken darf, ohne daß ein Ölaustritt oder ein zu starkes Ölabsinken eintritt. Auf S. 326 ist darüber bereits gesprochen worden. Ölstandanzeiger mit Ölmarken sind daher an jedem Gefäß vorzusehen. Naturgemäß muß auch das Öl selbst von solcher Beschaffenheit sein, daß es bei tiefsten vorkommenden Wintertemperaturen nicht dick wird oder gefriert.

Die Fundamente besonders für die Ölschalter müssen vollständig unveränderlich ausgeführt werden. Es sind daher Betonfundamente die geeignetsten. Holzfundamente, die auch angetroffen werden, sind nicht gleich sicher, erfordern zudem mehr Beaufsichtigung und Instandsetzung. Jede Fundamentänderung kann bei den Schalterantrieben zu Klemmungen führen, die das ordnungsmäßige Ein- und Ausschalten gegebenenfalls zur Unmöglichkeit machen und dann sehr empfindliche Betriebsstörungen verursachen. Ob die Fundamente für die einzelnen Schalter zusammenhängend oder getrennt aufgebaut werden, richtet sich nach der Gesamtaufstellung. Betriebstechnische Bedingungen für die eine oder andere Bauweise sind nicht zu nennen. Schneewächten und Wasseransammlungen sollen sich natürlich nicht ausbilden können.

Ölfanggruben unter allen größeren Öl enthaltenden Schaltgeräten sind anzulegen. Näheres wird später bei der Besprechung von Baueinheiten behandelt werden.

Die Trennschalter weichen in ihrer Bauart von denen für Innenräume ab. Da sie diejenigen Schaltteile sind, die auch bei starker Vereisung noch sicher und in allen Phasen zuverlässig schaltbar sein müssen, werden nur Drehtrennschalter nach Abb. 362 verwendet. Die Kontakte werden durch eine Metallüberwurfkappe gegen unmittelbare Vereisung geschützt. Die Trennmesser erhalten eine Eisbrechvorrichtung, die aus einem federnden Gelenk an jedem Messer besteht, durch das beim Ausschalten zunächst eine ziehendschleifende Bewegung zwischen Messerende und Kontakt herbeigeführt wird, die den Eisansatz absprengt.

Die Antriebsteile aller Schalteinrichtungen sollen an ihren Lagerstellen gegen Rostbildung geschützt sein. Schutzkappen müssen derart durchgebildet und angebracht werden, daß sich unter ihnen kein Eis bilden und keine Vögel nisten können. Durch letztere sind bereits Schaltschwierigkeiten eingetreten.

Die Sammelschienen werden zumeist aus Kupferseil gebildet, das an den Enden durch besonders sichere Abspannklemmen an den Isolatoren gegen den mechanischen Zug der abgehenden Verbindungsleitungen, durch Rauhreifbelastung, Sturm und Temperaturänderungen gehalten wird. Alle Zwischenaufhängungen werden nur von Hängeisolatoren getragen. Stützer, die anfänglich benutzt wurden, sind verlassen worden. Sie scheinen mit Rücksicht auf die ständige Bewegung, in welcher sich die innere Leitungsanlage befindet, den Beanspruchungen auf Biegung nicht sicher entsprochen zu haben.

Der gesamte Aufbau einer Freiluftanlage gestattet leichter und besser die sichtbare Einhaltung des Schaltbildes, als das bei

der Gebäude- und Hallenanlage möglich ist. Daher ist sie, wenn Schaltungen von Hand vorzunehmen sind, übersichtlicher bedienbar. Dieser Vorteil sollte nicht unbeachtet bleiben, sofern die Lage der ankommenden und abgehenden Leitungen dieses nicht verhindern. Als sonstige Gesichtspunkte für die bauliche Ausgestaltung wären zu nennen: reichliche Abmessung der Wege zum leichten Bewegen der Schaltgeräte, Anschlußgleis für die Transformatoren, Bewegungsgleis zumeist geringerer Spurweite für die Ölschalter auf einem Sonderwagen. Für letztere hat sich ein Wagen mit 2 Satz je um 90° versetzten Laufradpaaren gut bewährt (Abb. 382), die von Hand durch Spindeln bewegt werden und ohne Drehscheiben einen Transport auf senkrecht zueinander stoßenden Gleisen gestatten. Die Kabelgräben für die Unter Spannungskabel, Steuer- und Meßleitungen sollen möglichst tief liegen und am besten mit Rohren versehen werden, damit kein Öl beim Versickern die Leitungsisololation angreifen kann. Gute Kabelmarken sollen

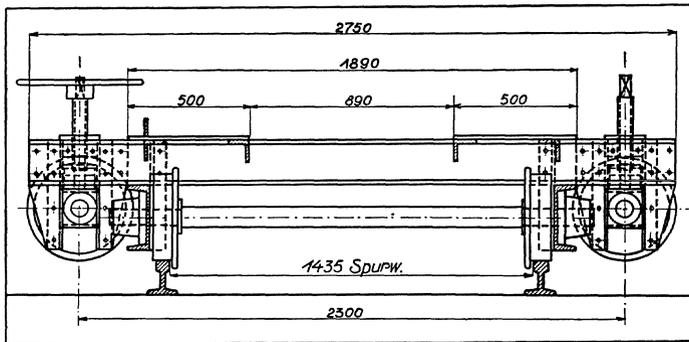


Abb. 382. Transportwagen für Transformatorenwerke.

die Lage der Kanäle kennzeichnen. Der Anstrich aller Geräte und Eisenteile muß wetterfest vorgenommen werden. Dabei empfiehlt es sich die Kessel, die Öl enthalten, hellgrau zu streichen, um die Wärmeaufnahme bei unmittelbarer Sonnenbestrahlung zu begrenzen. Einzäunung gegen unbefugtes Betreten ist selbstverständlich. Eine hohe Kiesschüttung auf den Wegen ist zu empfehlen, um das Ansammeln von Regen- und Schneewasser und die Verunkrautung zu verhindern. Schließlich ist auf eine zuverlässige und gute Erdung aller Eisenteile ganz besonders sorgfältig zu achten. Alle Stoßstellen von Eisengerüsten sollen entweder verschweißt oder mit Kupferbügeln überbrückt werden. Das Verschweißen ist nicht die beste Form, weil infolge der ständigen Bewegung, in der sich auch das eiserne Traggerüst der Anlage befindet, Schweißnähte unbemerkt aufreißen, auch durchrosten können und dann die Erdung unter Umständen stark an Sicherheit verliert. Band- und Rohrerden, letztere bis zum tiefsten Sommergrundwasserstande herabgeführt, müssen die Erdung vollkommen machen. Zeitweise Prüfung der Erde ist vorzunehmen.

Die Warte im Gebäude der Unterspannungsanlage soll derart

liegen, daß von ihr der gesamte Freiluftaufbau bis in alle Einzelheiten überblickt werden kann. Von ihr muß auch die Beleuchtung der Freiluftanlage bedient werden können.

Das auf S. 442 über die Anlage von Meldelampen Gesagte gilt naturgemäß auch für die Freiluftanlage.

Über die Kosten der Freiluftanlagen für Drehstrom und Einphasenstrom gegenüber den Gebäudeanlagen lassen sich allgemein verwertbare Zahlen geben (Abb. 383). Preisgegenüberstellungen, die heute, sofern die Verhältnisse das irgend zulassen, für beide Bauformen fast stets gemacht werden, haben immer das Ergebnis, daß bei Spannungen von 50 kV aufwärts die Freiluftanlagen um etwa 10 bis 20 vH billiger sind als Gebäudeausführung. Und trotzdem werden noch zahlreicher Bauten

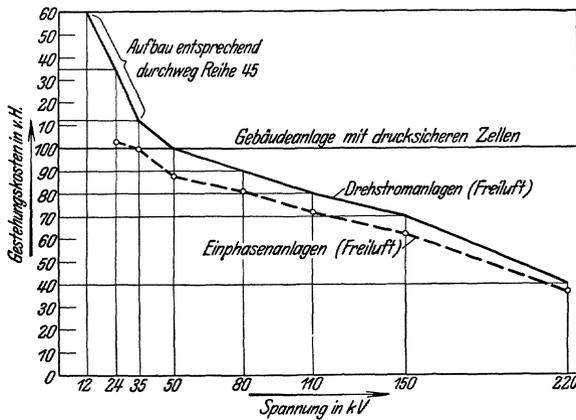


Abb. 383. Kostenvergleich zwischen Gebäude- und Freiluftanlagen für Drehstrom und Einphasenstrom.

der letzteren Art erstellt als der ersteren. Das ist wohl zum überwiegendsten Teile darauf zurückzuführen, daß die Ansicht über die Betriebssicherheit bei den Betriebsleitungen geteilt ist. Zweifellos sind Störungen an Teilen einer Freiluftanlage im strengen Winter oder bei heftigem Gewitter ungleich zeitraubender und schwieriger zu beseitigen, als innerhalb eines Gebäudes, selbst wenn eine Gebäudedurchführung zu ersetzen ist. Die Querverbindung nach Abb. 357 b hilft hier über viele Schwierigkeiten hinweg.

In Fortsetzung des Vergleiches der verschiedenen Bauformen zeigt Abb. 384 die entsprechenden Ausführungen des Transformatorenwerkes als Freiluftanlage. Es ist hier der Stockwerksbau gewählt worden. Die Trennschalter haben Handantrieb mit Gestänge erhalten. Das Freiluftgerüst ist aus Gitterträgern hergestellt. Die Schaltgeräte und Transformatoren ruhen auf Betonfundamenten. Die Leitungsführung ist so übersichtlich, daß Weiteres dazu nicht zu sagen ist. Die Zahlentafel 28 gibt die Vergleichsdaten.

g) Anlagen für Mittelspannungen. Für die Unterspannungsseite der Höchstspannungsanlage mit einer Spannung bis etwa 35000 V und für

alle Mittelspannungswerke, die auf Gebrauchsspannung transformieren, wird nur die Bauform in geschlossenem Gebäude oder bei Einzeltransformatoren Unterbringung in eisernen bzw. gemauerten Häuschen gewählt. Selbst bei Anlagen größeren Umfanges für zahlreiche Speiseleitungen wird die Trennung zwischen Bedienungs- und Sammelschienenraum und Öl-Schaltgeräten nur in den Hauptwerken nach gleichen Gesichtspunkten wie bisher erläutert durchgeführt, um die Hauptanlage nicht durch Vorkommnisse in der Nebenanlage in Mitleidenschaft zu ziehen. In Abb. 372 wurde hierfür ein

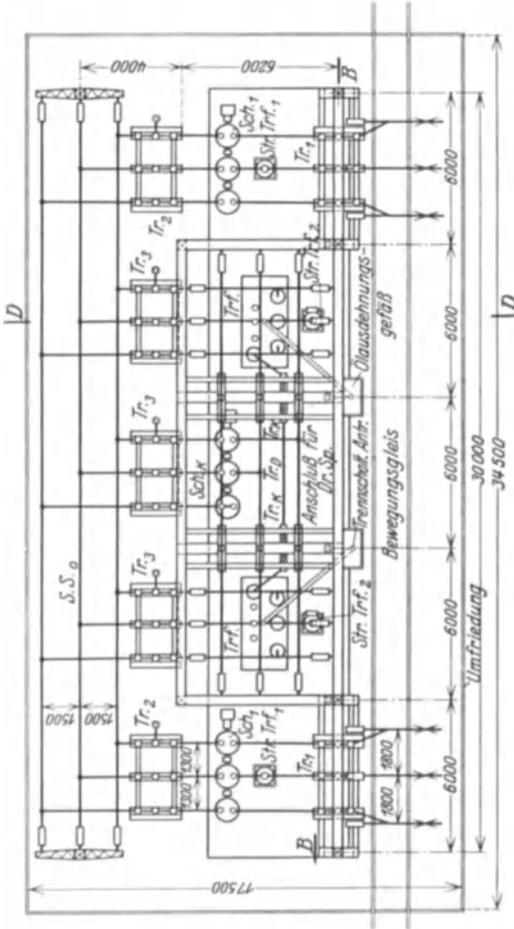


Abb. 384 a. Grundriß A—A.

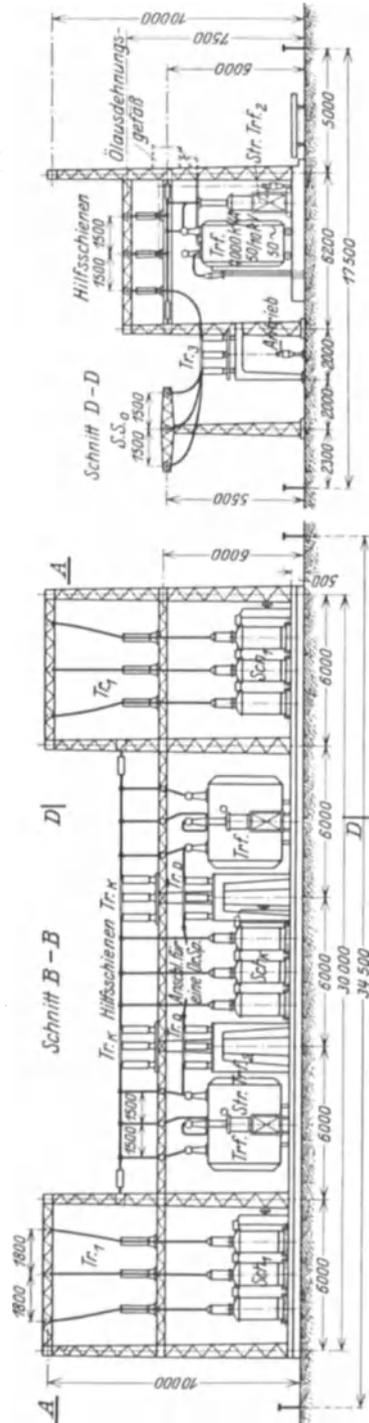


Abb. 924 b. Transformatorwerk in Freiluftausführung.

Abb. 384 c.

Zahlentafel 28.
Vergleich zwischen Transformatorenwerken verschiedener Bauform.

Lfd. Nr.	Bezeichnung 2 × 4000 kVA (55/10 kV, Reihe 60)	Kammer- anlage mit fahrbaren Ölschaltern Abb. 376	Geschlossene Halle mit hängenden Ölschaltern		Offene (Leichtbau-) Halle mit fahrbaren Ölschaltern		Geschlossene Halle mit fahrbaren Ölschaltern ¹		Freiluft- anlage mit fahrbaren Ölschaltern Abb. 384
			Trafo im Hause Abb. 377	Trafo im Freien Abb. 379	Trafo im Hause Abb. 378	Trafo im Freien Abb. 380	Trafo im Hause Abb. 378	Trafo im Freien Abb. 380	
Entwurf Nr.		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Gesamtgrundfläche mit 2 m breiter allseitiger Umfriedung in m ² . . .	367,43	384,36	331,24	272,64	380,16	272,64	380,16	603,75
2 ¹	Gesamt-m ³	2180	1806	1778	1680	1600	1680	1600	—
3 ¹	Abmessungen der An- lage ohne Außentreppe und Umfriedung:								
	Außen- maße	Länge m 14,10 Breite m 16,30 Höhe m 9,70	15,60 15,00 8,20	15,60 12,80 8,00	15,20 10,20 8,20	15,20 15,80 8,20	15,90 10,90 8,20	15,90 16,50 8,20	34,50 15,20 10,00
4	Umbauter Raum (Bo- denfläche bei VIII) für das eingebaute kVA in m ³ (m ²)	0,273	0,226	0,223	0,210	0,200	0,210	0,200	0,075
5	Preis für je m ² Grund- fläche. RM	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
6	Preis je m ³ umbauter Raum RM	28,00	28,00	28,00	22,00	22,00	28,00	28,00	—
7	Grundfläche nach I RM	1102	1153	994	817	1140	817	1140	1810
8	Bau nach 2 RM	61100	50500	35250	36900	37000	47040	44800	—
9	Fundamente RM	—	—	—	—	—	—	—	17473
10 ²	2 × 4000 kVA Transfor- matoren RM	111000	111000	116550	116550	116550	111000	116550	116550
11 ²	Aufbaustoffe RM	11464	5106	6563	6500 5293	8350 7965	5293	7965	6597
12 ²	Schaltgeräte RM	70489	70569	69729	82259 69569	82260 69569	69569	69569	82259
13	Eisengerüste RM	—	—	—	—	—	—	—	6650
14	Montage RM	17000	17000	17000	17000	17000	17000	17000	15300
15 ²	Fracht und Verpackung RM	12000	11300	11500	11700 11200	11700 11700	11200	11700	12300
16 ²	Gesamtkosten RM	284155	266628	257586	271726 251779	274000 260924	261919	268724	258939
17 ²	Einheitspreis der Anlage f. d. eingebaute kVA RM	35,50	33,35	32,20	33,85 31,50	34,25 32,60	32,75	33,60	32,40
18 ²	Vergleichszahl in Pro- zenten bezogen auf Ent- wurf I	1,00	0,94	0,91	0,955 0,89	0,965 0,92	0,925	0,95	0,915

¹ Da Zugänge (Außentreppe) und Dach bautechnisch noch andere vereinfachte Lösungen zulassen, sind sie nicht berücksichtigt, wohl aber werden Rampen und Bewegungsgleis in die Raumbeanspruchung einbezogen. Die Umfriedung bleibt außer Ansatz.

² Die oberen Preise beziehen sich auf die Inneneinrichtung für Freiluftbauweise. Die unteren Preise setzen Innenbaustoffe trotz der Leichtbauform voraus.

³ Die Abb. 378 und 380 gelten für diese Ausführungen im allgemeinen ebenfalls, nur der Bau an sich ist teuer.

Ausführungsbeispiel gegeben. Es bedarf dies für die allgemeine Raumgestaltung weiter keiner Erläuterung.

Für Werke, die von Mittelspannung auf Gebrauchsspannung transformieren, wird eine Schaltgeräatrennung entweder überhaupt nicht mehr oder höchstens für die Transformatoren vorgenommen. Hierbei ist allerdings ganz besonders darauf aufmerksam zu machen, daß dann geprüft wird, ob insbesondere die Mittelspannungsölschalter imstande sind, gefahrlos die zu erwartenden Kurzschlußleistungen abzuschalten, wenn die Stromversorgung aus einem Großkraftwerke erfolgt. Ältere Schalter sind hierin sehr unzuverlässig. Wird der Strombezug von einem bisherigen kleinen Kraftwerk auf ein Großkraftwerk umgestellt, muß eine solche Prüfung unbedingt vorher vorgenommen werden, will man sich nicht der größten Gefahr durch Schalterexplosion und Ölbrand aussetzen. Genügen die Schalter und der Aufbau der Schaltanlage z. B. in der Leitungs- und Sammelschienenbefestigung, in den Relais und Wandlern nicht der gesteigerten Anforderung, dann muß eine sorgfältige Preisprüfung ergeben, ob Ersatz durch neue Schaltgeräte oder die Einfügung von Strombegrenzungsdrosseln vorteilhafter ist. Der Gang der Rechnung für die Bestimmung der Kurzschlußenergie ist im IV. Bande angegeben.

h) Kleine Einzeltransformatoranlagen für Gebrauchsspannung auf dem Lande werden heute so einfach wie möglich ausgestaltet. Zumeist wird ein gemauertes Häuschen benutzt, das dann der allgemeinen Umgebung in seiner architektonischen Ausbildung anzupassen ist. Man findet nach dieser Richtung jetzt bereits sehr geschmackvolle Formen trotz einfachster Linienführung. Es würde indessen zu weit führen, hier Beispiele zu bringen. Lediglich für die elektrische Ausgestaltung der Inneneinrichtung sind in Abb. 385 bis 388 einige Formen widergegeben. Größere Überlandwerke kommen immer mehr dazu, Einheitsformen durchzubilden, um dadurch geringste Anlagekosten, leichte Beaufsichtigung und Instandhaltung, schnelle Störungsbeseitigung und vor allen Dingen vereinfachte Haltung aller Ersatzstoffe zu ermöglichen.

Abb. 385 zeigt eine Kopfanlage mit einem Mastaufbau zum Abspannen der Freileitung unter Zwischenschaltung eines Masttrennschalters (s. auch S. 483 Abb. 394). Das Schaltbild ist beigegeben. Der Transformator *Trf.* steht zu ebener Erde und ist mit den zugehörigen Schaltgeräten leicht zugänglich. Die Abmessungen bei einer Transformatorleistung bis 50 kVA für 2 Spannungen sind ebenfalls angegeben. Die gleiche Anlage aber in Gestalt eines Hochbaues zeigt Abb. 386. Die Leitungen werden hier unmittelbar am Gebäude abgespannt. Überspannungsschutz ist nur in Form einer Drosselspule vorhanden.

Für eine Leistung von 100 kVA einmal als Kopfanlage, dann als Durchgangswerk jedesmal mit erweitertem Überspannungsschutz und überspannungsseitigem Ölschalter sind in Abb. 387 und 388 noch zwei Ausführungsformen dargestellt und ohne besondere Erläuterungen verständlich.

In allen diesen Häusern ist die Unterspannungsschalttafel in eine Fensteröffnung eingebaut, somit von außen bedienbar. Das Be-

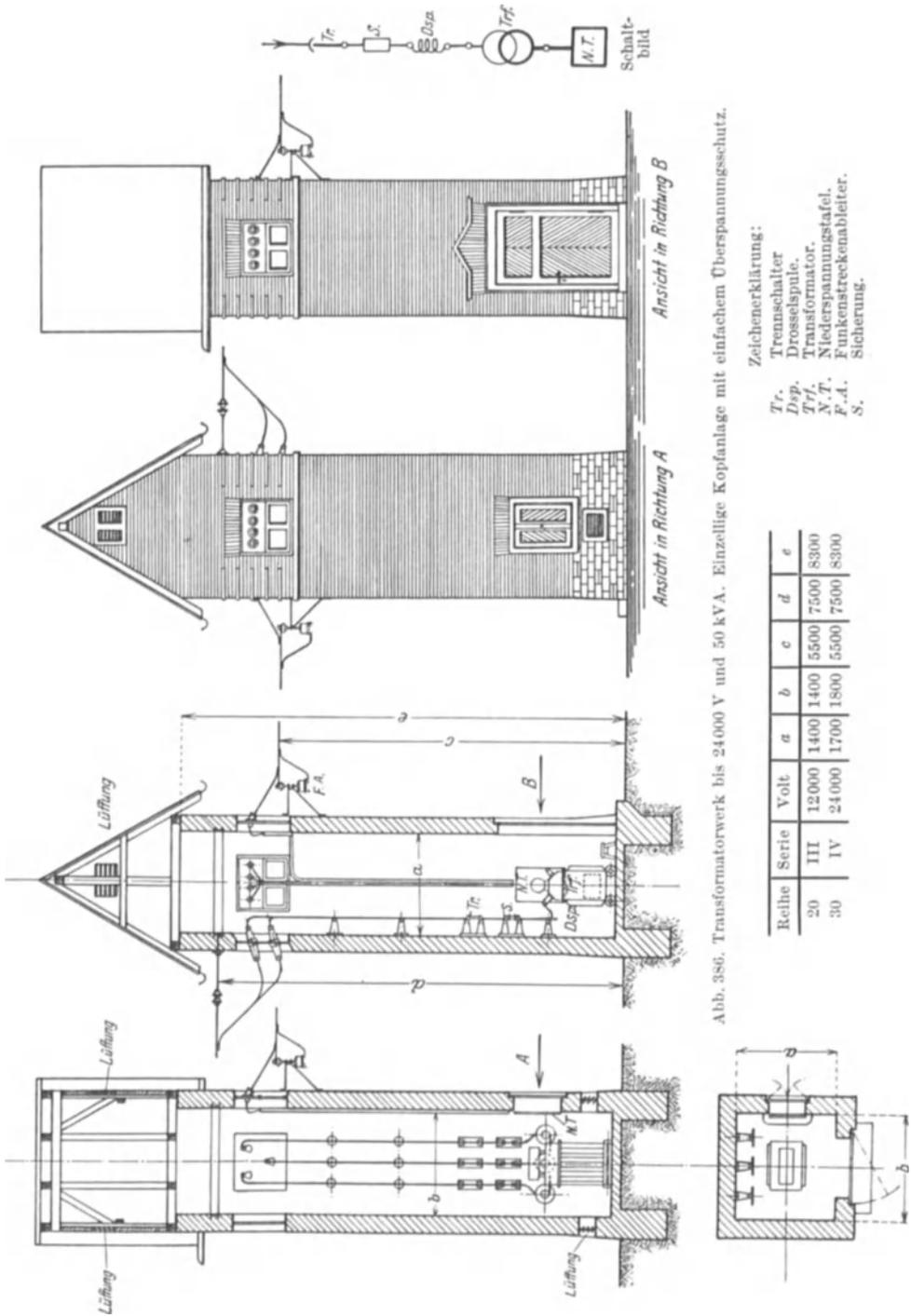


Abb. 386. Transformatorwerk bis 24000 V und 50 kVA. Einzellige Kopfanlage mit einfachem Überspannungsschutz.

i) Bautechnische Einzelheiten. Wenn es auch nicht Aufgabe dieses Werkes sein kann, die rein hochbauliche Seite eines Transformatoren-

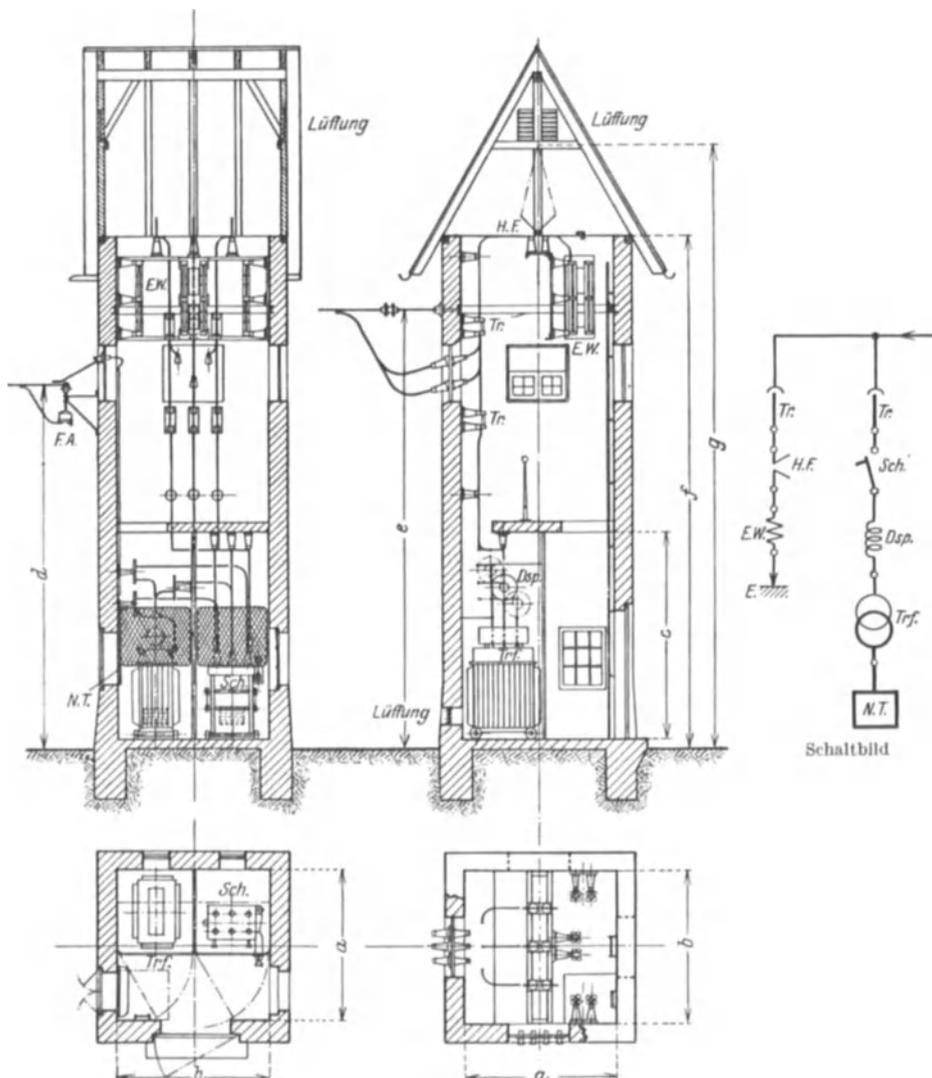


Abb. 387. Transformatorwerk bis 24000 V und 100 kVA. Einzellige Kopfanlage mit erweitertem Überspannungsschutz.

Zeichenerklärung:

- Tr.* Trennschalter.
- H.F.* Hörnerableiter.
- E.W.* Emailwiderstand.
- Sch.* Ölswitcher.
- Dsp.* Drosselspule.
- Trf.* Transformator.
- N.T.* Niederspannungstafel.
- F.A.* Funkenstreckenableiter.

Reihe	Serie	Volt	a	b	c	d	e	f	g
20	III	12000	2200	2200	3000	5500	7500	8700	10100
30	IV	24000	2400	2400	3250	5500	7500	8700	10100

hauses im einzelnen zu behandeln, da der Hochbau stets unter fachmännischer Leitung entworfen und errichtet werden wird, so sollen doch einige besonders beachtliche Punkte kurz erörtert werden, die dem

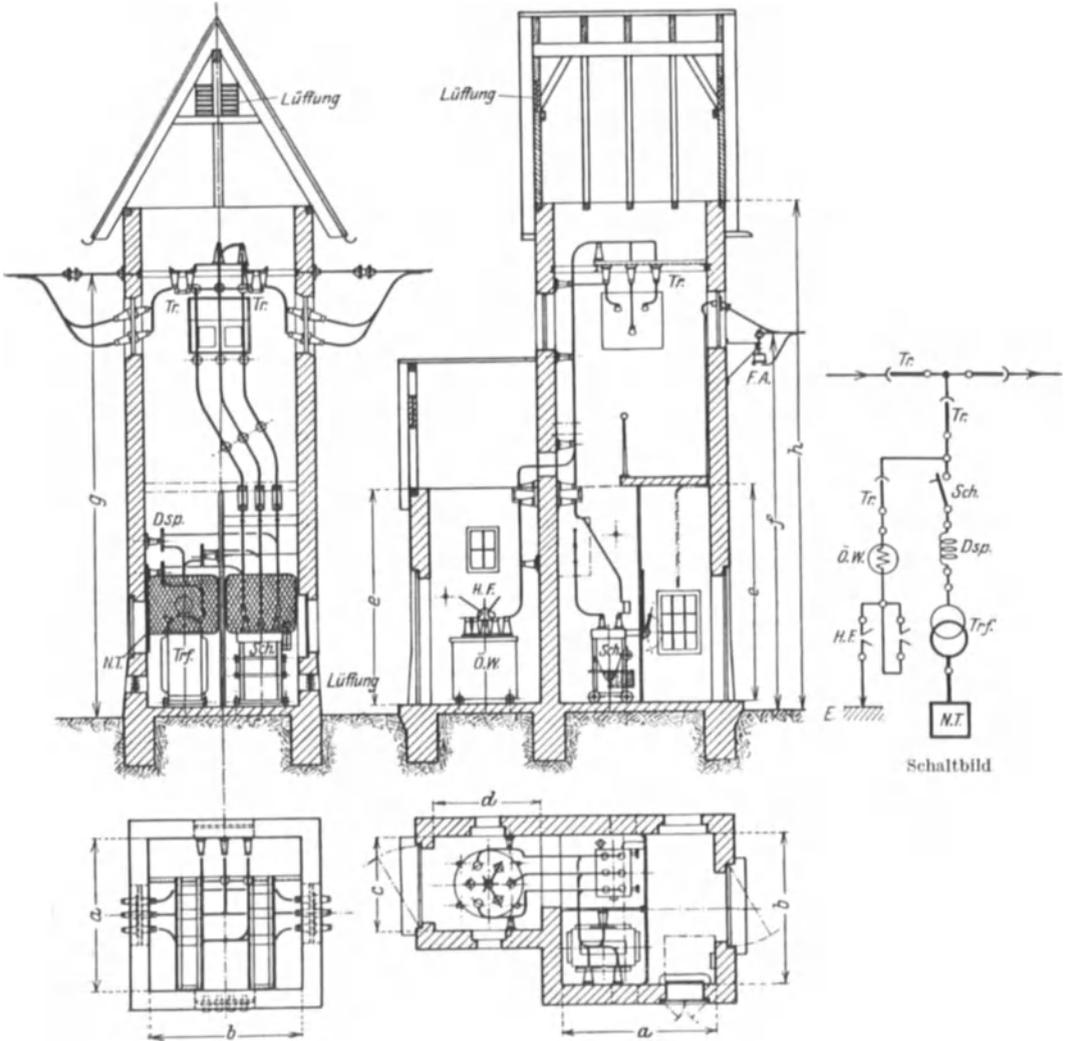


Abb. 388. Transformatorwerk bis 24000 V und 100 kVA. Einzellige Durchgangsanlage mit erweitertem Überspannungsschutz.

Zeichenerklärung:

- Tr. Trennschalter.
- H.F. Hörnerableiter.
- Sch. Ölschalter.
- Ö.W. Ölwidestand.
- Dsp. Drosselspule.
- Trf. Transformator.
- N.T. Niederspannungstafel.
- F.A. Funkenstreckenableiter.

Reihe	Serie	Volt	a	b	c	d	e	f	g	h
20	III	12000	2200	2200	1400	1600	3000	5500	7500	8700
30	IV	24000	2400	2400	1500	1700	3400	5500	7500	8700

Ingenieur als Bauherrn wiederum vom betriebstechnischen und betriebswirtschaftlichen Standpunkte aus besonders beachtlich sein müssen.

Zunächst sollte streng darauf gesehen werden, daß vor Beginn eines Baues alle Bauzeichnungen vollständig fertig vorliegen, der Baugrund untersucht und die Übereinstimmung mit den Einzelheiten des elektrischen Einbaues festgestellt ist. Die Praxis hat noch immer ergeben, daß nicht in allen Punkten geklärte Bauzeichnungen zwar den schnellen Baubeginn ermöglichen, aber keineswegs dazu führen, daß das Bauprogramm eingehalten und die Baubeendigung fristgerecht erreicht wird. Entwurfsänderungen kommen trotz sorgfältigster Vorbereitung immer vor, sie erreichen aber erfahrungsgemäß bei nicht sorgfältigen Bauzeichnungen oft ein Ausmaß, das zu Bauverzögerungen und Mehrausgaben Veranlassung ist. Dabei gehört zu der geklärten Bauzeichnung unbedingt auch die geklärte Montagezeichnung (Einbauzeichnung) der elektrischen Ausrüstung. Letztere bezieht sich in der Hauptsache auf die Fundierungen, die Aufstellung und Befestigung der hauptsächlichsten Schaltgeräte, die Decken- und Mauerdurchbrüche, Lage der Treppen, Fenster und Türen, Form der Belüftung der Transformatorräume. Bei großen Werken, die Bahnanschluß nötig machen, sollte die Gleisanlage als erste fertiggestellt werden, um sie schon zum Heranschaffen der Baustoffe vorteilhaft ausnutzen zu können. Auf das über die Auswahl des Bauplatzes auf S. 408 Gesagte wird nochmals verwiesen.

Mit der Entwurfsbearbeitung des Bauwerkes soll gleichzeitig die Architektur und der Baustoff für die Fassaden geklärt werden. Auf die Umgebung ist dabei in entsprechender Form Rücksicht zu nehmen. In der Außenarchitektur soll strenge Sachlichkeit vorherrschen. Alle Verzierungen, Verschnörkelungen u. dgl. sind zu vermeiden. Die einfache Linie mit besonderer Betonung der Gesimse wirkt für Transformatorenwerke in der Regel gut und gibt dem Bau ruhige, seinem Zweck entsprechende Form. Innerhalb bebauter Gebiete werden gegebenenfalls besondere Bauvorschriften zu beachten sein. Der Ziegelrohbau in seiner mannigfaltigen Baustoffbeschaffenheit (gewöhnliche Ziegel, Klinker gleicher oder abwechselnder Färbung und Abmessung) gibt schöne Wirkung dort, wo er am Platze ist. Trotzdem wird Putzbau noch häufig vorgezogen. Die Baukosten des Ziegelbaues liegen zumeist höher als die des Putzbaues, selbst wenn bei letzteren, was immer zu empfehlen ist, auch bei kleinen Anlagen Edelputz verwendet wird. Die Unterhaltungskosten aber sind um ein Beträchtliches geringer als beim Putzbau.

Ist das Transformatorenwerk mit einem Kraftwerke aus Gründen einfacherer Betriebsführung baulich zu verbinden, so geschieht das zweckmäßig durch einen bedachten Übergang etwa nach Form der Abb. 389. Kann das Schaltwärterwohnhaus unmittelbar in die Nähe des Werkes gelegt werden, so ist ein überdachter Verbindungsgang recht zweckmäßig (Abb. 390 und 391).

Für das Umfassungsmauerwerk bei Werken jeder Größe empfiehlt sich aus den bereits des öfteren erwähnten Gründen — ganz be-

sonders bei großen Hallenbauten — Mauerwerk mit Luftschicht. Die Leichtbauweise scheidet hier naturgemäß aus.

Die Befensterung soll reichlich sein, um helle Räume zu schaffen. Liegt die Sonne im Bedienungsgange oder in der Warte auf den Meldeleuchten, so daß nicht klar zu erkennen ist, ob sie leuchten, dann ist die Verglasung entsprechend zu wählen (Rauchglas) und gegebenenfalls sind deckende Vorhänge oder Rolläden anzubringen. Das gleiche gilt für die klare Beobachtung der Meßgeräte. Spiegelung darf nicht vorkommen. Ein Teil der Fenster im Bedienungs- und Sammelschienenraum, soweit sie zusammenhängen, ist mit Kippflügeln oder in anderer Form offenbar herzustellen, damit richtige Durchlüftung der Räume

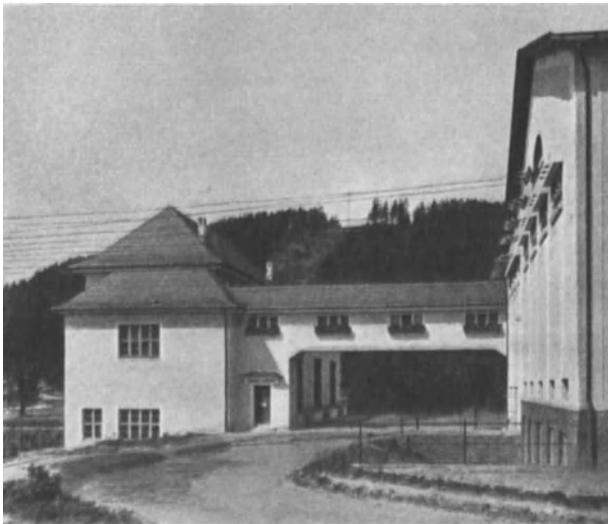


Abb. 389. Kraftwerk und Transformatorwerk mit überdachtem Verbindungsgang.

herbeigeführt werden kann. Die Lage der Kippflügel ist nach der Wetterrichtung (Sturmregen, Schneetreiben) zu wählen. Dort, wo Überspannungsschutzgeräte stehen, soll keine Zugwirkung möglich sein, um zu verhindern, daß ein Ansprech-Lichtbogen in die Phasen gedrückt wird und dann Kurzschluß mit seinen üblen Betriebserscheinungen herbeiführt. Um Vögeln den Eintritt zu wehren und im Erdgeschoß auch Kindern das Einsteigen unmöglich zu machen, sind offene Fenster mit Drahtgittern zu versehen. Das gilt sowohl für besetzte als auch ganz besonders für unbesetzte Werke. Fensterschwitzwasser soll durch große Wasserrinnen in den Fensterbänken aufgenommen und durch einfache Durchbrüche solcher Abmessung, daß sie im Winter nicht zufrieren, ins Freie geleitet werden.

Hinsichtlich der Lage der Fenster ist ganz besonders darauf zu achten, daß keine elektrischen Leitungen und Schaltgeräte den freien Zu-

tritt vom Raume aus verhindern. Diese Bedingung ist oftmals schwer zu erfüllen, aber betrieblich nach Möglichkeit zu fordern. Es ist nicht angängig, Ausschaltungen oder Betriebsunterbrechungen vornehmen zu müssen, um eine zerbrochene Fensterscheibe zu ersetzen. Liegen spannungsführende Teile vor den Fenstern, so dürfen nur getrennte Schlüssel zum Öffnen benutzt werden, um jede Gefährdung des Bedienungs-personals auszuschließen.

Für die Wahl der Türen in Holz oder in Eisenblech entscheidet der Zweck des betreffenden Raumes. Alle Räume, die ölenthaltende Geräte aufzunehmen haben, sollten Eisenblechtüren erhalten. Oft ist in den Werken festzustellen, daß die Türen nicht richtig aufschlagen. Hierzu hat der Ingenieur seine Vorschriften zu geben. Für Räume, die Ölkessel enthalten, sollen sich die Türen unbedingt nach

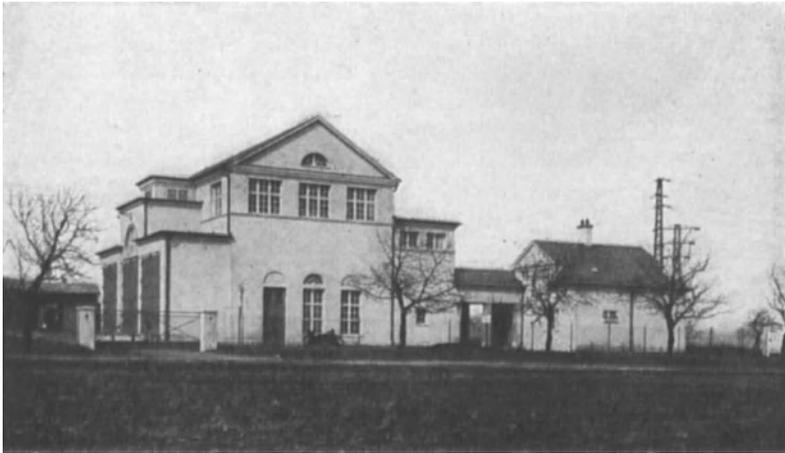


Abb. 390. Transformatorwerk und Schaltwärterhaus mit offenem Verbindungsgang
(Grundriß siehe Abb. 372 und 391).

außen öffnen, damit eine Explosion sie gegebenenfalls herausdrücken kann, sie gewissermaßen als Sicherheitsventil wirken. Über die Durchbildung von Schottentüren ist bereits auf S. 452 gesprochen worden. Im Gebäude selbst sollen die Türen derart aufschlagen, daß sie im geöffneten Zustande der Bedienung nicht hinderlich sind, keine Schaltgeräte verdecken, keine hinzukommenden Personen gefährden, die Bewegung auf den Gängen in keiner Weise hindern. Der Gang des gesamten Betriebes mit Instandsetzungsarbeiten muß hier beobachtet werden. Die großen Tore der Transformatorenkammern sollen mehrflügelig hergestellt werden, um sie auch notfalls bei Sturm öffnen und sicher befestigen zu können. Es sind hierfür praktisch sehr brauchbare Ausführungen zu finden. Ferner sollen sie Schlupftüren erhalten, um der Bedienung die Prüfgänge nicht zu erschweren.

Die Treppen sollen überall dort, wo Schaltgeräte über sie zu bewegen sind, entsprechend breit und sicher angelegt werden. Auch hier hat der

Ingenieur zu bestimmen. Sie sollen zudem in ihrer Lage im Gebäude auf den bequemsten und übersichtlichsten Prüfgang der Schaltwärter Rücksicht nehmen. Bei großen Anlagen sind die Obergeschosse mit zwei Treppen zu versehen, um der Bedienung das Entweichen in Gefahrenfällen unter allen Umständen zu ermöglichen. Fehlt es nach dieser Richtung an Raum, so sind Balkone anzubringen mit Anschluß von Feuer-Notleitern.

Unter die Öl enthaltenden Schaltgeräte und die Transformatoren sind Ölfanggruben einzubauen, deren Größe sich nach dem jeweiligen Ölinhalt zu richten hat. Für gewöhnlich werden alle Ölgruben eines Werkes durch Rohrleitungen aus Gußrohren (Tonrohre sind nicht zu verwenden, da sie bei heißem, brennendem Öl platzen können) mit einer außerhalb gelegenen Sammelgrube verbunden, um brennendes Öl¹ schnell und gefahrlos abzuführen. Längere Leitungen bewirken zudem oft ein so starkes Abkühlen des Öles bei Entzug von Luftsauerstoff, daß abfließendes brennendes Öl bald zum Ersticken kommt. Die Abflußrohre müssen großen Querschnitt und gutes Gefälle erhalten. Dann können die Ölgruben verhältnismäßig klein gehalten werden. Bei großen Schalter- und Transformatorgruben kann, sofern die Gruben sehr tief geführt und mit ausreichender Kiesfüllung versehen sind, die Ölsammelleitung mit Hauptgrube unterbleiben. Dann ist aber noch mehr als bei der Ausgestaltung der gewöhnlichen Ölgruben darauf zu achten, daß sich brennendes Öl nicht im Schaltraume ausbreiten und andere, benachbarte Teile (auch Ölgruben mit den darüber befindlichen Schaltgeräten) in Mitleidenschaft ziehen kann. Liegt das Grundwasser sehr hoch, so daß insbesondere die Hauptsammelgrube nur mit sehr erheblichen Kosten völlig wasserdicht herstellbar ist, dann wird diese zweite Form der Ölgrubenanlage an sich schon vorgezogen werden müssen.

Der Fußboden in den einzelnen Räumen ist wiederum dem Zweck des Raumes anzupassen. Oft zu finden, aber als verfehlt zu bezeichnen sind glatte und gemusterte Tonplatten in denjenigen Räumen, die ständig begangen werden, in denen auch Baustoffbewegungen stattfinden, desgleichen im Hauptbedienungsgange und in der Warte. Sie gestatten kein sicheres Gehen und ihr ursprünglicher Zweck, räumlich schön zu wirken, wird bald durch Auflegen von Matten, Linoleum, Gummipplatten und ähnlichem beseitigt.

Der Anstrich der Räume soll einfachst und in hellen Farben gehalten sein. Ölanstrich ist überall zu vermeiden, da er die natürliche Luftbewegung hindert und bei Temperaturwechsel nur nasse Wände ergibt. Wirkungsvoll und aus mancherlei betrieblichen Gründen erwünscht ist ein abwechselnder Anstrich der Eisengerüste für die Befestigung der elektrischen Einbauten gegenüber diesen selbst und ihren Antrieben. Daß die Leitungen und Erdungen durchgängig in den VDE-Farben gestrichen werden, ist selbstverständlich. Auch den Doppel-

¹ Zur Erstickung von Ölbränden hat sich neuerdings mit gutem Erfolge das sog. Schaumlöschverfahren der Minimax-App.-Ges. bewährt.

sammelschienen sollten nach beiden Systemen bestimmte Kennfarben zugeteilt werden. Der VDE schreibt in den DIN-Normen¹ vor:

Zu DIN VDE 705

Gleichstrom		Drehstrom		
1. Rot 25	2. Ublau 54	1. Gelb 00	1. Laubgrün 88	1. Veil mit Weiß 38 Ia ²
				
P Positive Leitung	N Negative Leitung	R Phase 1	S Phase 2	T Phase 3

Wechselstrom	
1. Gelb 00	1. Veil mit Weiß 38 Ia ²
	
R Phase 1	T Phase 2

Bildet eine Wechselstromleitung einen Teil eines Drehstromsystems, dann bleiben die entsprechenden Kennzeichnungen für Drehstrom bestehen.

Geerdete Leiter und ungeerdete Nulleiter bei allen Stromarten					
	weiß		hellgrau		schwarz
	1. Laubgrün 88		1. Laubgrün 88		1. Laubgrün 88
a	weiß	b	hellgrau	c	schwarz
Für geerdete positive und negative Leitungen bei Gleichstrom, Phasenleitungen bei Wechsel- und Drehstrom sowie für geerdete Nulleiter bei allen Stromarten ist eine der unter a bis c angegebenen Farben zu wählen, und zwar so, daß sich diese Farbe von der der angrenzenden Wände, Verkleidungen, Schaltgerüste usw. abhebt.					
	weiß		hellgrau		schwarz
	1. Rot 25		1. Rot 25		1. Rot 25
d	weiß	e	hellgrau	f	schwarz
Für ungeerdete Nulleiter ist eine der unter d bis f angegebenen Farben zu wählen, und zwar so, daß sich diese Farbe von der der angrenzenden Wände, Verkleidungen, Schaltgerüste usw. abhebt.					

Sehr zweckmäßig und die Betriebsführung außerordentlich erleichternd ist die in allen Einzelheiten durchgeführte Beschriftung aller Anlagenteile. Es genügt dabei nicht, diese Beschriftungen nur

¹ DIN Taschenbuch 2. Schaltzeichen und Schaltbilder.

² Veil = Ostwaldsche Bezeichnung für „violett“.

für die Hauptschaltheandlungen vorzusehen. Auch Warnungen u. dgl. sollten an den geeigneten Stellen immer und zwar in auffallender Schrift und Farbe wiederholt werden. Schon manche Fehlschaltung und Gefährdung ist dadurch vermieden worden.

Hinsichtlich der Heizung der Schalträume sind die Ansichten aus dem Betriebe geteilt. Am häufigsten wird nur der Aufenthaltsraum der Schaltwärter, sofern ständige Bedienung vorhanden ist, geheizt und dann naturgemäß elektrisch. Bei richtiger Belüftung großer Räume kann die Beheizung der Geräte- und Sammelschienenräume zumeist unterbleiben. Trotzdem empfiehlt es sich, den Bau mit Schornsteinen zu versehen, damit notfalls vorübergehende Ofenheizung zur Anwendung kommen kann.

Die Beleuchtung schließlich ist ebenfalls besonderer Beurteilung zu unterwerfen. Auch hier hat der Ingenieur in erster Linie den Ausschlag zu geben. Dabei ist besonders darauf zu achten, daß alle Beleuchtungskörper derart angebracht sind, daß die Lampenauswechslung in der Nähe spannungsführender Teile gefahrlos, ohne Benutzung von Leitern möglich sein muß. Kurze Wandfassungen in Reichhöhe in den einzelnen Schalt- und Bedienungsräumen sind die zweckmäßigsten. Lampenbewegungen über Rolle und Seil sind nur dort zulässig, wo ein gerissenes oder abgeglittenes Seil keine spannungsführenden Teile berühren kann. Deckenbeleuchtungen in Schalträumen sind in jeder Form unstatthaft. Bei Freiluftanlagen ist die Lampenverteilung und -aufhängung derart zu gestalten, daß eine vollständig schattenlose Beleuchtung der Gesamtanlage erzielt wird. Steckdosen für Handlampen sollen zahlreich an richtiger Stelle vorhanden sein. Auf eine ausreichende und richtig beurteilte elektrische Notbeleuchtung ist besonders Wert zu legen.

Hinsichtlich der Bauausschreibungen und der Handwerkerbedingungen sei auf die Vorschriften verwiesen¹. Je eingehender alle Einzelheiten darin behandelt und festgelegt sind, um so reibungsloser verläuft der Bau und die Abrechnung. Ein ausführliches, zeichnerisch festgelegtes Bauprogramm etwa nach Abb. 440 sollte schon bei Anlagen mittleren, ganz besonders aber bei solchen großen Umfanges nicht fehlen.

Wenn diese Angaben auch nur kurze Hinweise und Fingerzeige geben können, so werden sie gewiß bewirken, daß manches, was später als besser zu machen erkannt wird, schon beim Bau festgestellt und entsprechend berücksichtigt wird.

Für die Kostenvoranschläge und zum Vergleich mit Ausschreibungsergebnissen sind für die einzelnen Handwerkerarbeiten an einem Transformatorenwerke in Zahlentafel 29 die vH-Anteile dieser einzelnen Bauarbeiten an der Gesamtsumme des baulichen Teiles zusammengestellt. Vorausgesetzt sind erstklassige Baustoffe und beste Arbeit. Die Gesamtausgaben sind weiter umgerechnet auf dem m³ umbauten

¹ DIN-Taschenbücher: Nr. 3 Technische Vorschriften für Bauleistungen, Nr. 5 Verdingungsordnung für Bauleistungen.

Raumes und vervollständigt durch Einbezug der elektrischen Ausrüstung bewertet worden auf 1 kVA eingebaute Transformatorleistung. Nicht berücksichtigt sind die Kosten für Grunderwerb, Einfriedigungen, Anschlußstraßen, Beamtenwohnhaus, Garagen, besondere Entwässerungen, Wasseranschluß und dergleichen Nebenanlagen.

Zahlentafel 29. vH-Anteile der Bauhandwerkerarbeiten an der Gesamtsumme des baulichen Teiles verschiedener Transformatorenwerke.

		Werk A	Werk B	Werk C Freiluft	Werk D	Werk E
1	Erd-, Maurer-, Putz- und Eisenbetonarbeiten	55,1 vH	62,6 vH	43,2 vH	62,1 vH	49,4 vH
2	Eisengerüste ¹ . . .	3,7 „	6,8 „	28,2 „	9,7 „	25,8 „
3	Zimmerarbeiten . .	6,5 „	4,2 „	3,0 „	3,9 „	1,4 „
4	Dachdeckerarbeiten	2,9 „	2,9 „	2,4 „	2,5 „	2,0 „
5	Klempnerarbeiten .	2,7 „	3,2 „	1,0 „	1,6 „	0,8 „
6	Glaserarbeiten . .	2,9 „	2,1 „	1,3 „	2,3 „	2,2 „
7	Schlosserarbeiten ¹	6,5 „	2,0 „	3,4 „	0,7 „	1,1 „
8	Eiserne Türen . . .	4,2 „	4,0 „	1,0 „	5,6 „	1,6 „
9	Malerarbeiten . . .	4,9 „	4,9 „	4,7 „	3,3 „	2,6 „
10	Beleuchtungsanlage	1,2 „	1,1 „	0,8 „	1,8 „	1,1 „
11	Projekt und Bauleitung	9,4 „	6,2 „	11,0 „	6,5 „	12,0 ² „
12	Gesamtsumme des baulichen Teiles RM	99 553.—	93 440.—	45 620.—	123 680.—	405 000.—
13	Umbauter Raum m ³	3716	2880	—	3036	17 500
14	Kosten für 1 m ³ umbauten Raum RM	26,70	32,60	—	40,70	23,20
15	Eingebaute Transformatorleistung kVA	5500	3600	4000	12 000	23 200
16	Spannung . . . kV	50/10	50/10	50/6	50/3	100/50/10
17	Gesamtkosten des Werkes für 1 kVA Transformatorleistung . . . RM	68,00	73,00	63,00	52,00	58,75
18	Baujahr	1924	1924	1928	1924	1926

Im einzelnen ist für die Beurteilung der Zahlentafel folgendes zu beachten.

Werk A entspricht der Ausführung nach Abb. 372 und 390 und ist voll ausgebaut.

Werk B ist im umbauten Raum bemessen für die Aufstellung eines dritten Transformators, der noch nicht vorhanden ist.

Werk C ist eine Freiluftanlage auf der 50 kV-Seite nach Abb. 357 und eine Gebäudeanlage für die Unterspannungsseite von 6 kV. Der

¹ Eisengerüst- und Schlosserkosten sind zusammenzurechnen.

² Gleisanschluß ist eingeschlossen, siehe Zahlentafel.

gesamte bauliche Teil berücksichtigt die Erweiterung um einen dritten 2000 kVA-Transformator.

Werk D liegt in den Baukosten etwas höher, weil die Unterspannungsseite in einem Keller beim Kraftwerke untergebracht worden ist.

Werk E entspricht der Ausführung nach Abb. 416 und enthält in den Bauleitungskosten den Gleisanschluß. Einzelheiten hierzu sind im 63. Kap. gegeben.

k) **Schaltwärterwohnhäuser.** Bei ständig unter Aufsicht stehenden Werken ist die Unterbringung eines Teiles des Schaltpersonals unmittelbar beim Werk Bedingung für einen jederzeit einwandfreien Betrieb am

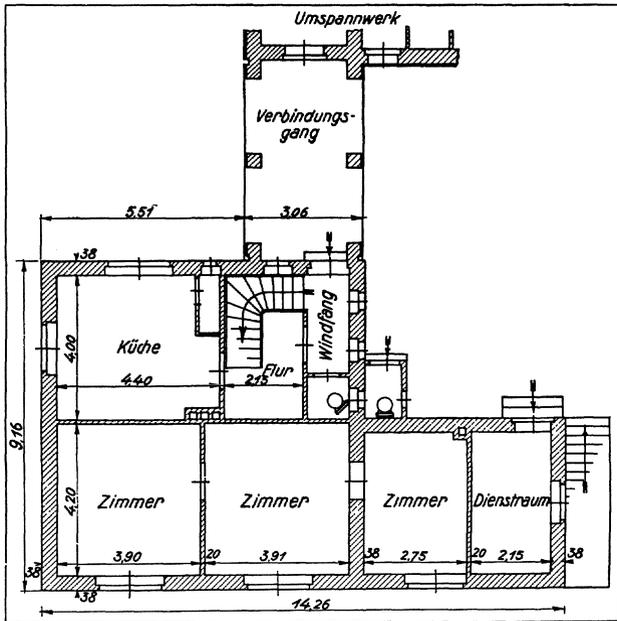


Abb. 391. Grundriß eines Schaltwärterwohnhauses (Abb. 390).

Tage und in der Nacht. Aus diesem Grunde hat jedes größere Werk auch sein Schaltwärterwohnhaus mit zumeist 2 oder mehr Wohnungen. Besonders erwähnenswert ist hierzu eigentlich nur die Lage des Hauses zum Werk. Wo irgend tunlich, wird es mit dem Werk zusammengebaut, oder durch einen gedeckten bzw. offenen Übergang verbunden, Abb. 391. Nur zu berücksichtigen ist dabei, daß Kinder und Unbefugte das Werk nicht ohne weiteres betreten können. Über die Ausgestaltung des Wohnhauses hier Angaben zu machen, erscheint überflüssig, da das Sache des Architekten ist. In Abb. 391 und 439 sind zwei Grundrisse von solchen Wohnhäusern gezeichnet, die gegebenenfalls einen erwünschten Vergleich mit in Aussicht genommenen Abmessungen und Raumverteilungen ermöglichen werden.

In Zahlentafel 30 sind für diese Wohnhäuser die vH-Anteile der einzelnen Bauarbeiten an der Gesamtbausumme zusammengestellt, um auch nach dieser Richtung Vergleichswerte zur Hand zu haben.

Zahlentafel 30.

vH-Anteile der einzelnen Bauhandwerkerarbeiten an Wohnhäusern.

		Wohnhaus n. Abb. 391 2×3-Zim- merwoh- nungen	Wohnhaus n. Abb. 439 4×3-Zim- merwoh- nungen	Wohnhaus mit 2×3- Zimmer- wohnungen
1	Erd-, Beton-, Maurer- und Putzarbeiten	49,8	57,4	50,5
2	Zimmer- und Tischlerarbeiten	21,4	18,0	17,9
3	Dachdeckerarbeiten	6,3	2,0	4,3
4	Klempnerarbeiten	3,5	3,5	3,6
5	Glaserarbeiten	3,1	3,4	3,0
6	Schlosserarbeiten	1,6	1,1	1,4
7	Malerarbeiten	4,0	2,3	3,9
8	Ofenlieferung	3,0	3,5	2,2
9	Wasser- und Beleuchtungsanlage	1,6	1,7	1,5
10	Bauleitung	6,0	7,1	11,7
11	Gesamtpreis RM	26700	60170	33100
12	Umbauter Raum m ³	730	1957	962
13	Kosten für 1 m ³ umb. Raum RM	36,50	30,75	34,30
14	Baujahr	1924	1926	1924

L. Ausgeführte Transformatorenanlagen.

59. Transformatorenwerke für Fabriken und Überlandanlagen.

a) **Fabrikanlage.** In einer Fabrik sind im ersten Ausbau drei Drehstromtransformatoren für je 100 kVA, Übersetzung 3100/230 V, Frequenz = 50 aufzustellen, während ein vierter 100 kVA-Transformator für Erweiterungen in Aussicht genommen sein soll. Die Zahl der abgehenden Niederspannungsstromkreise ist recht bedeutend; es muß Strom sowohl für Beleuchtung als auch für Motorenbetrieb geliefert werden.

Das Schaltbild zeigt Abb. 392. Vom Kraftwerke führt nur eine Leitung zur Fabrik. Beim Eintritt derselben in die Transformatorenanlage liegen vor dem Hauptölschalter *Sch_{max}* die einpoligen Trennschalter *Tr*. Der Strom wird dann zunächst zu einer Sammelschiene *S.S.* und von dort über einen an Strom- und Spannungswandler angeschlossenen Zählersatz für ungleich belastete Phasen an die Hauptsammelschienen geführt. Um Überspannungen aus dem Hochspannungsnetze von den Transformatoren fernzuhalten, ist an diese Sammelschienen noch ein abzuschaltender Schutz gelegt, der aus einem dreipoligen Ölwiderrstände *Ö.W.* und drei Hörnerfunkenstrecken *H.F.* besteht.

An die Hochspannungssammelschienen sind alle Transformatoren parallel angeschlossen. Hier etwa die Doppelsammelschiene zu wählen, hätte gewiß manche Vorzüge, wäre aber bei der verhältnis-

hohen Stromstärke wegen mit Stromwandler *Str.Trf.* läßt die Belastung jedes Transformators erkennen.

Die Transformatoren sind dreiphasig und ölisoliert. Die abgehenden Stromkreise haben ebenfalls gemeinsame Sammelschienen. Die Anschlüsse für Beleuchtung liegen abwechselnd zwischen den einzelnen Phasen. Auf eine gleichmäßige Belastung jeder Leitung ist durch entsprechende Verteilung der Lampen in den einzelnen Arbeits-

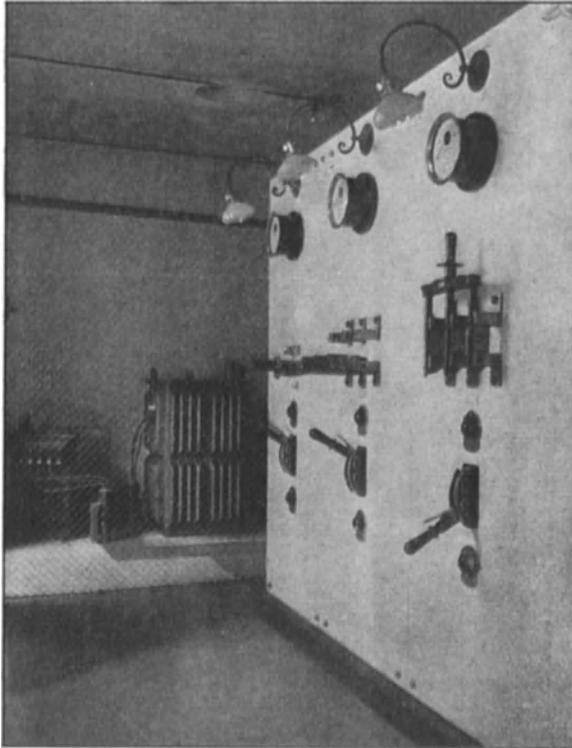


Abb. 393. Schalttafel und Transformatorenraum zum Schaltbilde Abb. 392.

stätten Rücksicht genommen worden. Die angeschlossenen Motoren sind Drehstrommotoren. Jeder Stromkreis ist ausschaltbar und gesichert.

Für die Unterbringung der Gesamteinrichtung ist ein besonderer, nur durch eine Türe zugänglicher, durch zwei Fenster hell erleuchteter Raum zu ebener Erde mit genügenden Abmessungen zur Verfügung gestellt. Abb. 393 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 geerdetes, engmaschiges Drahtgitter von dieser und dem Bedienungsgange getrennt. Die Leitungen zu und von den Transformatoren liegen in abgedeckten Kanälen, um volle Bewegungsfreiheit

und ein geschmackvolles Aussehen des Aufstellungsplatzes der Transformatoren zu erhalten.

Die Schalttafel (Abb. 393) besteht aus mehreren mit Marmor tafeln ausgekleideten Feldern, auf denen die Meßgeräte, die Hebel für die Ölschalter mit den Meldelampen und die Niederspannungsschalter befestigt sind. Die Niederspannungssicherungen und der Zähler liegen auf der Rückseite der Tafel. Für eine gute Beleuchtung der Schalttafel und des ganzen Raumes ist Sorge getragen.

Sämtliche Hochspannungsgeräte befinden sich in Eisengerüsten hinter der Schalttafel.

Die Tafel VI zeigt den vollständigen Aufbau dieses Teiles der Anlage. Aus dem Schnitt *C—D* erkennt man die eigentliche Schalttafel mit den Meßgeräten (*Str.Z.*) und Schalterantrieben *Sch.* Auf der Rückseite liegen, wie bereits erwähnt, die Niederspannungssicherungen *S.*, und ferner befinden sich über denselben auf Isolatoren die Niederspannungssammelschienen. Ein Bedienungsgang von 1250 mm Breite trennt die Schalttafel von den Hochspannungsgütern. Der Einbau der Spannungswandler *Sp.Trf.* mit ihren Sicherungen *Sp.Z.*, der Stromwandler *Str.Trf.*, der selbsttätigen 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 Hörnerfunkenstrecken *H.F.* mit dem Ölwidestande *Ö.W.* ist ohne weitere Erklärung aus den Schnitten zu ersehen. Für die Stromfortführungen vom Endverschlusse der Kraftwerksleitung, die im Transformatorraum ebenfalls als Kabel ausgeführt ist, dienen blanke, auf Isolatoren befestigte Rundkupferleitungen.

b) Transformatorenwerke für Überlandanlagen. Zu den in Abb. 385 bis 388 dargestellten Anlagen sollen hier noch einige andere Bauformen behandelt werden. Abb. 394 zeigt ein einfaches Häuschen aus Ziegelfachwerk mit Pappdach zur Aufnahme eines kleinen Transformators bis etwa 20 kVA, den man 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 die mittels einer Isolierzange herausgenommen werden können. Meßgeräte mit Ausnahme eines Zählers sind fortgelassen. Der unmittelbar vor dem Hause stehende eiserne Leitungsmast ist als Abspannmast ausgebildet. Infolgedessen 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 Erdbebengegenden, 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 noch halten, und bei Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit der Transformatoranlage im Notfalle wenigstens Beleuchtung geschaffen werden kann. Außerdem können solche Häuschen zumeist von ortsangesessenen Handwerkern gebaut werden, fallen dann stets erheblich billiger aus, und das Interesse

der einzelnen Gemeindemitglieder wie Ortsschmied, Maurer, Tischler, Dachdecker usw. an dem Überlandwerke wird gehoben.

Ein von den bisher beschriebenen Ausführungen gänzlich abweichendes Transformatorhaus zeigt Abb. 395. Dasselbe ist vollständig aus Eisen hergestellt, und zwar benutzt man entweder einen quadratischen eisernen Gittermast, um den ein Raum durch Eisenblech mit



Abb. 394. Kleiner Transformatorurm mit einem Transformator.

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 Niederspannungsschaltgeräte untergebracht sind. An solchen enthält der Turm nach Abb. 395: 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

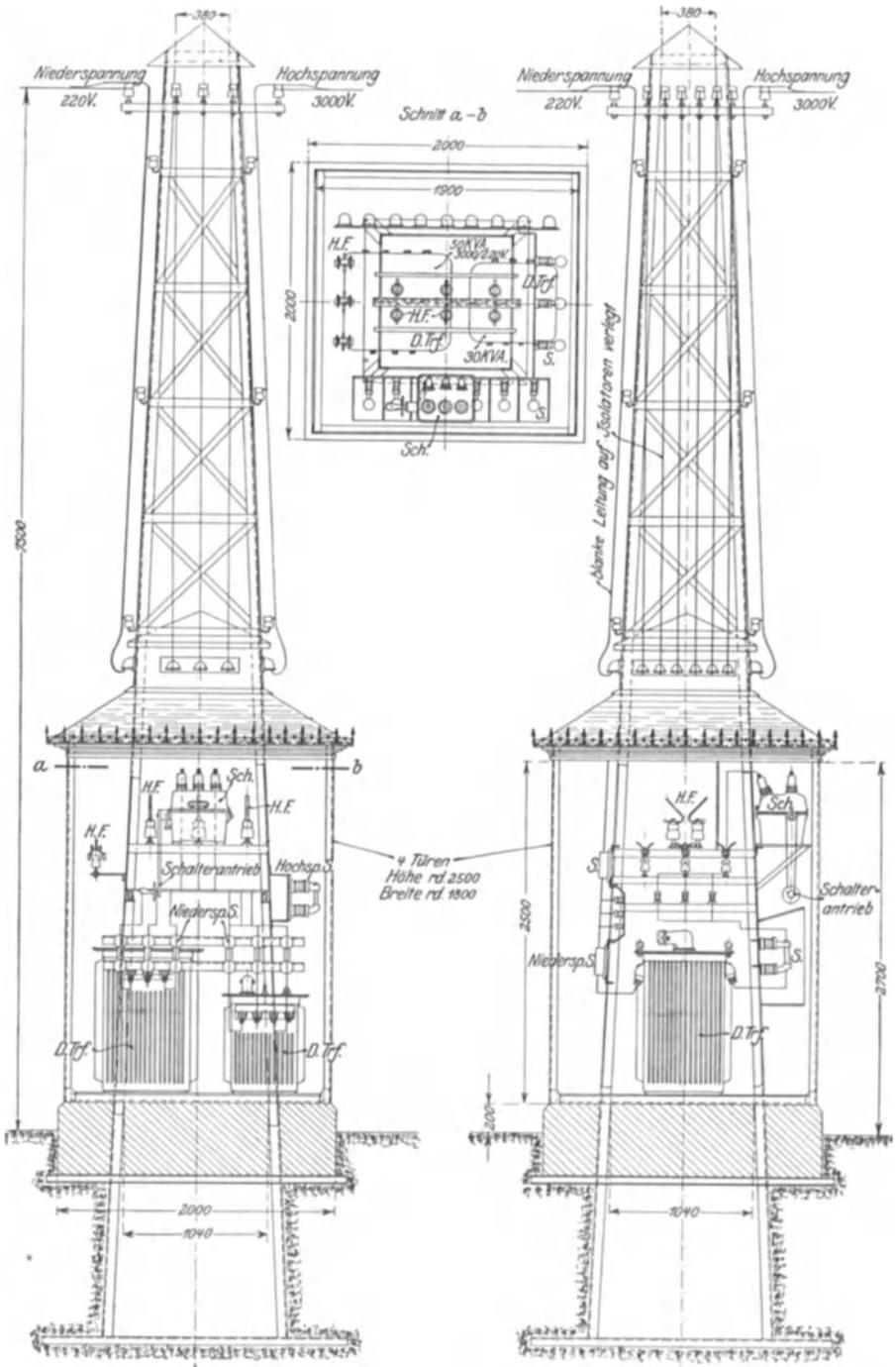


Abb. 395. Eiserner Transformerturm mit Leitungsmast für die ankommenden und abgehenden Stromkreise.

zu ebener Erde. Aus den einzelnen Ansichten der Abb. 395 ist der Einbau und auch der Stromverlauf deutlich erkennbar.

Eine derartige Transformatoranlage ist etwas teurer als ein gleich großer Ziegelbau und im allgemeinen nur geeignet, wenn es sich um Spannungen bis etwa 6000 V handelt. Über diese Spannung hinaus wird die Anlage infolge der größeren Zahl von Schaltgeräten, 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 die Baustoffe schwer zu beschaffen oder umständlich hinzubringen ist (schlechte Wege z. B. in Überseeländern, Gebirgsgegenden u. dgl.). Die Türme werden in der Werkstatt fertig zusammengesetzt, dann in Teile zerlegt und an Ort und Stelle ohne große Mühe wieder zusammengesetzt.

60. Transformatorwerke innerhalb großer Städte.

a) Oberirdische Aufstellung der Transformatoren. Innerhalb

größerer Städte können weder Türme aus Ziegelmauerwerk, noch aus Eisen der beschriebenen Art verwendet werden, wenn sie nicht durch architektonische Ausgestaltung unverhältnismäßig teuer ausfallen sollen. Außerdem kommen auch Hochspannungen über etwa 10000 V als Verteilungsspannungen selten vor, und infolgedessen ist der für die Schaltgeräte erforderliche Platz nicht allzu bedeutend. Ferner sind

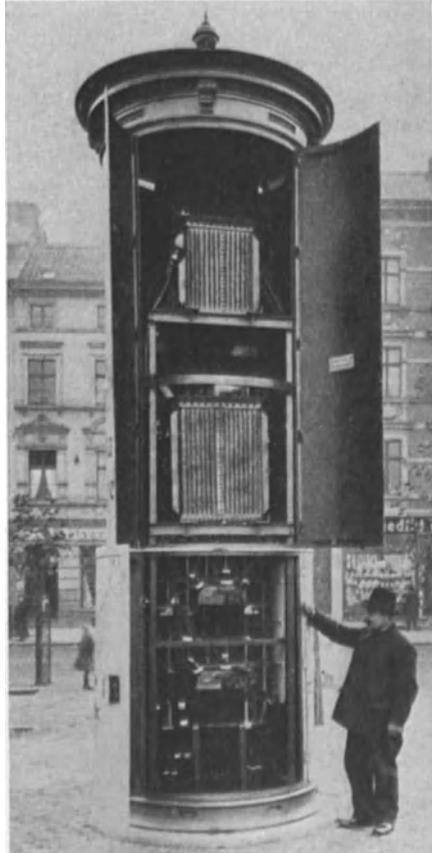


Abb. 396. Eiserner Transformatorernturm innerhalb einer Stadt in der Form einer Anschlagssäule.

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 Säulen aus Eisenblech ähnlich wie die Bild-Anschlagsäulen, oder bildet schließlich letztere selbst zur Transformatoranlage aus, wie Abb. 396 zeigt. Hier sind zwei Transformatoren übereinander aufgestellt, 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 Schaltgeräte möglichst tief angeordnet sein.

b) Unterirdische Aufstellung der Transformatoren. Im Gegensatz zu den oberirdisch angelegten Transformatorhäusern findet man besonders in dicht bebauten Städten, auf dekorativen Plätzen und bei ähnlichen Gelegenheiten Schwierigkeiten in der Beschaffung eines geeigneten Ortes zur Errichtung der Transformatoranlage. In solchen Fällen bleibt dann oft keine andere Möglichkeit, als den Transformator unterirdisch aufzustellen.

Die Anlage eines derartigen Transformatorwerkes 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, Grundwasser 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 Strombedarfsverhältnisse und auf die leichtere Abgrenzung bei Betriebsstörungen vorteilhafter, mehrere kleinere Transformatorwerke zu errichten als wenige größere. Um 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 diese Weise eine kleine Anlage 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.

Abb. 397 zeigt eine solche Transformatoranlage. Der aktive Transformator — die Eisenkerne mit den Wicklungen — ist in einem geschweißten Kasten aus Eisenblech untergebracht, der mit Öl gefüllt ist, denn aus betriebstechnischen Gründen kann für derartige Verhältnisse nur die ölisolierte Bauform zur Verwendung kommen. Der Transformator steht frei im Kasten und wird nur durch zwei I-Eisen festgelegt, 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 zwei gußeiserne, mit

¹ Solche unterirdische Transformatoranlagen hat Oerlikon für die Stadt Luzern gebaut.

Isoliermasse ausgegossene Kabelendverschlüsse angeordnet, durch welche die ankommenden und abgehenden Kabelleitungen in das Innere des Kastens eingeführt werden. In Abb. 397 besteht die Zuleitung aus einem, die Ableitung aus zwei Kabeln. Der Deckel des Ölkastens ist gewölbt ausgeführt, um ein sicheres Abfließen etwa in die Transformatorgrube eingedrungenen Regenwassers zu bewirken.

Der ganze Transformatorkasten wird in eine auszementierte oder ausbetonierte Grube versenkt, in welcher er bis zur Höhe der Kabelendverschlüsse in Kies eingebettet steht. Das eingedrungene Regenwasser sickert durch diese Kies-schicht durch und fließt durch vier im Boden angeordnete Kanäle ab. Die Grube wird oben durch einen gußeisernen Deckel verschlossen. Werden die Transformatoren nicht im Fahrdamm, sondern im Bürgersteige eingebaut, so können die Deckel leicht genug ausgeführt werden, damit zwei Mann sie abheben können.

Die zu jedem Transformator gehörenden Schaltgeräte wie Ausschalter und Sicherungen sind in der Regel in zwei anderen Kästen neben dem Transformator untergebracht, oder sie werden für mehrere Transformatoren eines Versorgungsgebietes in einer besonderen Schaltstelle, die ähnlich ausgebildet ist, vereinigt.

Auch die oberirdische Unterbringung in einem Schalthäuschen ist bereits ausgeführt worden.

Naturgemäß sind auch andere Bauformen möglich etwa dergestalt, daß unter Pflaster eine für Transformator und Schalter oder Sicherungen gemeinsame Anlage geschaffen wird. Es würde zu weit führen, auch hierfür noch ein Beispiel zu geben. Die Vereinigung sämtlicher Anlagenteile hat den Nachteil, daß bei einem Transformatorbrande der Um-

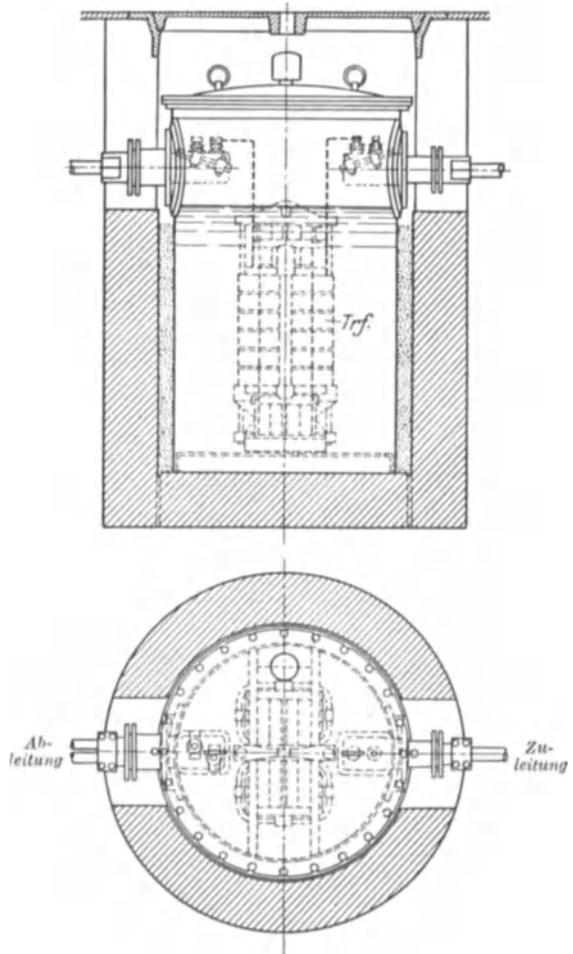


Abb. 397. Unterirdische Transformatoranlage.

fang der Störung größer wird als bei der Trennung und die Instandsetzungsarbeiten dann wesentlich zeitraubender und umständlicher sind.

61. Masttransformatoren.

a) **Allgemeines über die Ausführung.** Handelt es sich um den Anschluß kleinerer Stromverbrauchsstellen z. B. kleiner Ortsgemeinden, landwirtschaftlicher Betriebe (Güter, Vorwerke) u. dgl. an das als Freileitung ausgeführte Hochspannungs-Verteilungsnetz eines Überlandwerkes, dann wird der Bau eines besonderen Häuschens aus Stein oder Eisen zur Aufstellung des Transformators und zur Unterbringung der Schaltgeräte im Vergleich zu dem Gewinn aus der Stromlieferung 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. Dadurch werden natürlich die Ausgaben für die Beschaffung einer solchen Transformatoranlage außerordentlich gering, weil der Grunderwerb und alle teureren Einrichtungen, die bei einer Anlage mit gedeckten Räumen notwendig sind, in Fortfall kommen.

Die Masttransformatoren werden für Drehstrom bis zu einer Leistung von 15 kVA und für Spannungen bis 15000 V gebaut. Darüber sind Gewicht und Abmessungen derselben zu groß und zwingen dann dazu, schon besondere Eisen- oder Holzgerüste zu verwenden, also zu Ausgaben, die die ganze Ausführung unter Umständen so verteuern, daß kein nennenswerter Vorteil mehr gegenüber einem einfachen festen Transformatorhause besteht. Ferner sind die größeren Transformatoren umständlicher und schwieriger zu handhaben. Steigt die Leistung über 15 kVA — eine Zahl die sich aus der Praxis ergeben hat — so bringt man den Transformator besser in einem Raume der Baulichkeiten des Stromabnehmers unter, wenn man mit Rücksicht auf die Kosten von einem eigenen Transformatorhause absehen muß, und Niederspannungs-Verteilungsleitungen zu anderen Abnehmern nicht abgezweigt sind. Ist letzteres dagegen der Fall, dann muß man notgedrungen zur Errichtung einer festen Transformatoranlage übergehen, um die Stromlieferung vollständig unabhängig von jedem der Abnehmer 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 Bauformen Verwendung finden.

Besondere Sorgfalt ist auf die Wahl und Anbringung der für solche Masttransformatoranlagen notwendigen Schalt- und Sicherheitsgeräte zu verwenden, weil sie nicht nur ebenfalls im Freien mehr oder weniger unmittelbar anzubringen sind, sondern weil sie auch gegen zufällige Berührung geschützt und dennoch so ausgeführt und

eingebaut 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 Schaltgeräte auf das betriebstechnisch geringst zulässige Maß beschränkt werden muß, um Betriebsstörungen durch Vorkommnisse an diesen Geräten soviel wie möglich zu verhüten.

Ferner soll ein besonderer Überspannungsschutz hochspannungsseitig nicht angebracht werden, weil derselbe einer dauernden Wartung unterworfen werden muß, wenn er ordnungsmäßig arbeiten soll, und die billigen Anlagekosten durch die höheren Ausgaben für Unterstichung, Instandsetzung usw. ungünstig beeinflusst werden. Die Stromlieferungsgesellschaft läßt entweder die Transformatorwicklungen stärker isolieren, oder beschafft vorteilhafter eine geringe Zahl von Ersatztransformatoren, und wechselt im Bedarfsfalle einen beschädigten Transformator in kurzer Zeit aus, als im Gegensatze dazu ständiges Personal für Überwachung der Überspannungsschutzvorrichtungen in einer noch größeren Anzahl als für die Leitungsbeaufsichtigung an sich notwendig zu unterhalten. Aus dieser Maßregel entspringt dann weiter die selbstverständliche Folgerung, in einem Überlandnetze in den Leistungs- und Spannungsverhältnissen nur einheitlich durchgebildete Masttransformatoren zu verwenden, also die Leistungen auf ein oder zwei Werte zu beschränken, und die Schaltgeräte und die Sicherungen ebenfalls in nur wenigen, gleichgehaltenen Ausführungen zu benutzen. So wird die Haltung des Reservelagers einfach, und die Auswechselungen können schnell und ohne Fehler bewerkstelligt werden.

b) Die Schaltung der Masttransformatoranlage hat im allgemeinen nach folgenden Gesichtspunkten zu geschehen.

Führt zu dem Stromabnehmer von der Hochspannungsleitung eine Stichleitung, an deren Ende der Transformator aufgestellt werden soll, und ist die Stichleitung am Anfange mit einem Mastschalter versehen, so daß sie spannungslos gemacht werden kann, dann gibt man dem Masttransformator nur abschaltbare Niederspannungssicherungen. Fehlt der Mastschalter am Anfang, dann muß der Masttransformator durch einen Trennschalter abschaltbar sein. Sollen auf der Hochspannungsseite auch 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 Vollaststromstärke 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.

Wird der Transformator unmittelbar von der Hauptstrecke der Hochspannungsleitung abgezweigt, dann ist es notwendig, noch besondere Trennschalter hochspannungsseitig einzubauen, um den Transformator ohne Störung des anderen Betriebes leicht spannungslos machen zu können. Die Trennschalter müssen

bequem von unten bedienbar sein. Bei Spannungen bis etwa 3 kV ober-
spannungsseitig können an Stelle der Trennmesser auch abschaltbare
Sicherungen benutzt werden (Abb. 400). — Schließlich sei nochmals
besonders darauf hingewiesen, daß bei der Speisung eines Niederspan-
nungsnetzes parallel von zwei Trans-

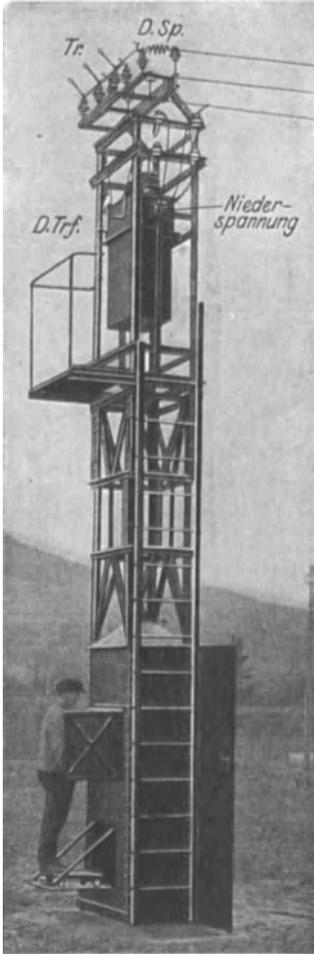


Abb. 398. Masttransformator
auf dem Felde.



Abb. 399. Masttransformator
mit Bedienungsbühne.

formatoren bei der Auswechslung von Hochspannungssicherungen Vor-
sicht geboten und die Niederspannungsseite auch spannungslos zu
machen ist, wenn eine Rückwärtstransformierung eintreten kann.

Im allgemeinen wird niederspannungsseitig nur ein Leitungsstrang
zum Abnehmer führen. Sind deren mehrere vorhanden, so empfiehlt es
sich, die notwendigen Sicherungen entweder in handlicher Höhe in
einem verschlossenen Kasten unterzubringen, oder den benachbarten

Mast mit Leitungsverteilerungen und aufgebauten Sicherungen zu versehen, um unbefugtes Abschalten einer Leitung zu verhindern.

Es sollen nun an der Hand ausgeführter Anlagen noch weitere Einzelheiten solcher Masttransformatoranlagen behandelt werden, wobei selbstverständlich aus den mannigfaltigen Ausführungsformen nur einige besonders bemerkenswerte herausgegriffen worden sind. Der entwerfende Ingenieur wird hieraus unschwer für bestimmte Verhältnisse neue Bauformen schaffen können.

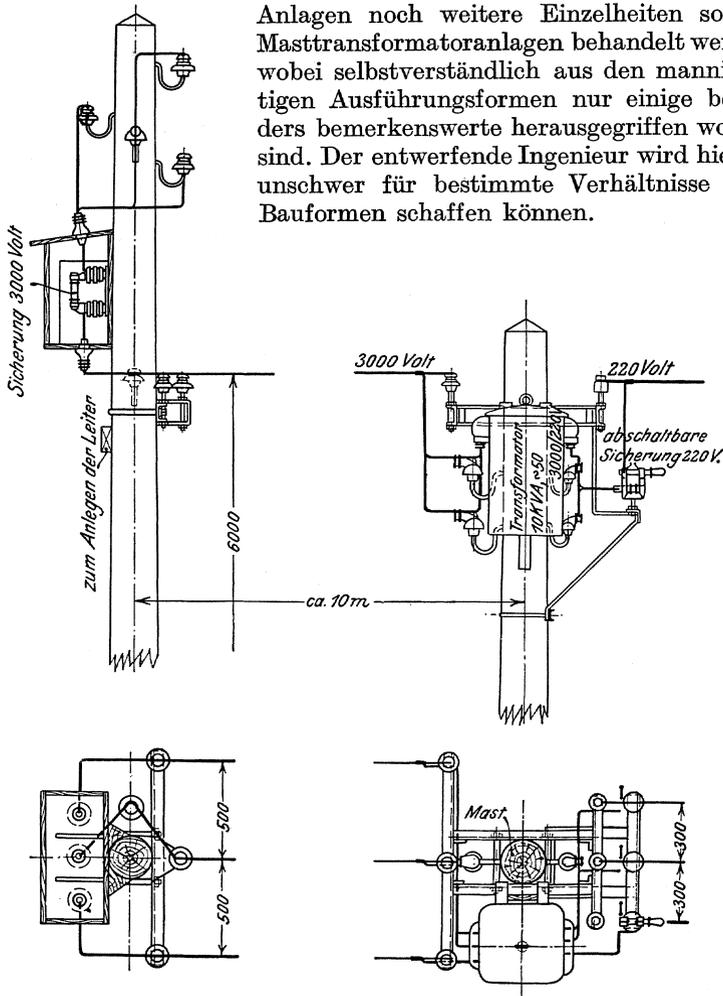


Abb. 400. Masttransformatoranlage an einer Stichleitung der Hochspannungsleitung.

c) **Ausgeführte Anlagen.** Abb. 398 zeigt eine Masttransformatoranlage auf freiem Felde für landwirtschaftliche Zwecke (Dreschen usw.), die von A. Gobiet & Co., Rothenburg, gebaut worden ist. Sie besteht aus einem eisernen Gittermaste von 7 m Länge auf Betonfundament mit fest angebauter eiserner, durch eine abschließbare Blechplatte abgedeckter Leiter, einer imprägnierten Hartholzplattform und je einer Eisentraverse für 3 Hochspannungs- und 4 Niederspannungsisolatoren.

Der Mast ist, um unbefugtes Besteigen zu verhindern, auf $2\frac{1}{4}$ m Höhe mit Blechplatten abgedeckt. Die Hochspannungsleitung führt über kleine Drosselspulen und einpolige Mastschalter zu den Hochspannungsklemmen des Öl-

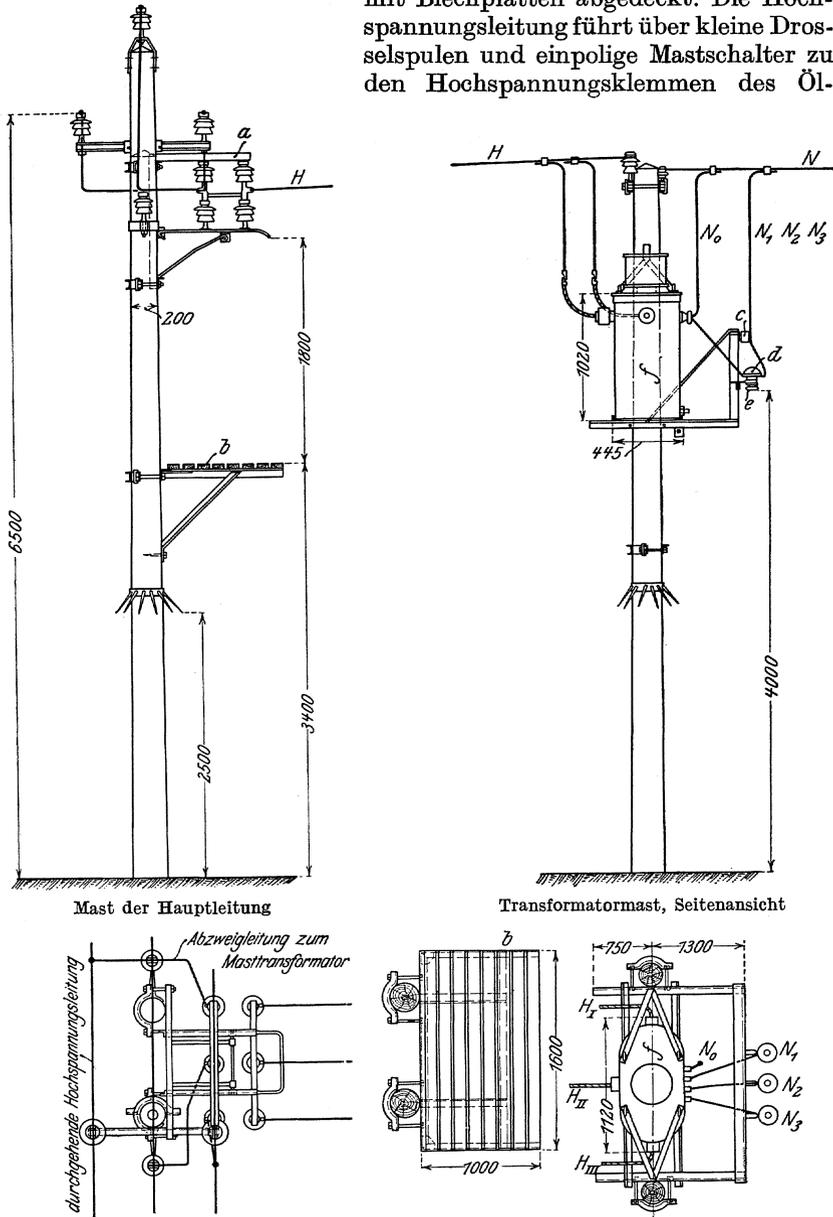
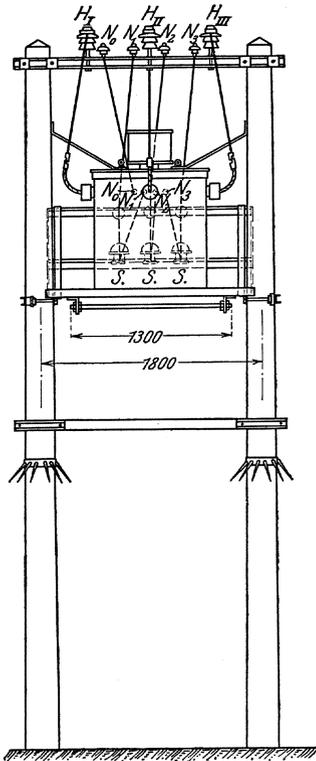


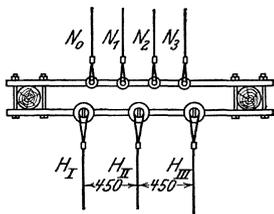
Abb. 401. Größere Masttransformatoranlage am Ende einer Stiehleitung.

a Hochspannungs-Trennmesser, *b* Bedienungsühne, *c* Isolatoren, *d* Niederspannungssicherungen *S*, *e* Schmelzeinsätze zu *d*, *f* Drehstromtransformator mit Ölausehnungsgefäß 15 kVA, 15000/380, 220 Volt., Freq. = 50, *H*, *H_I*, *H_{II}*, *H_{III}* Hochspannungsleitungen, *N*, *N₁*, *N₂*, *N₃*, *N₄* Niederspannungsleitungen.

transformators. Die Niederspannung wird zu einer im Mastsockel eingebauten Marmorverteilungstafel geleitet; diese Leitungen sind in Rohr verlegt. Um gefahrlos Arbeiten an dieser Anlage vornehmen zu können, ist ferner im Mastsockel eine herausklappbare isolierende Bedienungsplattform vorgesehen, durch die gleichzeitig im Sockel ein Raum zur Aufbewahrung von Reserveteilen geschaffen wird. Von der Hartholzplattform kann der Transformator besichtigt und untersucht werden. Eine dieser ähnliche Ausführung mit Eisenmast zeigt Abb. 399.



Transformormast, Vorderansicht



Zu Abb. 401.

Leistung desselben beträgt 15 kVA bei 15000/380, 220 V. — Um den Transformator hochspannungsseitig abtrennen zu können, sind Trenn-

Eine Masttransformatoranlage in wesentlich anderer Ausführung zeigt Abb. 400, und zwar liegt hier der Transformator an einer Stichleitung. Die Leistung desselben beträgt 10 kVA und das Spannungs-Übersetzungsverhältnis 3000/220 V. An dem Endmast der Stichleitung ist ein Holzkasten angebaut, in welchem die mittels Isolierzange abschaltbaren 3000-V-Streifenicherungen 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 angebracht sind. Die Art der Transformatorbefestigung ist aus Abb. 400 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.

Bei noch größeren Transformatorleistungen genügt ein Holzmast zur sicheren Aufhängung des Transformators nicht mehr. Man muß dann entweder zu einem Eisenmast übergehen oder, was unter Umständen billiger ist, zwei Holzmasten zusammensetzen, zwischen denen der Transformator auf einer Bedienungsfläche Aufstellung findet. Abb. 401 zeigt eine derartige Masttransformatoranlage in allen Einzelheiten. Hier ist der Transformator f an die durchgehende Hauptleitung angeschlossen. Die

messer (a) vorhanden, die von der Bühne b aus bedient werden. Die Hochspannungsleitung H führt dann ungesichert als Stickleitung zum Transformatormast, ist dort abgespannt und durch bewegliche, besondere Leitungsstücke mit den Hochspannungsklemmen des Transformators verbunden. Sekundär sind die drei Phasenleitungen 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 in Abb. 401 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 mit entsprechenden Aufschriften sind noch besonders anzubringen.

62. Fahrbare Transformatoranlagen¹.

Die fest aufgestellten Transformatoren hatten die Aufgabe, solchen Verbrauchsstellen die elektrische Leistung 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 dagegen um den Anschluß einzelner Elektromotoren an die Hochspannungsleitung, die je nach Bedarf ihren Aufstellungsort wechseln, 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 wegen der Bedienung der Hochspannungs-Schaltgeräte durch ungeübte Leute nicht empfehlenswert ist. Derartige Verhältnisse finden sich häufig in landwirtschaftlichen Betrieben für das elektrische Pflügen, Dreschen auf dem Felde, 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 Transformator fahrbar ausführt, und ihn dann jedesmal dort an die Hochspannungsleitung anschließt, wo der Elektromotor zur Zeit gebraucht wird. Zu diesem Zwecke setzt man den Transformator in einen Wagen und bringt in letzterem auch alle Schalt-, Sicherheits- und Meßgeräte unter. Abb. 402 zeigt einen derartigen Transformatorwagen mit seiner Inneneinrichtung und der Form des Anschlusses an die Hochspannungsleitung. Auch für vorübergehende Beleuchtungsanlagen kann die Benutzung einer fahrbaren Transformatoranlage manche Ausgaben ersparen. Desgleichen ist sie als Aushilfe für ortsfeste Transformatoren in ausgedehnten Überlandkraftwerken vorteilhaft verwendbar.

¹ Siehe den Aufsatz des Verfassers in EKB 1911: Neuerungen beim Bau von Transformatorwagen.

Als Transformator kann aus den bereits bekannten Gründen nur wiederum die ölisolierte Bauform benutzt werden

Der Wagen in Abb. 402 zeigt eine besondere Gestaltung darin, daß der hintere Teil desselben, in welchem der Transformator untergebracht ist, tiefer liegt als der vordere, der zur Aufnahme der Schaltgeräte dient. Infolge dieses Einbaues des Transformators wird der Schwerpunkt des Wagens tiefer gelegt, und dadurch größere Sicherheit beim Fahren, sowie geringere Bauhöhe erreicht. Die Hinterachse ist gekröpft; es können

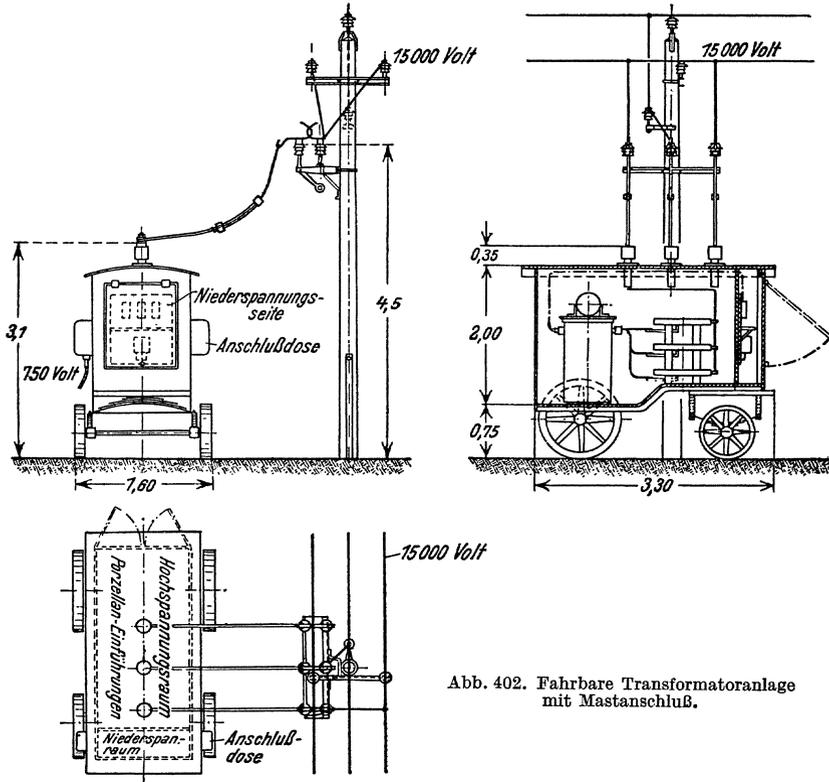


Abb. 402. Fahrbare Transformatoranlage mit Mastanschluß.

somit große Hinterraddurchmesser gewählt werden, was ebenfalls für das leichtere Fahren 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 Schalt- und Meßgeräte 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 Meßgeräte federnd zu befestigen.

An Schaltgeräten 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 10000 V aufwärts verwendet man noch Drosselspulen als Überspannungsschutz. Da die Entfernung des Transformatoranschlusses vom nächsten festen Transformatorwerke in der Regel 3 bis 4 km nicht überschreitet, und in letzterer Ableitungsvorrichtungen für die Überspannungen zumeist vorhanden sind, sind solche im Wagen nicht mehr vorzusehen. Unterspannungsseitig sind stets Sicherungen, und gegebenenfalls ein Zähler je nach den Spannungsverhältnissen mit oder ohne Meßwandler notwendig. Das Innere des Wagens wird dann nach

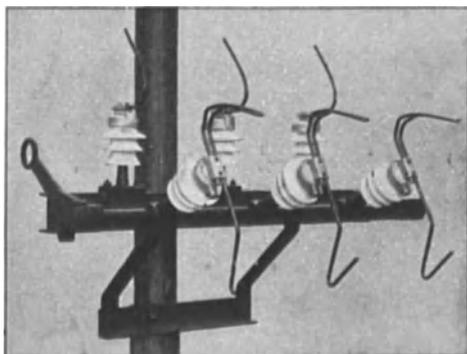


Abb. 403. Mastschalter, geöffnet.

Abb. 402 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.

Der Anschluß des Transformatorwagens an die Hochspannungsleitung erfolgt unter Benutzung besonders ausgebildeter Mastschalter (Abb. 403)

und beweglicher blanker oder isolierter Leitungen (Abb. 402), die je nach der Entfernung zwischen Wagen und Mast innerhalb bestimmter Grenzen leicht verlängert oder verkürzt werden können.

Der Mastschalter besteht bei Drehstrom aus sechs ähnlich den Hörnerfunkenstrecken ausgebildeten Kupferbügeln, von denen drei Stück mit ihren Isolatoren drehbar gelagert und mit Haken versehen sind, 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. Abb. 403 zeigt den Mastschalter in geöffnetem Zustande, während in Abb. 402 der Schalter geschlossen und die Transformatoranlage betriebsfertig ist. Zum Abschalten größerer Leistungen sind diese Mast-schalter 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. Für die Schaltleistung solcher Trennschalter gilt das auf S. 430 Gesagte ebenfalls.

Aus dem Schaltbilde Abb. 404 geht hervor, wie einfach mit Hilfe solcher Schalter der Anschluß des Transformators an die Hochspannungsleitung bewirkt und wie bequem 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 getrennte Streckenschalter zu verwenden.

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. Die Verbindung geschieht durch Anschlußdose und Stecker. Erstere erhalten bei Spannungen über 250 V gegen Erde nach den Vorschriften des VDE 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 Transformatorenanlagen sind bereits für Leistungen bis 100 kVA und Spannungen bis 30000 V ausgeführt worden.

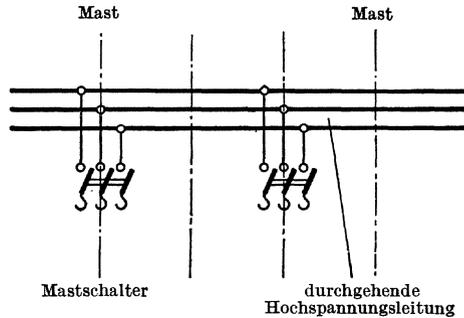


Abb. 404. Schaltbild für die Anordnung von Mastschaltern für fahrbare Transformatorenanlagen.

63. Große Transformatorenanlagen.

Als Beispiel für ein großes Transformatorenwerk ist das Werk Jena der Thüringischen Landeselektrizitätsversorgung¹ gewählt, weil bei diesem ein großer Teil aller der Gesichtspunkte für den Aufbau und für die Betriebsführung berücksichtigt wurden, die in den vorangegangenen Kapiteln erläutert worden sind und daher eine leichte Nachprüfung ermöglichen. Dabei wird ferner auf Einzelheiten hingewiesen werden, die für die Aufstellung und den Vergleich von Entwürfen solcher und ähnlicher Anlagen maßgebend sein sollen.

Abb. 405 zeigt in einfachen Linien das zu speisende Netz, das von den Großkraftwerken B. und E. mit Strom versorgt wird. Während E. im Zuge der 50-kV-Leitung liegt, ist das Werk B. über eine 100-kV-Leitung mit dem Landesnetz verbunden. Die von B. im vollen Ausbau des Netzes zu liefernde Leistung wird 40000 kVA betragen.

¹ Ergänztter Aufsatz des Verfassers: Das 100/50/10-KV-Umspannwerk Jena der Thüringischen Landeselektrizitätsversorgungs-A.G. Thüringenwerk. Siemens-Zeitschrift 1929, H. 2 u. 3.

Da die Ausführung dieser Leitung besondere Beachtung beanspruchen darf und ihre Durchbildung auch auf die 100-kV-Seite des Transformatorenwerkes bestimmend ist, soll sie kurz erläutert werden.

a) **Die 100-kV-Zuführung.** Zur Übertragung der 40000 kVA bei rund 65 km Entfernung ist eine 100-kV-Doppelleitung notwendig. Da für die ersten Jahre aber nur etwa 10 bis 15000 kVA aus dem Großkraftwerke B. benötigt werden, die Doppelleitung für diese Übertragung unwirtschaftlich teuer geworden wäre, auf die betriebliche Sicherheit

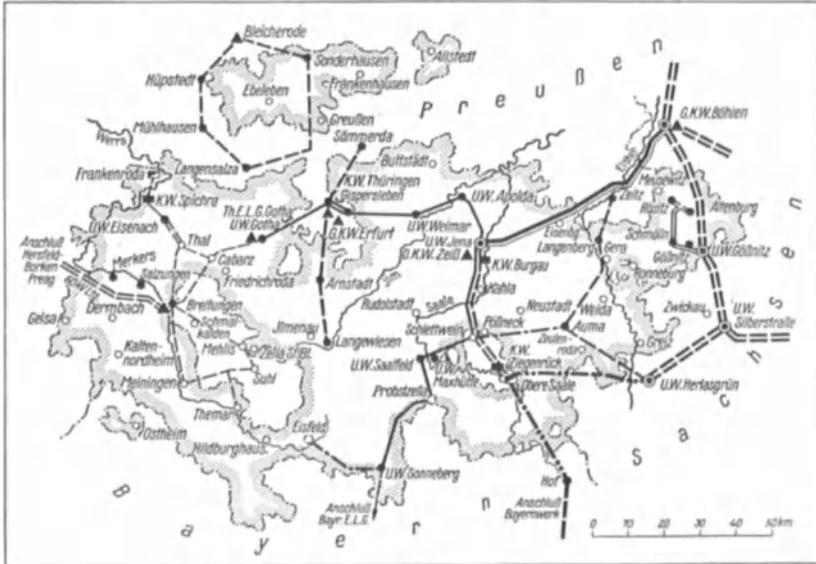


Abb. 405. Thüringische Landeselektrizitätsversorgung.

————— 50-kV-Leitung Thüringenwerk,	— · — · — 100-kV-Leitung Thüringenwerk, geplant,
- - - - - 50-kV-Leitung Thüringenwerk, geplant,	== == == 100-kV-Leitung, AG. Sächsische Werke,
- - - - - 50-kV-Leitung, fremd,	▲ ▲ Dampfkraftwerk, Gaskraftwerk,
- · - · - 30-kV-Leitung Thüringenwerk,	■ Wasserkraftwerk,
- · - · - 30-kV-Leitung Thüringenwerk, geplant,	□ Wasserkraftwerk, geplant,
- - - - - 30-kV-Leitung, fremd,	● Transformatorwerk,
==== 100-kV-Leitung Thüringenwerk,	○ Transformatorwerk, geplant.
mit Reservephase,	

einer solchen aber nicht vollständig verzichtet werden konnte, und zudem die künftige Entwicklung die Möglichkeit aufweist, daß statt der Doppelleitung andere 100-kV-Verbindungen für vorteilhafter angesehen werden könnte (erhöhte Betriebssicherheit und Betriebsbeweglichkeit bei Störungen durch zweite unabhängige Speisung, Ringbildung), wurde zunächst nur ein Stromkreis aufgelegt und eine 4. Phase hinzugefügt. Diese 4. Phase kann an Stelle jeder der drei Leitungen bis zur Sammelschiene, also einschließlich der besonders gefährdeten Gebäudeeinführungen, in spannungslosem Zustande mittels Trennschalter in B. und im Transformatorenwerk schnell und sicher eingeschaltet werden. Abb. 406 zeigt das Schaltbild und Abb. 407 die Freiluft-Umschaltstelle in B. Die Bedienung der Trennschalter erfolgt zur Zeit von

Hand. Für die Zukunft ist, falls der Betrieb dieses fordern sollte, Fernbetätigung der Trennschalter von der Warte des Großkraftwerkes B. in Aussicht genommen. Die sonst dreipolig gekuppelten Trennschalter am Anfange und am Ende der Leitung sind in Einzeltrennschalter aufgelöst. Erdungsschalter an diesen Trennschaltern gestatten an beiden Leitungsenden zuverlässig zu erden. Zur Verhütung von Fehlschaltungen sind die Antriebe dieser Erdungsschalter derart mechanisch mit den Antrieben der Trennschalter verriegelt, daß die Erdung nicht eher vorgenommen werden kann, als bis die Trennschalter geöffnet sind, und umgekehrt.

b) Die 100-kV-Leitung ist mit Eisen-gittermasten nach Abb. 408 gebaut. Die vier Leitungen liegen in einer Ebene. Sollte der zweite Stromkreis voll ausgebaut werden, so würden nach Abb. 409 die fehlenden zwei Leitungen unter den jetzt verlegten angeordnet werden. Die technischen Daten der Leitung sind folgende:

Leitungsquerschnitt für Kupferseil: 95 mm²,
 Leitungsquerschnitt für an Kreuzungen
 verlegtes Bronzeseil: 120 mm²,
 Seilbeanspruchung bei Kupfer: 16 kg/mm²,
 Seilbeanspruchung bei Bronze: 12 kg/mm² } bei -5° C und einer Eislast
 Erdseil: verzinktes Stahlseil 120 kg/mm²,
 Bruchfestigkeit: 50 kg/mm² } von 5 kg/lfdm,

Je 3 km vor den Werken in B. und Jena ist ein zweites Erdseil unter der Hochspannungsleitung verlegt.

Isolatorenzahl an den Tragmasten für die Leitung: 6 Stück,

Isolatorenzahl an den Abspannmasten: 7 Stück,

Isolatorenform: Kugelkopf Hermsdorf Ha 292 mit verlängertem Klöppel (siehe Zahlentafel 31), grün glasiert,

Sicherheitsgrad der Isolation: $\frac{308}{105} = 2,93^1$.

¹ Die Isolation der elektrischen Einbauten: Die Überschlagespannungen betragen:

	Reihe 10	60	100
Innenraumstützer kV	55—50	135—150	270—300
Innendurchführungen und Ölwechslerdurchführungen „	55—60	135—150	290—320
Außenwanddurchführungen „	—	180—200	290—320
50-kV-Sammelschienen, 3 Hängeisolatoren „	—	130	—
100-kV-Sammelschienen 6 Hängeisolatoren „	—	—	390

Fortsetzung der Fußnote siehe S. 500.

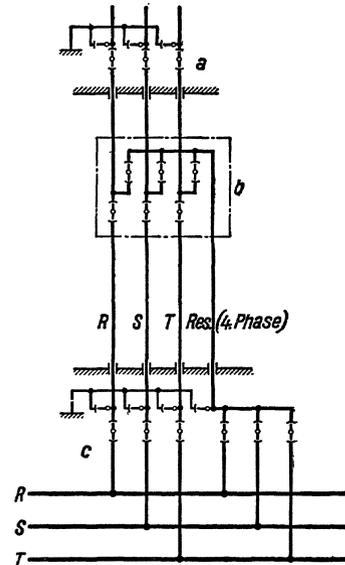


Abb. 406. 100-kV-Leitung Jena—Böhlen. Phasenlage und Trennschalterbezeichnung. a Kraftwerk Böhlen, b Freiluft-Umschaltstelle Böhlen, c Transformatorenwerk Jena.

Zahlentafel 31.

Bezeichnung	6 Glieder		7 Glieder	
	Normal	Verlängerter Klöppel	Normal	Verlängerter Klöppel
Lichtbogenüberschlag trocken . kV	390	418	450	465
Lichtbogenüberschlag bei Beregnung (3 mm/min) kV mit Wasser von $\lambda = 20 \mu\text{S}$	336	350	388	403
mit Wasser von $\lambda = 100 \mu\text{S}$	285	308	325	340
Baulänge. mm	1235	1325	1405	1510

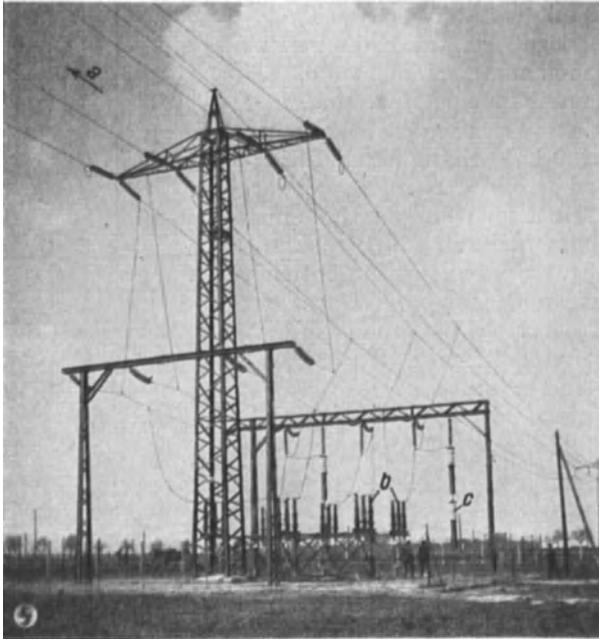


Abb. 407. Freiluft-Umschaltstelle Böhlen für die 4. Phase.
a nach Jena, *b* Trennschalter, *c* Kondensator des Hochfrequenzfersprechers.

Von der Umschaltung auf die 4. Phase ist im Betriebe bereits häufig Gebrauch gemacht worden insbesondere für Ar-

Die Überschlagnspannungen sind also mit denjenigen der 100-kV-Freileitung gut abgestimmt. Auf der 50-kV-Leitung sind durchweg 3 Hängeisolatoren für jede Kette in normaler Bauart verwendet. Aus Zahlentafel 31 sind die Werte für 3 Isolatoren leicht zu errechnen. Als ungünstigster Wert ergibt sich 142 kV und dieser Leitungssicherheitsgrad zu $\frac{142}{50} = 2,82$. Der Sicherheitsgrad der Innenanlage stimmt also ebenfalls zu dem der Freileitung gut.

Die Durchschlagsspannung der Innenisolatoren liegt in jedem Falle mehr als 10 vH über den Überschlagnspannungswerten.

Als Isolation wurde durchweg Hartpapier (Repelit) verwendet.

beiten auf der Strecke bei Isolatorprüfungen und Auswechselungen, sonstigen Untersuchungen, Mastanstrich u. dgl. Diese Form des Leitungsbaues hat sich als durchaus wirtschaftlich und zweckmäßig bewährt.

Um jederzeit im Transformatorenwerke feststellen zu können, ob die 100-kV-Leitung unter Spannung steht und weiter, welche Leitung im Falle eines Erdschlusses gestört bzw. welche der vier Phasen eingeschaltet ist, sind die Gebäudeeinführungen als Kondensator-durchführungen ausgebildet und speisen durch einen Schalter umschaltbar je drei Phasenspannungszeiger unmittelbar bei den Trennschalterantrieben und in der Warte.

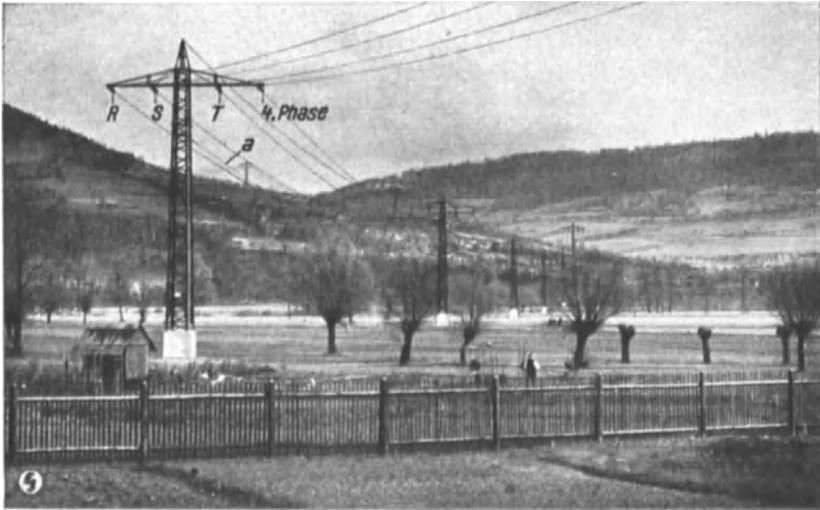


Abb. 408. 100-kV-Leitung im Saale-Überschwemmungsgebiet vor dem Transformatorenwerk.
a zweites Erdseil.

c) **Die Aufgaben des Werkes.** Das Transformatorenwerk hat neben der Spannungstransformierung von 100 auf 50 kV noch besondere Aufgaben und zwar:

a) das Parallelschalten und die Überwachung des Parallelbetriebes beider Lieferwerke,

b) die Regelung der 50-kV-Spannung im Landesnetz,

c) die Überwachung der Lastverteilung zwischen den Lieferwerken E. und B. in bezug auf die Landesstromabnahme und die geltenden Stromlieferungsverträge,

d) Belieferung des Stromversorgungsgebietes eines unmittelbar benachbarten Überlandwerkes mit 10 kV.

d) **Das Schaltbild.** Abb. 410 zeigt in einpoliger Darstellung das Gesamtschaltbild.

Von den in Aussicht genommenen drei 100-kV-Transformatoren sind zunächst zwei Stück von je 10000 kVA aufgestellt. Hinsichtlich ihrer

gegenseitigen Umschaltbarkeit auf die Doppelleitung bzw. die Einfachleitung mit 4. Phase im I. Ausbau wurde untersucht, ob die sonst übliche Doppelsammelschiene, die die Raumabmessungen jeder Höchstspannungsschaltanlage grundlegend bestimmt, auch auf der 100-kV-Seite hier so wesentliche Vorteile bot, um die höheren Kosten für Bau und Schaltgeräte aufzuwenden. Die Feststellungen ergaben, daß im vorliegenden Falle, wo es sich um eine Kopfanlage handelte, auf

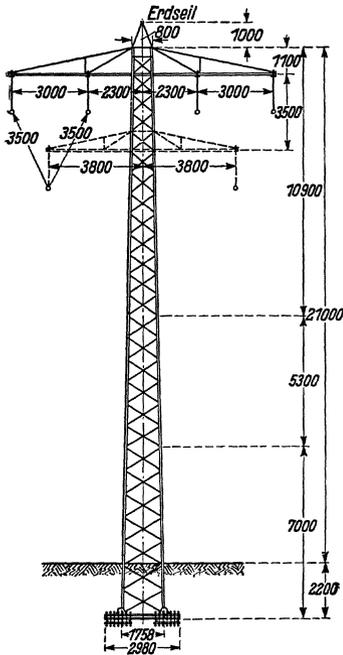


Abb. 409. Mast der 100-kV-Leitung.

die Doppelsammelschiene ohne Beeinträchtigung der Betriebsbeweglichkeit dann verzichtet werden konnte, wenn eine Einzelsammelschiene mit Blocktrennung zur Anwendung kam. Diese Blocktrennung mit einfachen Trennschaltern gestattet selbst bei Instandsetzungsarbeiten an den Sammelschienen einen ungestörten Betrieb; Schwierigkeiten oder betriebliche Nachteile haben sich bisher in keiner Weise gezeigt. Eine solche Ausführung wird auch bei anderen Anlagen dann der Untersuchung wert sein, wenn das Transformatorwerk als Durchgangsanlage in einer Ringverteilung mit nur einem Stromkreise liegt (S. 416). Zum Vergleich zeigen die Abb. I bis III auf Tafel VII Schnitt und Grundriß folgende Ausführungsformen:

- a) Hallenbau mit 100-kV-Einzelsammelschiene,
- b) Hallenbau mit 100-kV-Doppelsammelschienen,
- c) Kammerbau in der bisher üblichen Form mit 100-kV-Einzelsammelschienen.

Andere Durchbildungen — z. B. Freiluftanlage — wurden zwar untersucht, sind hier aber nicht aufgenommen, weil die später besonders beschriebenen Geländeverhältnisse nur die unter a) bis c) genannten Möglichkeiten praktisch zuließen.

Die besonders beachtlichen Daten über die Gebäudeabmessungen, den gesamten umbauten Raum, die Baueinheitspreise, die Gesamtanlagekosten für baulichen und elektrischen Teil in vH Vergleich, die Zahl der Stützer, Durchführungsisolatoren, bezogen auf die Ausführung nach a), sind in der Zahlentafel 32 zusammengestellt. Die Bauform nach a) steht an erster Stelle. Besonders beachtlich ist beim Vergleich zwischen Abb. I und III der Tafel VII bei letzterer die wesentlich ungünstigere Lage der Warte am Kopfende des Bedienungsganges und die unvergleichlich viel geringere Übersicht über den gesamten Einbau der Schalter, Meßwandler usw. Dieser Vergleich zeigt deutlich die betriebliche Überlegenheit des Hallen-

baues mit versenkten Schaltern, worüber noch eingehender gesprochen werden wird.

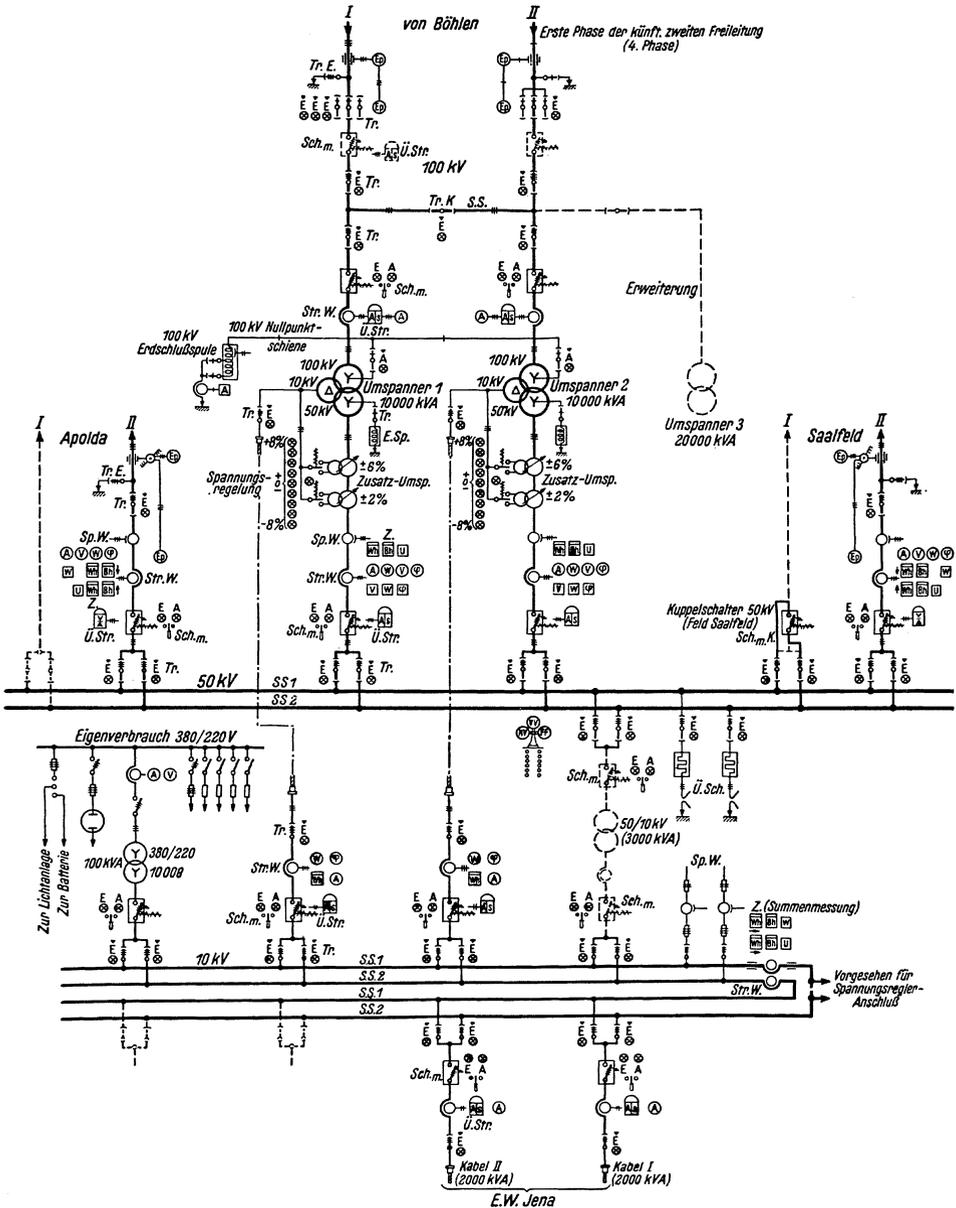


Abb. 410. Gesamtschaltbild.

E Ein-Lampen, grün, für Ölschalter, *A* Aus-Lampen, rot, für Ölschalter, *E* Ein-Lampen, weiß, für alle Freileitungs- und Kuppel trennschalter, *E* Ein-Lampen, gelb, für Sammelschienen trennschalter *S.S.*₁, *E* Ein-Lampen, blau, für Sammelschienen trennschalter *S.S.*₂.

Zahlentafel 32.

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Hallenbau 100-kV- Einfach- sammel- schienen	Hallenbau 100-kV- Doppel- sammel- schienen	Kammerbau 100-kV- Einfach- sammel- schienen
		I	II	III
1	Raumabmessungen { Länge . mm Breite . mm Höhe . mm ohne Obergeschoß	48 840	48 840	48 510
		24 720	29 320	29 000
		14 250	14 250	17 500
2	Umbauter Raum insge- samt { m ³ in vH	17 500 100	20 700 118,3	21 225 121,4
3	Einheitspreis für den m ³ umbau- ten Raum RM ¹	23,—	21,50	25,—
4	Kosten für den Bau ohne Wohnhaus { in vH	405 000 100	445 000 110	530 000 131
5	Kosten für den elektrischen Teil ohne Transformatoren { in vH	382 000 100	398 000 105	427 000 112
6	Gesamtkosten { RM ¹ in vH	787 000 100	843 000 107	957 000 122
7	Zahl der Stützer für 100 und 50 kV ohne Schaltgeräte . . .	109	133	133
8	Zahl der Durchführungen ohne Außendurchführungen für 100 und 50 kV	16	16	70
9	Zahl der Sammelschienen-Isolator- en für 100 kV	180	360	180

Um beim Vollausbau die Betriebsicherheit der Anlage einerseits und die Umschaltmöglichkeiten der Leitungen und Transformatoren andererseits noch zu erhöhen, ferner um insbesondere bei Beschädi-

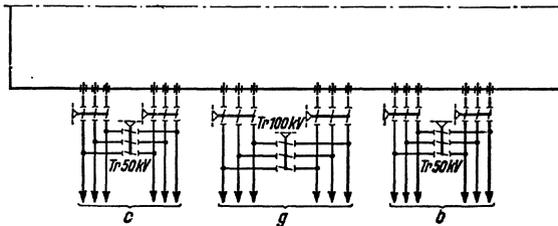


Abb. 411. Schaltbild für die Querschienen zwischen den 100- und 50-kV-Leitungen (späterer Ausbau).

b Freileitung A. 50 kV, c Freileitung S. 50 kV, g Freileitung B. 100 kV.

gungen der am meisten gefährdeten Gebäudeeinführungen schnelle und gefahrlose Auswechslung vornehmen zu können, ohne den Betrieb zu stören, ist der Einbau von sog. Querschienen in Aussicht genommen, wie sie in anderen Transformatorenwerken des Thüringenwerkes bereits vorhanden sind (Abb. 357 b). Die Abb. 411 bis 413 zeigen Schaltbild und praktische Ausführung dieser Querschienen für den vollen Ausbau. Es

¹ Preisbasis 1926 Dezember.

werden nur Trennschalter benutzt, von denen je einer vor den Gebäude-
einführungen und ein dritter als Kuppeltrennschalter angeordnet sind.

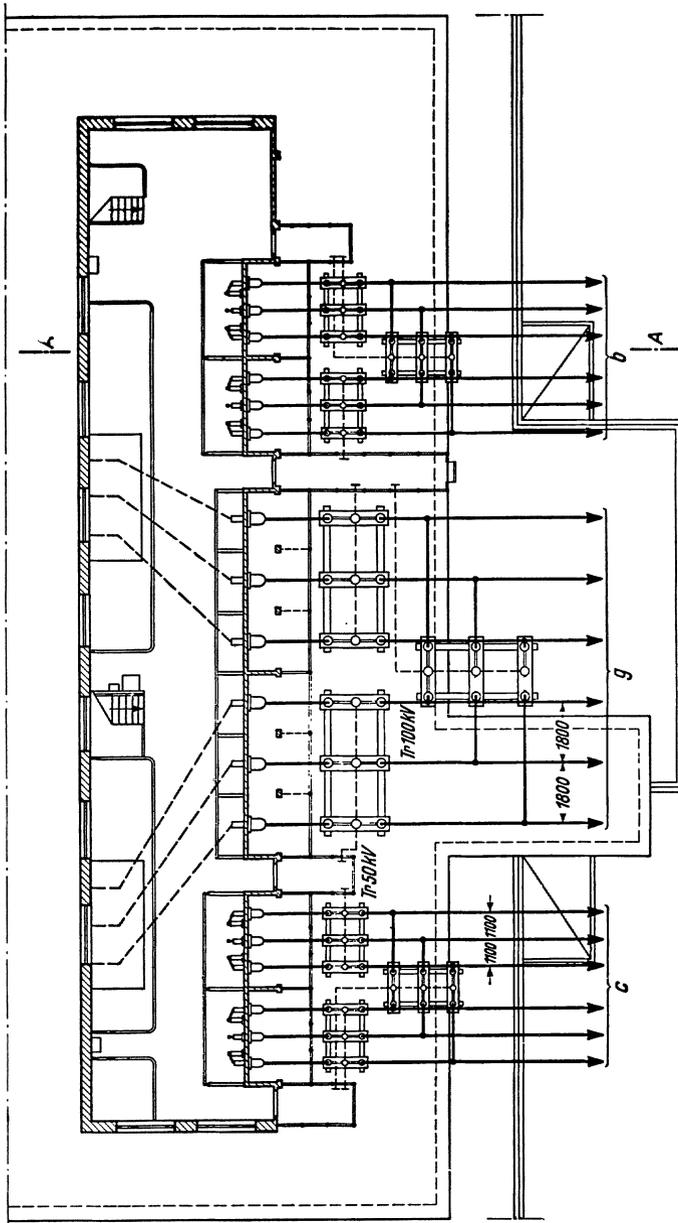


Abb. 412. Grundriß für Querschienenanbau zwischen den 100- und 50-kV-Leitungen.
b Freileitung A. 50 kV, c Freileitung S. 50 kV, g Freileitung B. 100 kV, Tr, Trennschalter.

Ihre Bedienung ist, auch wenn die Leitungen unter Spannung stehen,
gefahrlos möglich. Das vor den Leitungseinführungen liegende Dach des

Mittelbaues (Abb. 424) kann die Querschienen — gebaut in Freiluftausführung — aufnehmen. Der umbaute Raum des Werkes an sich wird um nichts vergrößert. Zweck und Schaltmöglichkeiten dieser Querschienen, die sich im Betriebe ebenfalls bereits bewährt haben, sind früher erläutert worden.

Im Zuge der 100-kV-Leitung liegen dann die zunächst noch nicht eingebauten Leitungs-Dreikessel-Ölschalter mit Durchführungsstromwandlern für die Relais und Meßgeräte und die Trennschalter für den Sammelschienenanschluß. Die 100-kV-Transformator-Ölschutzschalter sind ebenfalls mit Durchführungsstromwandlern versehen und elektrisch mit den entsprechenden 50-kV-Transformatorölschaltern so gekuppelt, daß beim Auslösen eines dieser beiden zu-

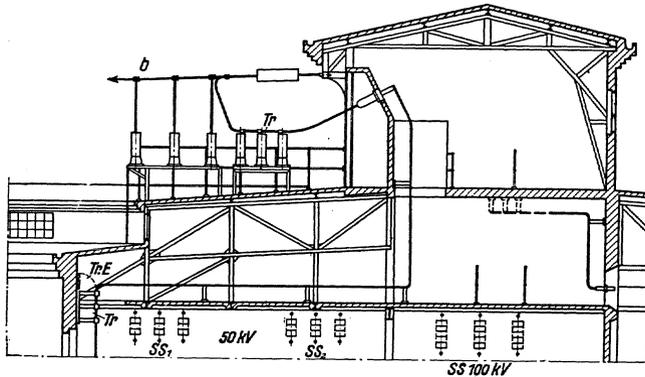


Abb. 413. Schnitt A—A für Querschienenausbau zwischen den 50-kV-Leitungen.
 b Freileitung A. 50 kV, Tr Trennschalter, Tr. E. Erdungsschalter, SS Sammelschienen 50 und 100 kV.

sammengehörigen Schalter auch der Gegenschalter herausgeworfen wird, damit bei Störungen im Transformator selbst oder beim Ausschalten desselben gleichzeitig beiderseitige Abschaltung erfolgt.

Die beiden zur Zeit aufgestellten Transformatoren sind auf der 100- und 50-kV-Seite in Stern geschaltet. Beide Nullpunkte sind herausgeführt, um alle Anschlußmöglichkeiten durchführen zu können. Unterspannungseitig sind Erdungsdrosselspulen, überspannungseitig ist ein umschaltbarer Erdschlußlöcher angeschlossen. Jeder Transformator besitzt eine dritte, in Dreieck geschaltete Wicklung, die für eine Leistung von 3000 kVA und eine Spannung von 10,8 kV bemessen worden ist. Aus dieser dritten Wicklung wird einmal die auf der 50 kV-Seite liegende Spannungsregelung, dann in Erfüllung der betreffenden Aufgabe das benachbarte Überlandwerk gespeist. Für das Zusammenschalten mit anderen Kraftwerken, die das Überlandwerk beliefern und mit in Stern geschalteten Transformatoren versehen sind, muß dann allerdings die Verschiebung der Spannungsvektoren um 30° berücksichtigt werden, sofern ober- und unterspannungseitiger Parallelbetrieb in Frage kommt.

Die 50-kV-Spannung wird den Doppelsammelschienen über Dreikesselölschalter und Trennschalter zugeführt. Die Meßwandler für die Relais, Zähler und Meßgeräte haben Ölfüllung erhalten.

Von den 50-kV-Doppelsammelschienen führen vier Verteilungsleitungen (zwei zunächst ausgebaut) ab, die mit Trennschaltern, Ölschaltern, Meßwandlern und Freileitungstrennschaltern mit verriegelten Erdungstrennschaltern, sowie Kondensatordurchführung für Spannungsmessung beim Antrieb und in der Warte entsprechend der 100-kV-Seite versehen sind.

An Meßgeräten, die durchweg schwarze Frontplatten erhalten haben, um jede Blendung zu vermeiden, wurden eingebaut: In der Halle:
für die 100- und 50-kV-Freileitungen: Spannungszeiger.

In der Warte auf dem Schaltpulte:

für die 100-kV-Leitung: 3 Spannungszeiger für die Phasenspannung, 1 solcher für die verkettete Spannung;

für die Transformatoren: 100-kV-Seite: 3 Stromzeiger, 50-kV-Seite: 1 Stromzeiger, 1 Leistungszeiger, 1 Spannungszeiger und 1 Leistungsfaktorzeiger, 10-kV-Seite: 1 Leistungszeiger, 1 Leistungsfaktorzeiger;

für die abgehenden 50-kV-Leitungen je: 3 Stromzeiger, 1 Spannungszeiger, 1 Leistungszeiger und 1 Leistungsfaktorenzeiger sowie 3 Phasenspannungszeiger;

für die 50-kV-Sammelschienen: 1 Parallelschaltvorrichtung mit Umschalter, abhängig von den Trennschalterstellungen;

für die 10-kV-Sammelschienen: je 1 Spannungszeiger;

für die 10-kV-Kabel: je 1 Stromzeiger.

In der Warte auf besonderen Schaltwänden:

für die 50-kV-Seite der Transformatoren: schreibende Geräte für Spannung, Leistung, Leistungsfaktor für Vor- und Nacheilung, Doppeltarifzähler für Wirk- und Blindstrom mit Höchstleistungsanzeiger und Umschaltuhr;

für die abgehenden Stromkreise je: 1 schreibendes Gerät für Leistung, eingeteilt für Lieferung und Bezug, je 1 Zählersatz für Lieferung und Bezug der gleichen Form wie für die Transformatoren;

für die 10-kV-Seite der Transformatoren: einfache kWh-Zähler.

Die 50-kV-Doppelsammelschienen haben einen Kuppelschalter erhalten. An Überspannungsschutzgeräten ist lediglich je 50-kV-Sammelschiene ein Fünfhörnerschutz mit selbsttätiger Widerstandszuschaltung vorhanden. Die 100-kV-Seite blieb ungeschützt. Nachteile haben sich bisher in keiner Weise gezeigt, obgleich, wie bereits gesagt, dieses Transformatorenwerk eine Kopfanlage ist und die bisherigen Betriebsjahre ganz besonders reich waren an häufigen, sehr starken und anhaltenden Gewittern im eigenen und den benachbarten Stromversorgungsgebieten.

Die dritten Wicklungen der 100-kV-Transformatoren sind über Trennschalter, Meßwandler und Ölschalter an die 10-kV-Doppelsammelschienen geführt, auf die noch ein 3000-kVA-Transformator für

die Speisung des Überlandgebietes arbeitet. Um ferner nicht jeden 10-kV-Abzweig mit Meßwandlern und Zählern zu versehen, haben die Sammelschienen sog. Zählschienen über Stromwandler und mit je einem Spannungswandlersatz erhalten, und die Zähler sind in Summenschaltung geschaltet. Der Gebährentarif nach Leistung und Arbeit mit der Abrechnung nach der Höhe der gleichzeitig in allen Abzweigen aufgetretenen Belastung läßt sich in dieser Weise ohne jede Umständlichkeit handhaben.

Schließlich ist noch ein kleiner 100-kV-Transformator für den Eigenbedarf und für kleinere Abzweige in der unmittelbaren Nähe des Werkes vorhanden, der auf 380/220 V übersetzt. Für die Steuerstromkreise und Meldeanlagen ist eine Akkumulatorenbatterie mit Gleichrichter eingebaut, von der auch der Strom für die Notbeleuchtung entnommen wird.

e) Die 100- und 50-kV-Ölschalter und ihre Antriebe. Abb. 414 zeigt einen betriebsmäßig eingebauten 100-kV-Ölschalter mit herabgelassenem Ölkessel in der Zelle des Untergeschosses. Die 50-kV-Schalter sind baulich nicht abweichend. Es sind Dreikesselschalter verwendet worden. Schutzwiderstände sind nur auf der 100-kV-Seite vorhanden. Irgendwelche Störungen infolge Fehlens von Schutzwiderständen oder durch diese sind nicht vorgekommen, obgleich auf beiden Seiten sehr viel geschaltet wird und die besonderen, bei den Überspannungsschutzgeräten bereits erwähnten Merkmale betrieblicher Art auch hier in vollem Umfange zu berücksichtigen sind. Die Durchbildung der Kontakte und der Schaltertraversen ist der Höhe der Nennspannung angepaßt. Die Schalter für 100 kV besitzen 6fache, die für 50 kV 4fache Unterbrechung. Die Schaltstücke für 100 kV sind zylindrisch und mit großen Strahlungskappen versehen, während für 50 kV keine Strahlungskappen erforderlich waren. Die feststehenden Schaltstücke sind mit auswechselbaren, stauchsicheren¹ Abbrennstücken ausgerüstet. Der Baustoff der Traverse ist bei 100-kV Hartpapier, bei 50-kV imprägniertes Hartholz. Die Traversen werden durch Isolierzugstangen bewegt und gleiten zwischen Isolierführungsrohren auf und ab.

Die Schaltzeiten sind für das Ein- und Ausschalten verschieden. Bezeichnet t_1 die Zeit des Gleitens in den Schaltstücken, t_2 die Zeit für die Bewegung außerhalb der Schaltstücke, so ist für „Einschalten“ $t_1 < 0,05$, $t_2 < 0,4$ sec, für „Ausschalten“ $t_1 < 0,1$, $t_2 < 0,25$ sec.

Die Schalterdeckel sind aus Stahlguß gefertigt und fest mit dem Fußboden verschraubt. Die Ölkessel mit ihren Befestigungen sind derart berechnet, daß bei einer Ölexplosion der Kessel abgedrückt wird. Jede Gefährdung der Halle ist als ausgeschlossen anzusehen. Ölgase und Dämpfe treten durch besondere Auspufföffnungen in das Kellergeschloß. Lange Ölauspuffrohre sind vermieden worden. Eine Membrane schützt das Schalteröl vor zu großer Feuchtigkeitsaufnahme aus der umgebenden Luft.

¹ Stauchsicher soll bezeichnen, daß die Federung des Abbrennstückes beim Einschalten von Kräften in Richtung der Schaltbewegung entlastet ist.

Die Schalterdeckel können mittels eingeschraubter Ösen gehoben werden. Das ist aber für Besichtigungs- und Instandsetzungszwecke nicht erforderlich. Es werden vielmehr mit Benutzung besonderer Wagen die Schalterkessel abgesenkt (Abb. 414). Für die 50-kV-Schalterkessel hat dieser Wagen Handantrieb (Abb. 430), für die 100-kV-Kessel motorischen Antrieb erhalten. Beide Wagen haben sich gut bewährt. Sie werden häufig benutzt. In den Kellergeschoßschaltergän-

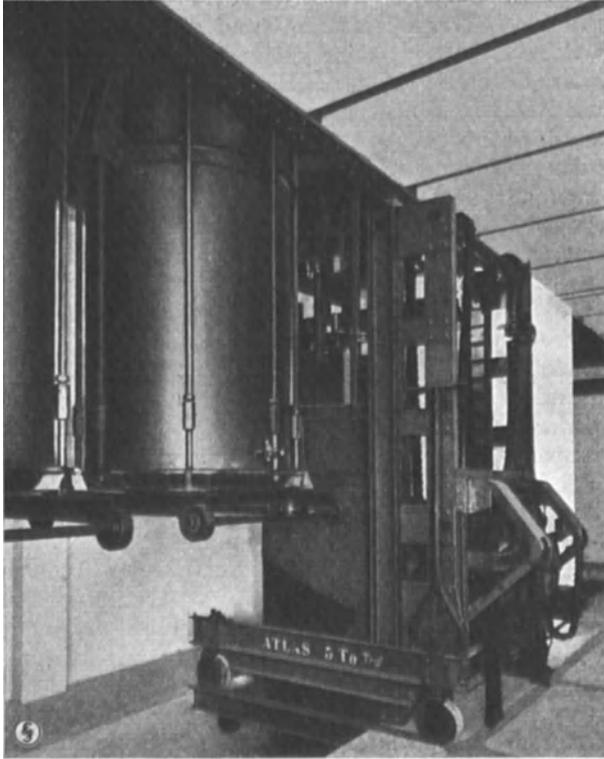


Abb. 414. 100-kV-Ölschalter mit abgesenktem Ölkessel im Kellergeschoß.

gen (Abb. 430) sind sie auf Flachschiene fahrbar. Umstellbare Rollen gestatten eine Fahrtrichtungsänderung um 90°. Die Besichtigung ist dadurch außerordentlich einfach und schnell möglich. So ist z. B. ein 100-kV-Ölkessel in etwa 10 Minuten abgesenkt. Das Bewegen des ganzen Schalters, wie z. B. in den Kammeranlagen, ist vermieden (vgl. hierzu auch Abb. III auf Tafel VII). Leitungsabklemmungen, Antriebsabbau u. dgl. sind nicht erforderlich.

Jeder Ölkessel hat Ölprobierhahn, Ablaufhahn und Ölstandszeiger erhalten. Die Durchführungen sind bei den 100-kV-Schaltern aus Raum- und Geldersparnisgründen gleichzeitig als kurzschlußsicherer Ring-

stromwandler ausgebildet. Wenn anfänglich auch Bedenken bestanden, ob diese Wandler im Hinblick auf die Erschütterungen beim Schalten betriebsicher genug sein würden, so sind bisher Störungen nicht vorgekommen und die Bedenken somit zerstreut.

Der Antrieb erfolgt unter Zwischenschalten einer starren Kuppung durch einen Elektromagneten, der von der Akkumulatorenbatterie mit 220 V gespeist wird. Er arbeitet außerordentlich sicher und in weiten Grenzen unabhängig von dem jeweiligen Ladezustande der Batterie. Die Steuerung erfolgt von der Warte. Vom Hauptbedienungsgeange kann jeder Schalter zudem von Hand ein- und ausgeschaltet werden. Bei den 100-kV-Schutzschaltern ist ein Stehenbleiben auf der Vorstufe oder in einer Zwischenstellung nicht möglich.

Der ganze Antrieb ist mit einem Blechgehäuse umgeben, das im Unterteil eine entfernbar Klappe erhalten hat, hinter welcher die Sicherungen für den Schaltmagneten angeordnet sind, so daß die Auswechslung von Patronen leicht und ohne das Gehäuse zu entfernen vorgenommen werden kann. In Abb. 427 sind die Schalterantriebe im Hauptbedienungsgeange zu sehen. Abb. 415 zeigt einen 50-kV-Schalterantrieb ohne Schutzhaube mit darüber befindlichem, aufgeklapptem Siemens-Westinghouse-Wahlschutz, die Mauernische mit den Klemmleisten für die Steuer- und Meldeleitungen und den Antriebsrosetten mit Meldelampen für die Trennschalter zu den Sammelschienen. Die „Aus“- und „Ein“-Lampen der Steuerschalter sind hier bei jedem Antriebe wiederholt und für den ganzen Bedienungsgeange zentral aus- und einschaltbar, so daß der auf dem Rundgeange befindliche Schaltwärter sich jederzeit auch hier von der Stellung der Ölschalter und Trennschalter unterrichten kann.

Die 100-kV-Ölschalter werden durch unabhängige Höchststrom-Zeitrelais in allen Phasen, die 50-kV-Ölschalter der abgehenden Fernleitungen durch den Siemens-Westinghouse-Wahlschutz gesteuert. Mit letzterem sind sehr umfangreiche Kurzschluß- und Erdschlußversuche bei voll im Betriebe befindlichen Netze und parallel arbeitenden Kraftwerken gemacht worden¹. Bisher hat dieser neue Wahlschutz anstandslos und richtig gearbeitet².

f) Die Trennschalter mit ihren Antrieben. Für beide Spannungen sind Drehtrennschalter dreipolig gekuppelt benutzt worden, deren Antriebe auf den Seitenwänden des Hauptbedienungsgeanges liegen (Abb. 415). Die Stellung der Trennschalter wird durch farbige Glühlampen auf dem Schaltpulte der Warte gemeldet. Parallel dazu liegen die bereits erwähnten zweiten Meldelampen bei den Antrieben selbst.

Die Trennmesser sind hellrot mit weißem Mittelring gestrichen und lassen dadurch von allen Stellen der Halle und auch von der Warte ihre jeweilige Stellung noch besonders deutlich erkennen.

¹ Vgl. Bauch, R.: Neuerungen im Anschluß von Impedanz- und Richtungsrelais. S.-Z. 1929, H. 1, S. 16.

Vom Verfasser: Versuche mit dem Siemens-Westinghouse-Impedanzrelais im Thüringenwerks-Netz: S.-Z. 1929, H. 10, S. 595.

² Der Schutz wird ausführlich im IV. Bande behandelt.

Die 50-kV-Trennschalter sind zu beiden Seiten eines hochgelegten, in Eisen hergestellten Bedienungsganges (Abb. 429) angeordnet. Dieser Bedienungsgang, belegt mit Tezettrost, ist 1,5 m breit und beiderseits mit hohen Gittern eingerahmt, die für jeden Trennschalter eine nach innen aufklappbare Gittertüre besitzen. Fußlampen erhellen den Gang; mehrere Steckdosen lassen die bequeme Benutzung

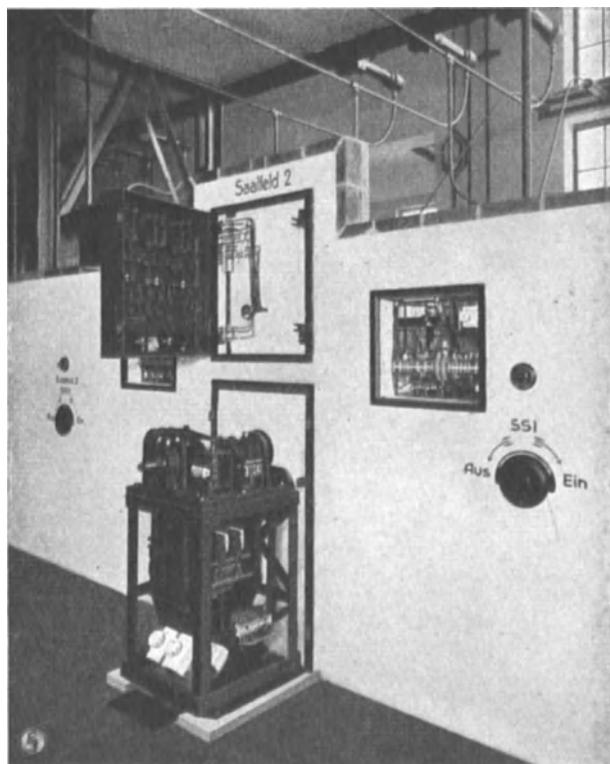


Abb. 415. 50-kV-Ölschalterantrieb (Blechhaube abgenommen), Siemens-Westinghouse-Schutz darüber aufgeklappt, Klemmenleistennische, Trennschalterantrieb mit Stellungslampen.

von Arbeitslampen zu. Die Reinigung, Beaufsichtigung und Instandsetzung der einzelnen Trennschalter von diesem Gange aus ist besonders einfach und gefahrlos. Die beiden für die Doppelsammelschiene zusammengehörenden Trennschalter eines Anschlusses liegen gegenüber.

Die große Zahl von Meldeleitungen, verlegt als vieladrige Kabel, die die Trennschalterstellung neben den bereits erwähnten Stellen überall dort anzeigen, wo mit Rücksicht auf die Bedienung irgendeines Anlagenteiles jede Gefährdung ausgeschlossen sein muß, sind an den einzelnen Antrieben über Klemmenleisten geführt, die in den Seitenwänden des Hauptbedienungsganges in eisernen Kästen eingemauert sind (Abb. 415). Auf der Rückseite sind die Kästen vollständig offen, so

daß immer Luft durchstreichen kann. Nach dem Gange zu sind sie mit Verschußdeckeln abgeschlossen.

Über die 100-kV-Leitungseinführungstrennschalter für die vier Phasen (Abb. 426) ist bereits gesprochen worden, desgleichen über die an diesen und an den 50-kV-Leitungstrennschaltern angebauten und

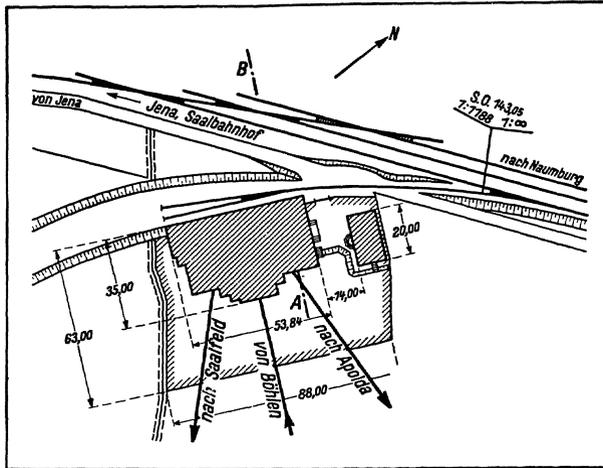


Abb. 416. Lageplan.

verriegelten Erdungsschalter. Die Antriebe dieser Leitungstrennschalter liegen ebenfalls in der Halle, jedoch stets unter den Trennschaltern selbst. Die Antriebe der Erdungstrennschalter sind vollständig rot ge-

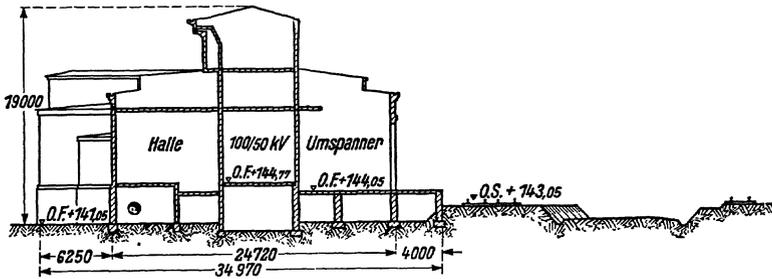


Abb. 417. Anlagenschnitt A—B nach dem Lageplan.

strichen und zudem besonders beschriftet, so daß irgendwelche Verwechslungen nicht vorkommen können.

g) Die Meßwandler. Auf der 100-kV-Seite sind nur die Stromwandler in den Schalterdurchführungen vorhanden.

Auf der 50-kV-Seite sind Strom- und Spannungswandler wiederum in versenkbarer Bauform gleich den Ölschaltern eingebaut. Die Spannungswandler haben oberspannungseitig keine Sicherungen erhalten. Die Ölkessel der Stromwandler sind mit Ausdehnungsgefäßen versehen.

Aus Abb. 429 ist erkennbar, wie ein 50-kV-Schalterfeld in der Halle durchgebildet worden ist.

h) Der bauliche Teil und der elektrische Aufbau. Die aus dem Werke B. kommende Fernleitung läuft in südwestlicher Richtung auf die Stadt Jena zu (Abb. 416). Diese günstigste Leitungsführung und das Gelände

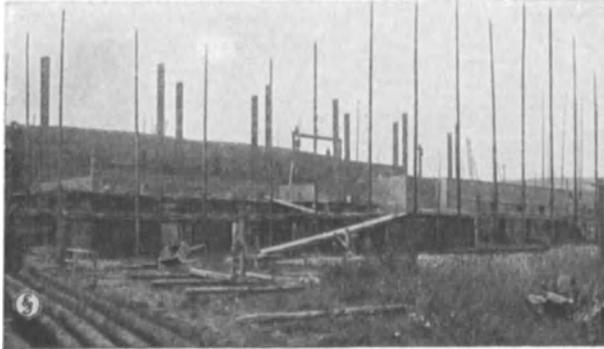


Abb. 418. Bauzustand sechs Wochen nach Baubeginn.

in der unmittelbaren Nähe der Reichsbahn, das bereits einen geschütteten Damm für ein späteres Anschlußgleis in das Industriegelände aufwies, legten den Bauplatz für das Transformatorenwerk fest. Die Schienenoberkante liegt 2 m über dem Planum des Bauplatzes, das bei Kata-

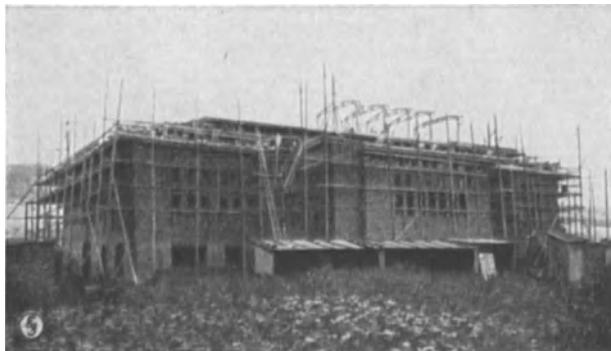


Abb. 419. Bauzustand zwölf Wochen nach Baubeginn.

strophenhochwasser von dem benachbarten Flusse überflutet werden könnte. Diese Baubedingungen bestimmten zwangsläufig die Höhe des Fußbodens für die Transformatoren unter Berücksichtigung leichtester Ablademöglichkeit vom Tiefgangswagen zu 3 m über Gelände (Abb. 417). Dadurch fiel ein Kellergeschoß an, das auszunutzen war. Schaltgeräte konnten aber mit Rücksicht auf die Hochwassergefahr hier nicht untergebracht werden. Leichte Bedienung und Beaufsichtigung des ganzen

Werkes forderten weiter, daß jedenfalls im Erdgeschoß zwischen Transformator- und Schalthaus Treppen zu vermeiden waren. Die beste bauliche und betriebstechnische Lösung verlangte daher zwangsläufig die Wahl von Ölschalterbauformen für versenkten Einbau. Mit letzterem ergab sich von selbst schließlich der Hallenbau für die Geräteanlage.



Abb. 420. Blick auf die Südwestseite mit Wohnhaus.

Mit dieser kurzen Skizze ist der Grundgedanke für die gesamte bauliche Durchbildung des Transformatorenwerkes im wesentlichen umrissen. Die betriebstechnischen Vorteile des Hallenbaues mit versenktem Geräteeinbau konnten somit voll ausgenutzt werden. Ganz allgemein



Abb. 421. Blick auf die Nordwestseite.

ist in der gesamten Leitungsführung weiter der Grundsatz durchgeführt worden: keine Gittertrennwände, keine Deckendurchführungen, möglichste Beschränkung in der Zahl von Stützen u. dgl., also einfacher Aufbau in allen Teilen. Die Übersicht über die Halle ist vorzüglich, die Bedienung und Beobachtung nach jeder Richtung von der Warte und allen sonstigen Besichtigungsstellen aus außerordentlich einfach und sicher,

was aus den folgenden Erläuterungen noch besonders zu erkennen sein wird. Auch die Prüfgänge für die Bedienung sind kurz und einfach gehalten.

Das Gebäude selbst besteht aus einem vollständigen Eisengerippe nach der Bauart großer Hallen, das mit Mauersteinen ausgefüllt ist.

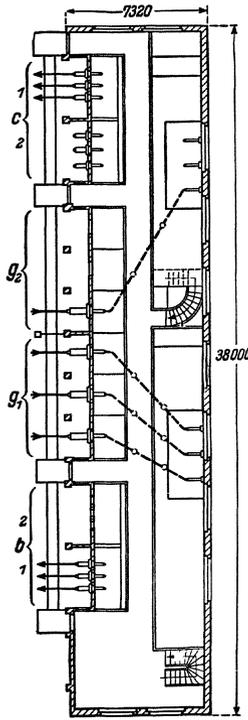


Abb. 422. Obergeschoß mit ankommenden und abgehenden Leitungen. Grundriß III—III.

b_1 Freileitung I, A., b_2 Freileitung II, A., c_1 Freileitung I, S., c_2 Freileitung II, S., d Transformator I, e Transformator II, f Transformator III, Reserve, g_1 Freileitung I, B., g_2 Freileitung II, B., h_1 u. h_2 Kühlanlage für Transformator I und II, h_3 Kühlanlage für Transformator III, Reserve, k 10-kV-Transformator, s Besichtigungsbühne.

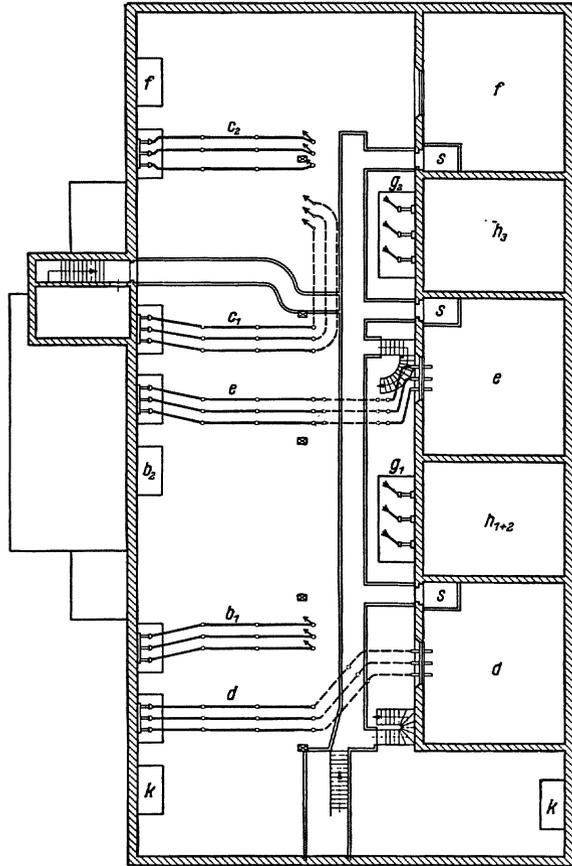


Abb. 423. Zwischengeschoß. Grundriß II—II.

b_1 Freileitung I, A., b_2 Freileitung II, A., c_1 Freileitung I, S., c_2 Freileitung II, S., d Transformator I, e Transformator II, f Transformator III, Reserve, g_1 Freileitung I, B., g_2 Freileitung II, B., h_1 u. h_2 Kühlanlage für Transformator I und II, h_3 Kühlanlage für Transformator III, Reserve, k 10-kV-Transformator, s Besichtigungsbühne.

Der Bau konnte dadurch außerordentlich schnell hochgebracht werden. Die Abb. 418 und 419 zeigen zwei Bauabschnitte innerhalb eines Zeitunterschiedes von etwa sechs Wochen. Unter Zwischenschaltung einer Luftisolierschicht in den Umfassungsmauern zur besseren Beherrschung der Raumlüftung wurde die Außenseite mit Klinkern in dunkelroter

ungleichmäßiger Färbung verkleidet. Die architektonische Außenwirkung ist vorzüglich, zumal bei der Fassadendurchbildung in Größe, Lage und Abmessungen der Fenster, Gesimse u. dgl. darauf geachtet wurde, daß die Bestimmung des Baues als 100-kV-Transformatorwerk in ruhigen und wuchtigen, aber einfachen Linien besonders zum Ausdruck kam. Selbst die schwierige Eingliederung der hohen Transformator-kammern mit ihren eisernen Toren ist in der Lösung als glücklich zu bezeichnen. Abb. 420 zeigt einen Blick auf die Südwestseite, Abb. 421 einen solchen auf die Nordwestseite.

Bei der allgemeinen Innenraumdurchbildung wurde wiederum größter Wert darauf gelegt, daß die mit der Halle verbundenen Vorteile



Abb. 424. Obergeschoß (Außenseite).
b nach A. 50 kV, *g* von B. 100 kV, *c* nach S. 50 kV.

bester Übersicht auch für alle anderen Räume nach Möglichkeit erreicht wurden. Abb. I auf Tafel VII zusammen mit Abb. 422 und 423 lassen die nach dieser Richtung gefundene Lösung erkennen. Das Transformatorwerk ist von zwei Stellen aus betretbar und zwar von dem Haupteingange und vom Untergeschoß. Der Hauptbau gliedert sich von den ankommenden Leitungen aus betrachtet in:

- das Obergeschoß,
- das Zwischengeschoß,
- die Halle,
- das Untergeschoß.

Angebaut nach der Nordwestseite sind die Transformator-kammern, nach der Südostseite in der Mitte die Warte mit Räumen zu beiden Seiten für den Überspannungsschutz und einseitiger Zwischenschaltung der Haupttreppe.

Das Obergeschoß umfaßt die Einführungen der ankommenden 100-kV- und abgehenden 50-kV-Leitungen (Abb. 424) und ist bemessen jedesmal für Doppelleitungen beider Spannungen, insgesamt für sechs Stromkreise.

Die Längsaußenmauer auf der Leitungsseite ist in Nischen ausgeführt und durch Querwände so unterteilt, daß jeder Stromkreis augenfällig abgetrennt ist, um dadurch die Sicherheit bei Instandsetzungsarbeiten an den Abspannungen und Durchführungen zu erhöhen. Jede dieser Nischen ist seitlich von einer eisernen Türe aus zugänglich. Hohe, engsprössige Gittereinfriedigungen ohne Türen verhindern das freie Betreten des Daches. Die Türen hier und in allen anderen Gittereinfriedi-



Abb. 425. Obergeschoß (Innenansicht).

gungen wurden absichtlich fortgelassen, um zu erreichen, daß beim Betreten des Daches bzw. des eingefriedigten Raumes durch unbequemes Überklettern der Gittereinzäunung die Bedienung sinnfällig an die Gefahrlichkeit des Betretens von Anlagenteilen unter Spannung erinnert wird. Zufällig offengebliebene Gittertüren sind leider schon wiederholt die Ursache von Gefährdungen der Bedienung geworden. Um bei Unwettern die Außenteile jederzeit aus nächster Nähe mit Blick und Gehör beobachten zu können, sind die Nischenwände innen mit beiderseitigen Fenstern versehen worden. Haken für das Einhängen eines Flaschenzuges zum leichteren und schnellen Auswechseln von Durchführungen hat jede Nische erhalten.

Im Innenraum des Obergeschosses (Abb. 425) befinden sich unterhalb der Durchführungen die Isolierwandler für die Kondensatormessung und weiter die Sperrdrosseln mit den Kondensatoren der Hochfrequenz-

Fernsprechanlage auf der 50- und 100-kV-Leitung. — In der Mitte dieses Raumes und an der Seite des Hallenhaupteinganges liegen eiserne Wendeltreppen, die zum Zwischenstock führen und so breit gehalten sind, daß auf ihnen die Bewegung der sperrigen und schweren Durchführungen möglich ist. Je eine dieser Durchführungen steht immer in sofortiger Bereitschaft im Obergeschoß.

Das Zwischengeschoß (Abb. 426) konnte in einfachster Weise aus der Gesamthöhe der Transformatorkammern zur Hallenhöhe gewonnen werden. Es enthält die Leitungsführung der gesamten Hochspannungs-

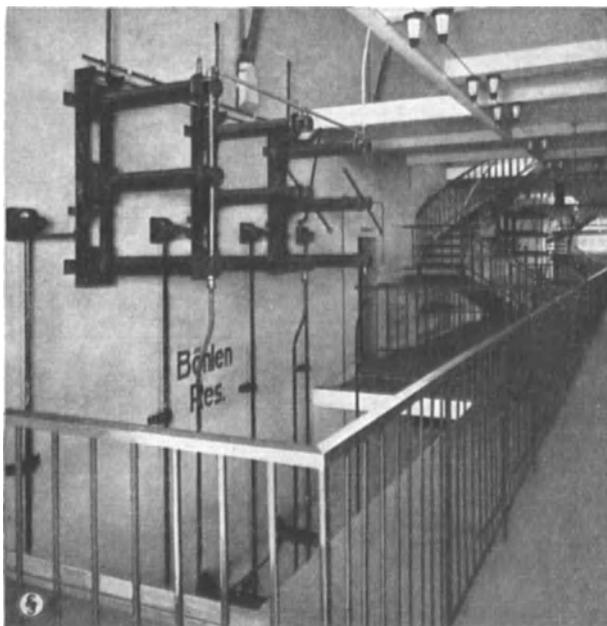


Abb. 426. Zwischengeschoß (im Vordergrund die drei Trennschalter der 4. Phase).

anlage zwischen Transformatorkammern und Geräteanlage und zudem die Zugänge zu Besichtigungsbühnen in den Transformatorkammern. In Abb. 426 sind auch die beiden 100-kV-Freileitungstrennschalter zu sehen, im Vordergrund derjenige für die 4. Phase, der gerade eingeschaltet ist.

Besonders beachtlich tritt hier ein weiterer Vorteil der Hallenbauweise in die Erscheinung darin, daß keine Mauer- oder Deckendurchführungen vom Obergeschoß nach dem Zwischengeschoß und weiter nach der Halle erforderlich sind. Große Deckendurchbrüche vermitteln Sicht und Verständigung von der Halle bis zum Obergeschoß. Lediglich Durchführungen nach den Transformatorkammern sind vorhanden.

Die Halle. Vom Zwischengeschoß führt an der Südostseite die eiserne Treppe weiter zur Halle. Die Hauptgebäudetreppe endet im

Zwischengeschoß. Über erstere gelangt man auf eine breite Zwischenbühne, unter welcher sich der Haupteingang abgeschlossen nach der Halle durch einen Glasverschluß befindet. Von dieser Zwischenbühne ist die Halle in allen ihren Teilen vollständig zu übersehen (Abb. 427 bis 429 im Hintergrund). An diese Bühne schließen sich das begehbare Trennschaltergerüst der 50-kV-Anlage und der Niedergang zur Halle an. Die Durchbildung der Halle in allen Einzelheiten zeigen die Abb. 427 bis 429. Weitere bauliche Einzelheiten hierzu zu geben erübrigt sich, da zu den photographischen Aufnahmen Abb. I auf Tafel VII, ferner

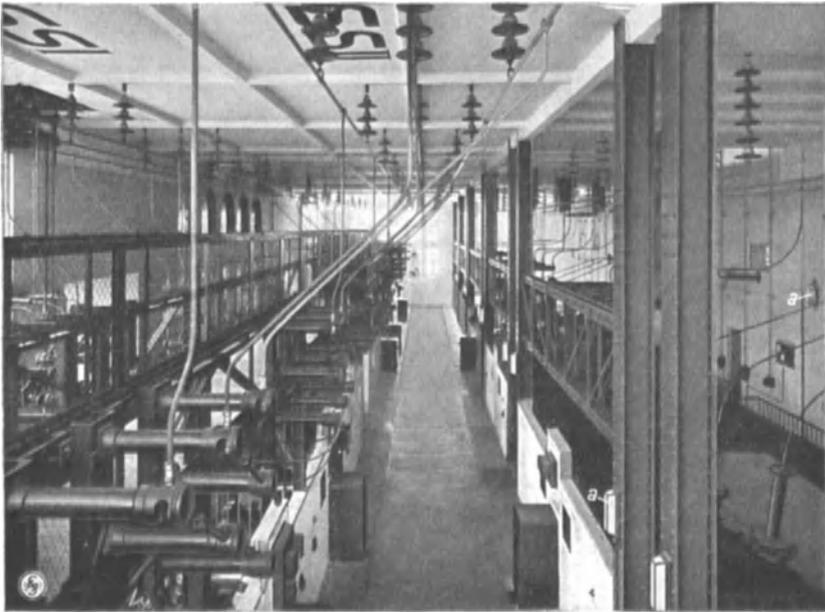


Abb. 427. Hauptbedienungsang in der Halle (links 50 kV, rechts 100 kV).
a Beleuchtung.

Abb. 422 und 423 als Schnittzeichnungen noch beigegeben sind, die technische Einzelheiten enthalten. Durch Gitter abgetrennt werden die Schaltgeräte für jeden Stromkreis besonders kenntlich gemacht. Von der Zwischenbühne gelangt man auch zum 10-kV-Sammelschienenraum.

Der Hauptbedienungsang wird durch zwei halbhochgezogene Mauern vor den Schaltgerätekammern gebildet. Im Fußboden liegt der Kabelkanal für alle Steuer- und Meldeleitungen durch Riffelblechplatten abgedeckt und mit Linoleum belegt. Auch die anderen Gänge haben gleichen Bodenbelag erhalten.

Wie aus Abb. 427 weiter ersichtlich, ist die 100- und die 50-kV-Anlage bis in alle Einzelheiten klar voneinander getrennt. Verschachtelungen, Leitungsquerführungen, Gittertrennwände und ähn-

liches sind nicht vorhanden, so daß auch durch diese Übersichtlichkeit Fehlschaltungen namentlich beim Bedienen von Trennschaltern sicher vorgebeugt wird. Eine sehr reichliche und ausführlich gehaltene Beschriftung an allen für die Bedienung in Frage kommenden Stellen ist angebracht worden.

Von der Halle aus führen Zugänge nach den Kammern der Kühlanlagen, nach der Warte, nach dem 10-kV-Ölschalterraum und nach dem Haupttreppenhaus.

Das Kellergeschoß ist nach drei Seiten offen. Einen Blick in eine 50-kV-Kammer mit den hängenden Ölgefäßen der Schalter und

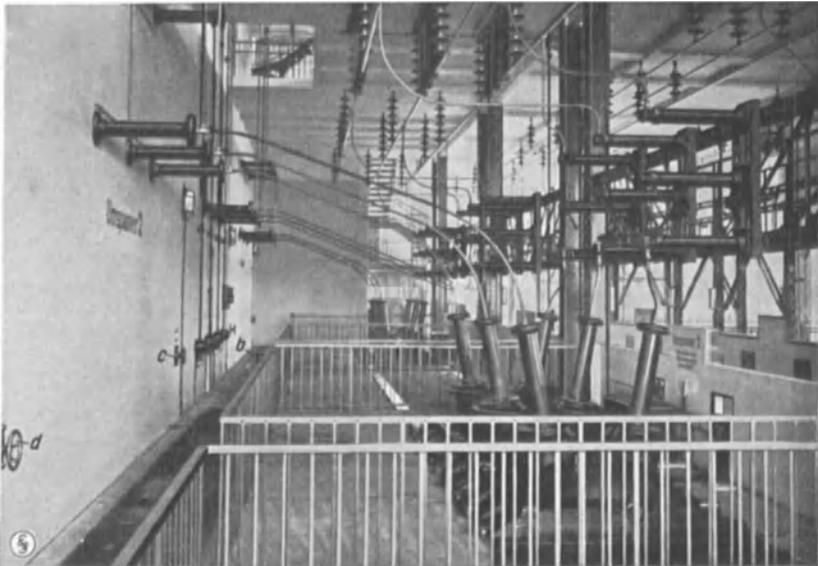


Abb. 428. 100-kV-Seite der Halle.
b Warnlampe, *c* Ölabbfluß, *d* Ölzuluß.

Wandler und dem kleinen Bedienungswagen zeigt Abb. 430. Ein fahrbarer kleiner Kran an der Westseite gestattet das Heben der Ölschalter auf die Rampe (Abb. 421).

Die Warte. Die Warte zeigt Abb. 431. Sie ist derart angelegt, daß von ihr die ganze Halle klar überblickt werden kann. In ihr sind untergebracht das Steuerpult für die 100/50/10-kV-Hauptanlage mit Leuchtschaltbild, die in zwei Teile unterteilte Meßgerätewand für die Zähler und schreibenden Meßgeräte, die auf den Querwänden die Schaltgeräte für die Eigenanlage erhalten hat. In der Mitte der Warte steht der Schreibtisch des Schaltwärters, in den alle Fernsprecher mit Umschalter eingebaut worden sind, um die Pultplatte frei zu bekommen. An Fernsprechern sind vorhanden: ein Postapparat, ein Drahtfernsprecher des Betriebstelephons und zwei Fernsprecher für Hochfrequenz mit Umschaltegerät.

Besonders zu erwähnen sind zwei leuchtende Anzeigetafeln für Fernsprecher, Buchholz-Schütze u. dgl., die dem auf dem Prüf gange befindlichen, durch eine Hupe herbeigerufenen Schaltwärter sofort zeigen, von welcher Stelle Anruf oder Alarmierung erfolgte. Die Glocke ist fort tönend und muß erst in der Warte vom Schaltwärter abgestellt werden.

Über der Warte erreichbar durch die Haupttreppe liegen Nebenräume für die Batterie, den Ladegleichrichter und ein Betriebszimmer. Der zu diesen Räumen führende Gang ist mit Fenstern versehen, so



Abb. 429. 50-kV-Seite der Halle.
a Beleuchtung, b Warnlampe.

daß auch von dieser Stelle wiederum die ganze Halle mit Bedienungsgang und Meldelampen frei übersehen werden kann.

Die Warte wird elektrisch geheizt. Alle anderen Räume sind ungeheizt.

Von den Kühlkammern kann warme Luft durch verschließbare Klappen in die Halle geleitet werden. Die Luftisolierschicht im Umfassungsmauerwerk gibt dem Gebäudehauptteil eine gute, durch den Schaltwärter leicht herbeizuführende Temperaturregelung. Trotzdem ist es erforderlich, bei starken plötzlichen Temperaturstürzen auf die Schwitzwasserbildung zu achten, um die Hartpapierstürzen und Durchführungen zu schützen. Zwei Schornsteine sind der Vollständigkeit wegen noch vorgesehen, um die Halle notfalls auch besonders heizen zu können.

Die Beherrschung solcher Schwitzwasserbildung erfolgt nur durch sofortiges kräftiges Durchlüften des Gesamtgebäudes, was infolge der Deckendurchbrüche wirksam möglich ist. Das Schaltpersonal ist zudem genau angewiesen, entsprechend der jeweiligen Windrichtung das richtige Öffnen der Fenster vorzunehmen. Kippflügel erleichtern diese Betriebsmaßnahme. Wo erforderlich, sind auch noch Drahtgitter für geöffnete Fenster vorgesehen, um das Hereinfliegen von Vögeln zu verhindern.

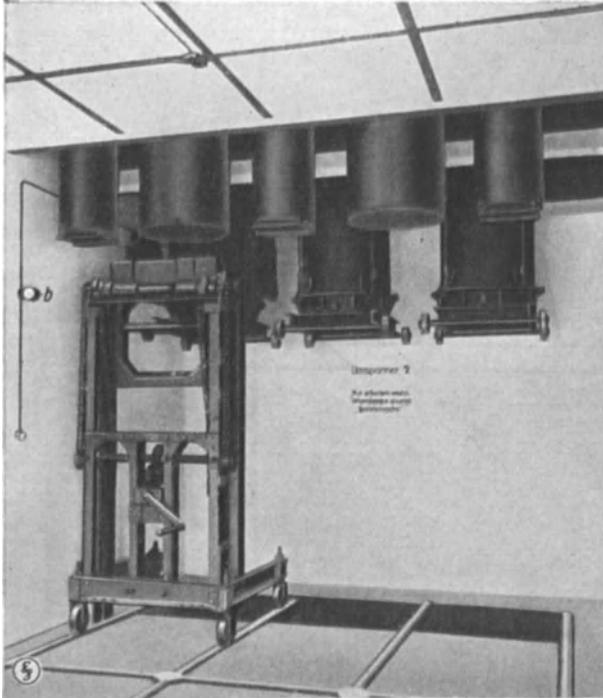


Abb. 430. Kellergeschoß, 50-kV-Seite mit Ölkesselbedienungswagen.
b Warnlampe.

Ganz besonderer Wert wurde auf eine der Raumgestaltung von Halle und Warte angepaßten Beleuchtung gelegt. Es mag erwähnt sein, daß hierzu außerordentlich viele Probebeleuchtungen, namentlich für den Hallenhauptgang, vorangingen, ehe die beste Form der Beleuchtungskörper und ihrer Unterbringung gefunden war. Aus Abb. 427 bis 429 geht die getroffene Wahl hervor. Durch zweckentsprechende Stromkreisunterteilung der Hallenbeleuchtung ist allen nach dieser Richtung technisch zu stellenden Anforderungen entsprochen. Auch die Meldeanlage für die Schalterstellungen, die sich im Hallenhauptgange befindet, ist an der Haupteingangsseite aus- und einschaltbar.

Die Beleuchtung in der Warte liegt an einem selbsttätigen Umschalter und wird für gewöhnlich vom Eigenbedarfstransformator gespeist. Im Störfalle schaltet dieser Schalter selbsttätig um, so daß die Warte immer Licht hat und die Bedienung in voller Ruhe Schaltungen und sonstige Handlungen vornehmen kann.

i) Die Transformatoren, ihre Regelung und ihr Einbau. Es sind zunächst zwei Transformatoren aufgestellt, die, wie bereits kurz erwähnt, als Dreiwicklungstransformatoren gebaut sind. Die Aufgaben für die dritte Wicklung sind: Dämpfung der dritten Harmonischen im Transformator, dadurch Verminderung von Verlusten, Lieferung



Abb. 431. Warte mit Schaltpult und Meßgerätafeln.
f Spannungsregelung.

der Regelspannung für die Spannungsregler, Leistungsabgabe für die Versorgungsgebiete des Überlandwerkes und für den Eigenbedarf des Werkes.

Die Ausführung ist folgendermaßen gewählt:

Leistung: 10000 kVA insgesamt, davon bis zu 3000 kVA aus der dritten Wicklung unter entsprechender Verminderung der Leistungsabgabe auf der 50-kV-Seite;

Leerlaufübersetzung: 105/55/10,8 kV;

Frequenz: 50;

Schaltgruppe: 105/55 kV Stern-Stern, A_2 , mit herausgeführten Nullpunkte auf der Ober- und Unterspannungsseite; 105/10,8 kV Stern-Dreieck, D_2 ;

Kurzschlußspannung: bei unbelasteter 10-kV-Seite $e_K = 10 \text{ vH}$, bei unbelasteter 50-kV-Seite $e_K = 7,4 \text{ vH}$;

Spannungsabfall: 105/55 kV bei $\frac{1}{1}$ Last und $\cos \varphi = 1$ —1,70 vH;

Wicklungsverstärkung an je 5 vH der Gesamtwindungszahl der Ober- und Unterspannungswicklungen am Eingange und am Nullpunkte für 105 kV Prüfspannung bei 5 sec Prüfdauer;

Größte Eisensättigung: an engster Stelle 13000 Linien/cm bei $105 + 5 \text{ vH} = 110 \text{ kV}$;

Ölkühlung: durch außerhalb liegende Preßluftkühlung; sämtliche Anschlußklemmen der 100- und 50-kV-Seite mit Strahlungskappen;

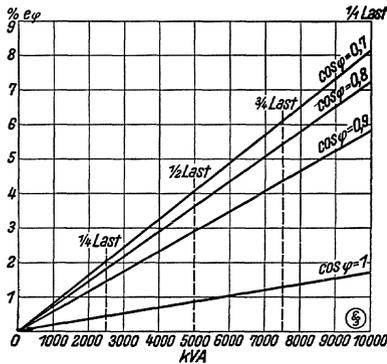


Abb. 432. Kennlinien der Spannungsänderung e_φ der 10000-kVA-Transformatoren bei verschiedenem Leistungsfaktor.

Bauart: Kurzschlußsicher;

Kesselausrüstung: mit Rollen,

ferner mit Entlüftungsflansch, Ölauffüllschraube, Tauchrohr mit Fernthermometer, Gefahrmelder, Ölablaßhahn für Prüfzwecke, Ölentleerungsventil, Ventile mit Antrieb für den Ölz- und -abfluß.

Den Verlauf der Spannungsänderung bei verschiedenem Leistungsfaktor und unbelasteter 10-kV-Wicklung zeigen die Kennlinien der Abb. 432. In Abb. 433 ist der Spannungsabfall auf der Unterspannungsseite bei verschiedenen Belastungen der beiden Wicklungen und verschiedenem Leistungsfaktor dargestellt.

An Sicherheitsgeräten hat jeder Transformator erhalten: Fernthermometer, Gefahrmelder und Buchholzschutz, die sämtlich an laut-tönende Wecker bzw. Hupen im ganzen Hause und in der Umgebung des Werkes, sowie an die Anzeigevorrichtung in der Warte angeschlossen sind.

Schutzdrosselspulen wurden weder ober- noch unterspannungseitig eingebaut. Der innere Aufbau des Transformators ist mit Sprungwellenschutz versehen.

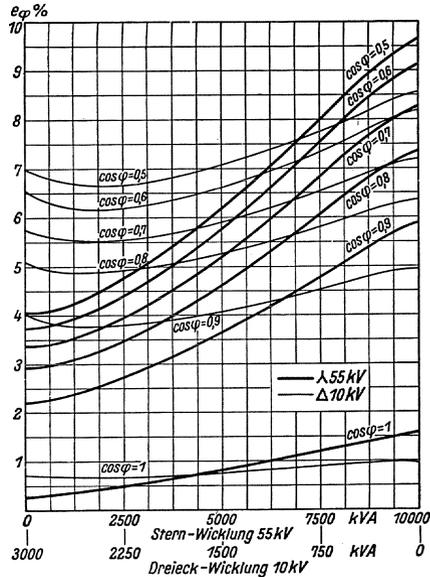


Abb. 433. Kennlinien für den Spannungsabfall bei verschiedenen Belastungen und Leistungsfaktoren der 50- und 10-kV-Wicklung in gleichzeitigem Betriebe.

k) Die Preßluftkühlung. Besondere Kostenvergleiche zwischen außenliegender Wasser- bzw. Preßluftkühlung haben zur Wahl der letzteren geführt. Der Luftstrom in Gegenstromführung mit dem Ölumlaufliefert für jede Kühlanlage ein besonderer Schleuderrührer durch einen Kanal mit einem Blechschutzkasten um die Kühlelemente. Die erwärmte Luft zieht frei in die Kühlkammer ab und wird von hier entweder zum Heizen der Halle benutzt oder ins Freie geleitet (Abb. 434).

Für die Kühlgewährleistung wurde folgendes festgesetzt:

„Bei einem Ölumlaufl von 2000 l/min muß das Öl um 3° rückgekühlt werden. Die Erwärmung der Kühlluft ist bei einer Luftmenge von 600 m³/min mit 15° angenommen. Bei diesen Verhältnissen darf die Übertemperatur im Transformator oben bei 160 kW Gesamtverlust 43° über Umgebungstemperatur nicht überschreiten.“

In Abb. 435 sind die Ergebnisse einer Betriebsmessung für das richtige Arbeiten des Kühlers zusammengestellt. Der Kühler arbeitete demgemäß über die gestellten Bedingungen hinaus gut.

An Meß- bzw. Meldeeinrichtungen hat jede Kühlanlage erhalten: Thermometer in den Zu- und Abflußleitungen, Meldegerät in der Ölzuflußleitung, das die Unterbrechung des Ölumlaufl sofort anzeigt, Spannungsabfallrelais mit akustischer Meldung für die Motoren der Ölumlauflpumpen und der Schleuderrührer, Druckmesser in den Druckrohrleitungen.

l) Die Spannungsregelung. Die eingangs erwähnten Aufgaben machten den Einbau einer besonderen Spannungsregelung notwendig. Die Bedingungen für diese waren:

Schaltung unter voller Last, Regelstufen ± 8 vH in Sprüngen von höchstens 2 vH, Regelung auf der 50-kV-Seite, Hilfsspannung von der dritten Wicklung der Haupttransformatoren mit 10,8 kV, Fernsteuerung von der Warte mit Anzeige jeder eingestellten Spannungstufe, Sicherheitschaltung beim Versagen der Regelvorrichtung, unbedingte Betriebssicherheit und Kurzschlußfestigkeit der benutzten Regelumspanner, leichte Bedienung.

Eine ganze Reihe heute bekannter Regelvorrichtungen wurde auf die Erfüllung dieser Bedingungen untersucht und als zweckmäßigste die Einrichtung der S.S.W. mit Zu- und Absatztransformatoren (Schaltung Reichenbach) festgestellt.

Aus dem Schaltbild (Abb. 436) ist die Arbeitsweise ersichtlich. Es

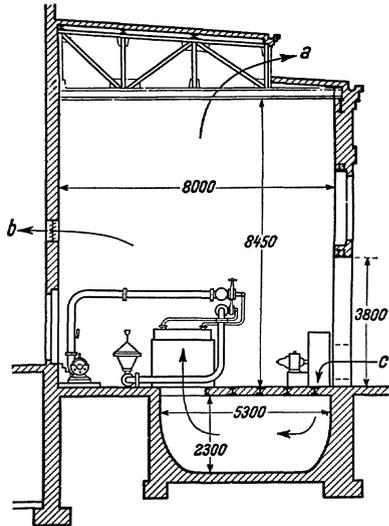


Abb. 434. Schnitt durch die Kühlanlage IV—IV.
a Luftaustritt, b zur Halle, c Luft Eintritt.

sind zwei Transformatoren mit getrennten Kesseln benutzt, der eine für 6 vH, der andere für 2 vH, die durch Umschalter derart miteinander verbunden oder einzeln geschaltet werden, daß die verlangten Spannungsgrenzen und Spannungsprünge erzielt werden. Die beiden Öl-

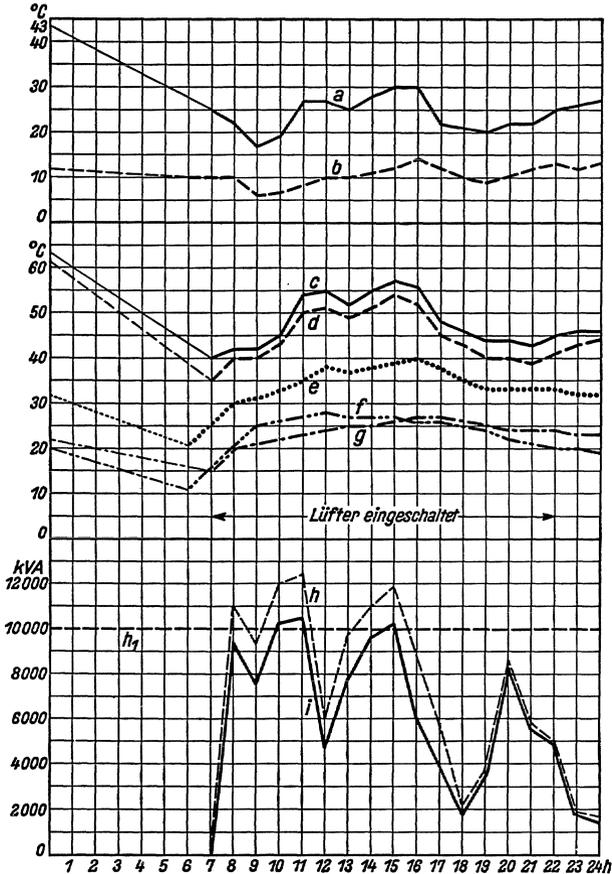


Abb. 435. Kennlinien für Temperaturen und Erwärmungen des 10000-kVA-Transformators mit eingeschaltetem Lüfter an einem Herbsttage.

a Transformator, Ölertwärmung, *b* Kühltulterertwärmung, *c* Ölaustritt, *d* Öleintritt, *e* Kühltulterraum (Kühlerabluft), *f* Außenluft (Kühlerfrischluft), *g* Luft, Transformatorerkammer, *h* Transformatorbelastung in kVA, *h₁* Nennleistung, *i* Transformatorbelastung in kW.

umschalter für 350 A Nennstrom schalten ohne Unterbrechung den Strom über Zwischenwiderstände für jede Stufe einer Phase. Die Betriebstromstärken, die die Schalter führen, betragen 41 bzw 14 A, entsprechend den Leistungen der beiden Transformatoren von 750 und 260 kVA.

Die Schalter haben wagerecht drehbar an einer Welle befestigte Schaltmesser, während die Schaltstücke an den Deckeldurchführungen

angebracht sind; Messer und Schaltstücke sind auswechselbar. Die Zwischenwiderstände liegen im unteren Teile des Ölkessels. Jeder Schalter ist auf einem Fahrgestell aufgebaut und mit Ölkesselwinde versehen, die, ohne den Schalter auszubauen oder sonstwie bewegen zu müssen, das Absenken des Ölkessels gestattet, nur das Nachsehen des Schalterinneren, insbesondere der Schaltmesser und der Schaltstücke, ein Auswechseln durch Schaltfeuer etwa beschädigter Teile, das Ölein- und -nachfüllen usw.

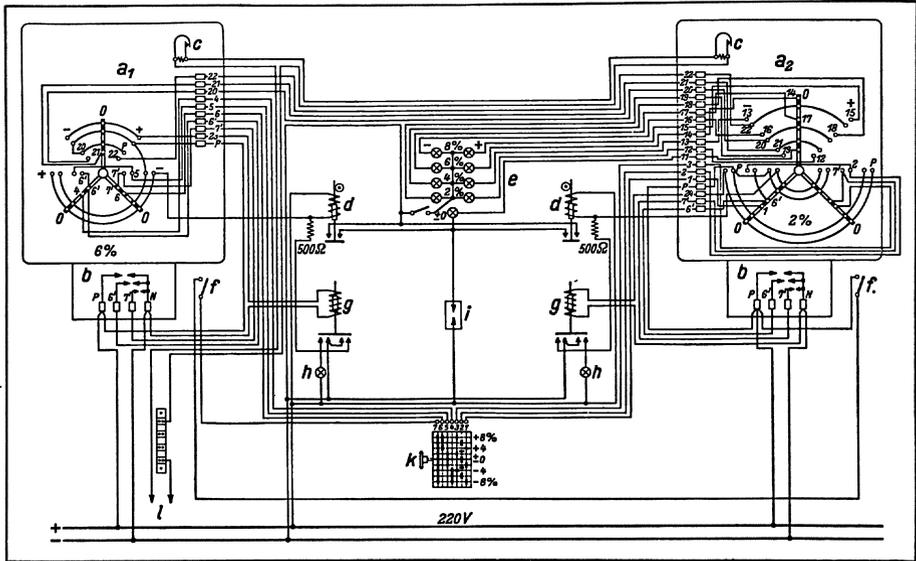


Abb. 436. Schaltbild für die 50-kV-Spannungsregelung mit zwei Zusatztransformatoren (Reichenbach-Schaltung) und Sicherungsgeräten.

a_1 Schalter für 41 A (6 vH), a_2 Schalter für 14 A (2 vH), b Motor-Gleichstromantrieb, c Gefahrmelder, d Zeitrelais (Arbeitsstromschaltung), e Stellungslampen, f Schalter für Unterbrechung des Steuerstromes bei Handbetrieb, g Relais für Lauf Lampe und Zeitrelaisspule (Ruhestromschaltung), h Lauf Lampe, i Auslöser des Ölschalters der Durchgangsleitung, k Walzenschalter, l Anschluß an das Gefahrmeldepaß (24 V).

Zum Antriebe jedes Ölumschalters dient ein Gleichstrommotor, der die eigentliche Schaltmesserwelle über ein Kurbelgestänge, eine Rollenkette und eine am Deckel des Schalters gelagerte Hilfswelle bewegt. Der Motorantrieb läßt sich durch eine Kupplung an der Hilfswelle ein und ausrücken; diese selbst ist noch für Handschaltung mit einem abnehmbaren Handrad versehen. Erfolgt Kupplung auf Handradschaltung, so wird hierbei selbsttätig der Steuerstrom des motorischen Antriebes abgeschaltet. Der Strom wird der 220-V-Batterie entnommen.

Die Hilfswelle trägt außerdem einen großen Zeiger mit Stellungsplatte, um den jeweiligen Schaltzustand deutlich sichtbar zu machen. Der Zeiger darf niemals auf einer Zwischenstellung stehen, weil dann die Übergangswiderstände dauernd eingeschaltet sein würden, was zu einer

übergroßen Erwärmung des Öles und somit zu einer Gefährdung für den Schalter führen könnte.

Zur Steuerung von zwei motorischen Antrieben bzw. einer vollständigen Spannungsregleinrichtung dient ein Walzenschalter (Abb. 436), der in der Warte im Hauptschaltpult (Abb. 431) eingebaut ist. Die jeweilige Schalterstellung wird durch Meldeschalter an Stellungslampen, die zugleich die Spannungstufe anzeigen, auf dem Schaltpult sichtbar gemacht. Die bei jeder Schaltung vorkommenden Zwischenstellungen zeigt eine besondere Lauflampe an, die über ein Relais in Ruhestrom angeschlossen ist. Während der Schaltbewegung leuchtet nur die Lauflampe, während die Stellungslampen verlöschen. Parallel zur Lauflampe liegt weiter ein Zeitrelais in Arbeitstromschaltung, das nach

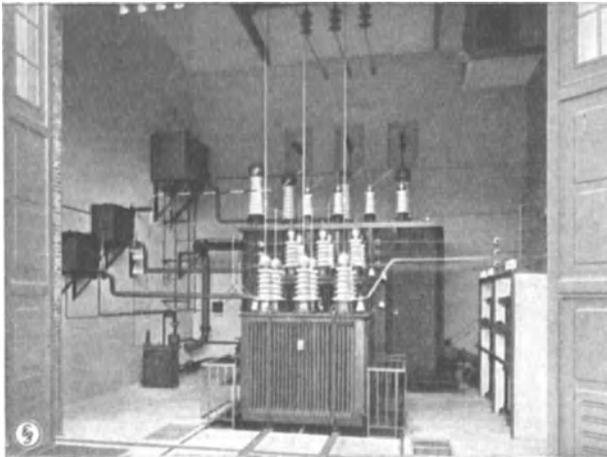


Abb. 437. Transformatorkammer mit Regeltransformatoren und Schaltern.

Ablauf von etwa zehn Sekunden auf die Auslöser der Ölschalter der Durchgangsleitung wirkt, die sodann das Abschalten derselben herbeiführen. Mit dieser Sicherheitschaltung wird einmal die Schalterbewegung an sich überwacht und zum anderen Meldung und Abschaltung selbsttätig vorgenommen, wenn der Schalter die gefährvolle Zwischenstellung länger als zehn Sekunden innebehält.

Im Schalterdeckel liegen noch Fernthermometer und Gefahrmelder, die wiederum zur Warte an das Gefahrmeldepult geleitet sind.

Die gesamte Regelvorrichtung hat sich während der bisherigen Betriebszeit einwandfrei bewährt, Störungen sind nicht eingetreten, desgleichen kein Versagen der Umschalter trotz betriebsmäßig voller Beanspruchung.

Den Einbau der beiden Regeltransformatoren mit ihren Schaltern zeigt Abb. 437. Jeder dieser Transformatoren hat wiederum Fernthermometer, Gefahrmelder und Buchholz-Schutz erhalten. Die Leitungsführung ist derart gewählt, daß bei Beschädigung eines Trans-

formators bereitgehaltene Kupferstücke die überspannungseitige Kurzschließung in kürzester Zeit zulassen.

Der Einbau der Transformatoren und der Kühlvorrichtungen ist aus Abb. 437 und 438 ersichtlich. Unter allen Transformatoren befinden sich sehr reichliche Ölgruben zur Hälfte gefüllt mit grobem, gewaschenem Kies. Diese Ölgruben haben keine besondere Öableitung in eine außenliegende Sammelgrube erhalten. Bei einem Ölbrande kommt es in der Hauptsache darauf an, so schnell wie möglich den Frischluftzutritt abzusperren; das wird erreicht durch bereitgehaltene Abschlußklappen für die seitlichen Rampenöffnungen der natürlichen Luftzufuhr. Außerdem ist der Ölab- und -zufluß zu den Kühlelementen sowohl in den Transformatorkammern als auch in der Halle durch

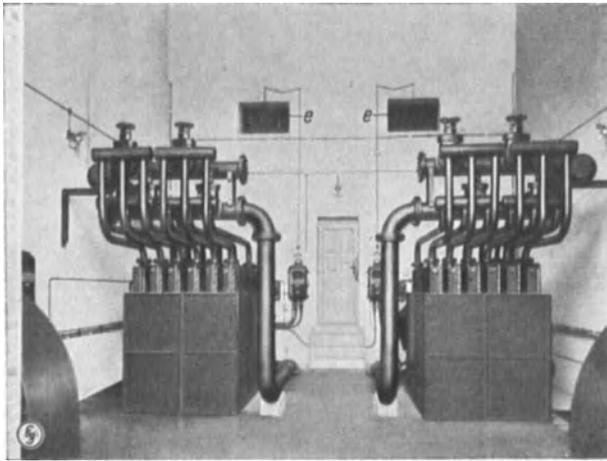


Abb. 438, Kühlkammer für zwei Transformatoren.
e Wärmeaustritt zur Halle.

Handräder abstellbar (Abb. 428). In die Ölgruben abfließendes Öl wird dort in großer Menge die Kiesschicht durchsickern, sich abkühlen und erlöschen. Schaumlöscher, die bei der Stadt-Feuerwehr vorhanden sind, stehen zur Verfügung.

Die Ölschalter für die Spannungsregelung stehen in Zellen, sonst sind sämtliche Schaltgeräte frei aufgestellt.

m) Schutzlampen (Warnlampen). Besonders zu erwähnen ist schließlich die Anlage der Schutzlampen, die der Bedienung anzeigen, ob ein Gerätefeld spannungsfrei ist und gefahrlos betreten werden darf. Über Meldekontakte aller für die einzelnen Gerätefelder in Frage kommenden Trennschalter sind Schutzlampen nach Abb. 371 an entsprechenden Stellen eingebaut, die durch einen Installationsschalter ein- und ausgeschaltet werden und durch ein rotleuchtendes Transparent „spannungsfrei“ anzeigen, ob das Feld ohne jede Gefahr betreten werden kann. Während der ganzen Dauer der Arbeit muß die Lampe einge-

schaltet bleiben. Eine Dienstvorschrift verpflichtet die gesamte Bedienung zur strengsten Befolgung. Solche Schutzlampen sind bei jedem Gerätefeld in der Halle, jedem Feld im Keller, jeder Transformator-kammer, jedem Ölschalterfeld der 10-kV-Anlage angebracht und haben sich bisher gut bewährt. Sie sind bei allen Transformatorwerken des Thüringenwerkes zum Einbau gekommen.

Zahlentafel 33. Einzel-Baukosten des Transformatorenwerkes.

Arbeiten	Kosten RM	Prozentsatz vH	Bemerkungen
Gleisanschluß	16668,06	= 4,10	
Erd-, Maurer- und Putzarbeiten	149743,42	= 37,00	
Betonarbeiten	50126,63	= 12,40	
Klempnerarbeiten	3199,62	= 0,80	
Dachdeckerarbeiten	7935,70	= 2,00	
Glaserarbeiten	8873,48	= 2,20	
Tischlerarbeiten	5450,08	= 1,40	
Schlosserarbeiten	4289,65	= 1,10	
Eisengerüste	104345,87	= 25,80	
Metalltore	7043,05	= 1,60	
Malerarbeiten	10972,76	= 2,60	
Nebenkosten	36353,68	= 9,00	
Insgesamt	405000,00	100,0	Unter Neben- kosten sind ein- geschlossen: Einfriedigung, Architekten- vergütung, Linoleum Baubüro Wasseranschluß und Sonstiges

Die a. a. O. erwähnten zweiten Ölschalter-Aus-Lampen im Hauptbedienungs-gänge haben ebenfalls noch eine Warntaufgabe darin, daß sie aufleuchten müssen, bevor die Trennschalter gezogen werden dürfen. Die Trennschalterantriebe sind entsprechend angeordnet (Abb. 415).

n) Schaltwärterwohnhaus. Unmittelbar beim Transformatorenwerk liegt ein Schaltwärterwohnhaus für vier Familien, dessen Grundriß

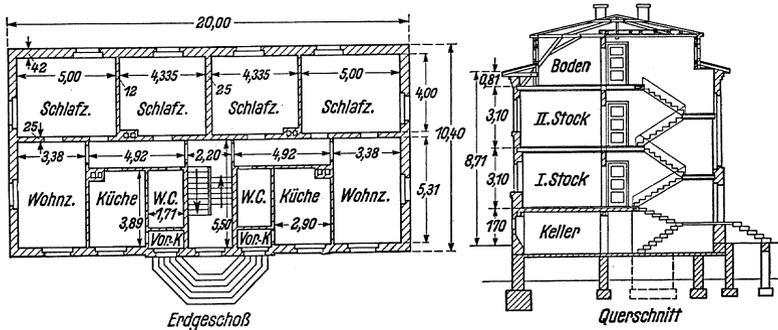


Abb. 439. Vier-Familien-Wohnhaus.

und Schnitt Abb. 439 zeigt. Auch dieses wurde in Architektur und äußerer Verkleidung ganz der Gestaltung des Werkes angepaßt. In Abb. 420 ist dieses Wohnhaus zu erkennen. Betrieblich von Bedeutung ist, daß mit dem Einschalten der Eingangsbeleuchtung sofort auch die Haupteingangsbeleuchtung des Transformatorenwerkes mit eingeschaltet

wird, damit beim Herbeirufen von Unterstützung abends oder des Nachts der Übergang zwangsläufig erhellt und in dunklen Nächten, bei Regen, Sturm, Schnee, Eis schnell und sicher begangen werden kann. Eine

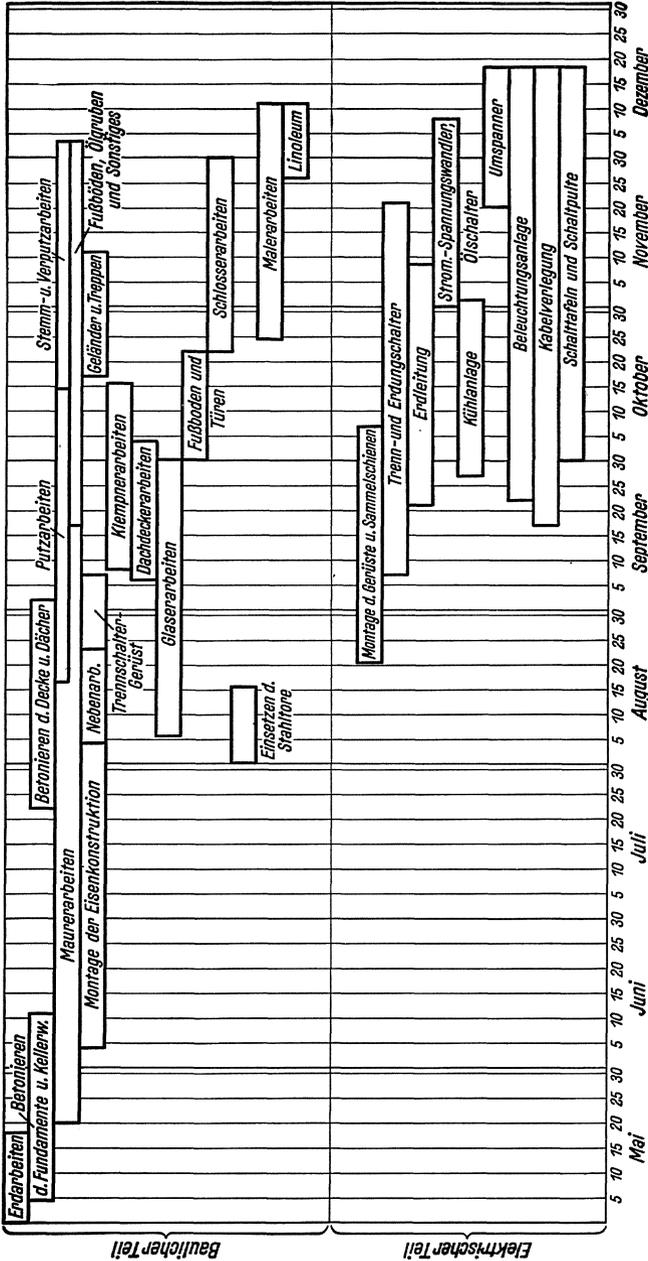


Abb. 440. Bauzeitplan.

Glockenverbindung von der Warte aus ist vorhanden, außerdem eine Hupenverbindung für Gefahrmeldung.

o) Schlußbemerkungen. Der Bau wurde am 1. Mai begonnen und am 18. Dezember beendet. Die Bauzeit bis zur vollen Inbetriebsetzung hat demnach rund 7½ Monate betragen. Das in Abb. 440 gezeichnete Bauzeitplan ist im wesentlichen eingehalten worden.

Die Kosten für den Hochbau verteilen sich auf die einzelnen Handwerkerkategorien nach den in der Zahlentafel 33 zusammengestellten vH-Sätzen. Der ungefähre Einheitspreis für 1 m³ umbauten Raumes des Transformatorenwerkes selbst hat RM 23,—, der des Wohnhauses RM 30,— betragen.

Die Gesamtkosten setzen sich zusammen aus:

Grunderwerb	RM	26000
Hochbau ohne Wohnhaus	„	405000
Wohnhaus	„	57000
Elektrischer Teil vollständig mit Transformatoren und Reglern	„	802000
<u>Zusammen</u>		<u>RM 1290000</u>

oder für das eingebaute kVA bei jetziger Transformatorenleistung von 20000 kVA = RM 64,50.

Werden die bereits vorhandenen Reserveräume abgesetzt, was bautechnisch ohne weiteres möglich ist, so verringert sich der umbaute Raum von 17500 auf 11000 m³ und dementsprechend die gesamte Bau-summe von RM 1290000 um RM 135000 auf RM 1155000 bzw. der Preis für das eingebaute kVA auf RM 57,75.

Den Dienst versieht jedesmal nur ein Schaltwärter. Ein Schaltmeister steht dem Werk vor und hat alle wesentlichen Schaltungen persönlich zu überwachen. Als Werkstatt dient zunächst die noch unbesetzte Kammer für die Kühlanlage 2. Transformatorinstandsetzungen sollen im Lieferwerk vorgenommen werden, indessen ist jede Transformator-kammer in der Höhe derart bemessen, daß der Kern herausgezogen werden kann.

Sachverzeichnis.

(Bei der Benutzung des Sachverzeichnisses sei auch auf das ausführliche Inhaltsverzeichnis verwiesen.)

- Abkühlungsfläche,
— bei Motoren 7, 14.
— beim Transformator 320.
- Akkumulatoren,
— Allgemeines 37, 179.
— Ladung und Entladung 168, 227.
— bei Motorregelung 37.
— für Notbeleuchtung 179, 508.
— bei Parallelbetrieb mit Umformern 168, 194, 204, 231.
— zur Spannungswandlung 265.
— Wirkungsgrad 37.
- Altern beim Transformator 313.
- Amperemeter s. Meßgeräte.
- Ankerrückwirkung 27,
— beim Einankerumformer 183, 204.
— beim Gleichstrommotor 5, 43.
- Anlassen von Gleichstrommotoren,
Drehstrommotoren, Umformern s. Inhaltsverzeichnis.
— von Kabelstrecken 403.
- Anlasser,
— Aufstellen des — 49.
— Auswahl bei Gleichstrom-Nebenschlußmotoren 38.
- Anlaßschalter beim Drehtransformator 400.
— beim Einphasen-Asynchronmotor 124.
- Anlaßstufenschalter 82.
- Anlaßtransformator 131, 140, 173, 190.
— beim Drehstrom-Asynchronmotor 76, 82, 88.
— beim Synchron-Motorgenerator 167.
— beim Wechselstrom-Kollektormotor 131.
- Anlaufmoment,
— des Drehstrom-Asynchronmotors 66, 74.
— — — mit Kurzschlußläufer 73, 75, 81.
— — — mit Schleifringläufer 65, 115.
— — — mit Polumschaltung 89.
— des Drehstrom-Kollektormotors 142, 147.
— des Einphasen-Asynchronmotors 125.
— — — -Reihenschlußmotors 126, 129.
— — — -Repulsionsmotors 134.
- Anlaufmoment,
— des Einphasen-Repulsions-Induktionsmotors 138.
— des Gleichstrom-Doppelschlußmotors 43.
— — — -Hauptschlußmotors 9, 12, 17.
— — — -Nebenschlußmotors 29, 32, 38.
— des Motors im allgemeinen 52.
- Anlaufstrom s. Anlaufmoment.
- Anode 212, 239.
- Anschlußwert 276, 278.
- Anstrich 474, 510.
- Antriebsmaschinen (s. auch Elektrizitätswerke, Kraftwerke, Überlandkraftwerke) 102, 118, 151, 157, 225, 269, 289.
- Anwendung,
— des Drehstrom-Asynchronmotors allgemein 66, 81.
— — — bei Bahnen 90, 92, 104.
— — — in Bergwerken 90, 92.
— — — bei Hebezeugen 69, 104.
— — — bei Kompressoren 100.
— — — bei Lüftern 90, 93, 100.
— — — bei Maschinen mit Schwungmassen 98.
— — — bei Stoffdruckmaschinen 88.
— — — bei Verladebrücken 69.
— — — bei Wasserhaltungen 78.
— — — bei Werkzeugmaschinen 69.
— des Drehstrom-Kollektormotors 145.
— des Drehstrommotors 398, 401.
— der Leonard-Schaltung 34, 78.
— des Repulsionsmotors,
— — — bei Druckmaschinen 137.
— — — bei Hebezeugen 137.
— — — bei Lüftern 137.
— — — bei Pumpen 137.
— — — bei Ringspinnmaschinen 135, 137.
— des Repulsions-Induktionsmotors 137.
— des Einankerumformers 254.
— des Einphasen-Kollektormotors allgemein 125, 137.
— — — bei Aufzügen 132.
— — — bei Bahnen 125.
— — — bei Hebezeugen 132.
— — — bei Spinnereien 125.

Anwendung,

- des Gleichrichters 223.
- des Gleichstrom-Doppelschlußmotors 44.
- des Gleichstrom-Hauptschlußmotors,
 - — — bei Bahnen 16, 22.
 - — — bei Drehscheiben 12.
 - — — bei Hebezeugen 12, 16, 18, 20, 24.
 - — — bei Maschinen mit Seiltrommeln 12, 16, 24.
 - — — bei Rollgängen 12, 16, 24.
 - — — bei Spills 12.
 - — — bei Transportvorrichtungen 12, 16.
 - — — bei Verladebrücken 12, 16.
 - — — in Walzwerken 12, 16, 24.
- des Gleichstrom-Nebenschlußmotors,
 - — — bei Arbeitsmaschinen allgemein 29, 52.
 - — — bei Bahnen 41.
 - — — bei Fördermaschinen 34, 41.
 - — — bei Hebezeugen 8, 29.
 - — — bei Kolbenpumpen 38.
 - — — bei Lüftern 38.
 - — — bei Papiermaschinen 35.
 - — — bei Walzwerken 34.
 - — — bei Werkzeugmaschinen 34, 41.
- des Phasenschiebers (s. Leistungsfaktorverbesserung).
- des Spartransformators 337.
- des Synchronmotors 162, 166.
 - — — bei Arbeitsmaschinen 165.
 - — — bei Umformern 252.
- des Transformators allgemein 268.
 - — — Trocken- 319.
 - — — Öl- 321.
- Anwurfsleistung 169, 171.
- Anwurfsmotor (s. auch Inhaltsverzeichnis) 167.
 - Asynchronmotor als — 195.
 - beim Einankerumformer 195.
 - Erregermaschine als — 174.
 - Gleichstromgenerator als — 177.
- Anzeigetafel für Meldeanlagen 521, 524.
- Architektur 440, 470, 471, 485, 516.
- Asynchrongenerator 104.
- Atmen des Transformators 324.
- Ausgleichsmaschine 211.
- Ausgleichstransformator 298.
- Ausgleichstrom 173, 175.
- Auskochen von Öl 324.
- Ausschreibung von Bauten 476.
- Außentemperatur 347, 351.
- Bahnanlagen 151, 217, 248.
- Bahnanschluß 151, 409, 471, 477.
- Balkon 452, 474.
- Bauausschreibung 476.

Baugrund 471.

- Baukosten,**
 - für Bauhandwerker 477, 479.
 - für Freiluftanlagen 463, 465.
 - für Innenanlagen 465, 477, 504, 530, 532.
- Bauplatz 151, 156, 351, 352, 408, 409, 458, 471, 486, 513.
 - Himmelsrichtung 350, 351.
- Bauprogramm 471, 476, 532.
- Baustoffe 349, 471, 485.
 - für Kanalanlagen 361.
- Bauzeichnung 471.
- Bauzeit 532.
- Belastungsfahrplan 283, 380.
- Belastungswert 221.
- Beleuchtung,**
 - von Freiluftanlagen 460.
 - von Transformator-Innenanlagen 476, 522.
- Belüftung,**
 - allgemeine Gesichtspunkte 354.
 - von Drehtransformatoren 402.
 - von Schalträumen (s. auch Schwitzwasserbildung) 348, 354.
 - von Transformatoren (s. Kühlung).
- Berry-Transformatorschaltung 375.
- Beruhigungswiderstand 40.
- Beschriftung 475, 520.
- Besichtigungsbühne 361, 518.
- Betrieb,**
 - aussetzender 12, 29, 45, 65, 277.
 - Dauer- 12, 277.
 - kurzzeitiger 12, 277.
 - landwirtschaftlicher 276.
 - übersynchroner 101, 103, 106, 125, 142, 146.
 - untersynchroner 101, 142, 146.
- Betriebseigenschaft (s. Haupteigenschaft).
- Betriebskennlinien,**
 - für den Drehstrom-Asynchronmotor 55, 65, 79, 81, 105, 144.
 - — — mit besonderer Erregung 109, 111.
 - — — mit Polumschaltung 88.
 - für den Drehstrom-Kollektormotor 143.
 - für den Drehtransformator 402.
 - für den Dreiwicklungstransformator 308.
 - für den Einphasen-Reihenschlußmotor 130.
 - — — -Repulsionsmotor 134, 136.
 - — — Repulsions-Induktionsmotor 139.
 - für den Frequenzumformer 261.
 - für den Gleichrichter 225.
 - für den Gleichstrom-Doppelschlußmotor 43.

- Betriebskennlinien,
 — für den Gleichstrom-Hauptschluß-
 motor 10, 19.
 — — — -Nebenschlußmotor 28, 41.
 — für den Schleuderlüfter 368.
 — für den Schubtransformator 405.
 Betriebsstunden 286, 289.
 Bewegung,
 — Dreh- 10.
 — Geradlinien- 10.
 Bewegungswiderstand, Kanal- 355.
 Blech, Transformator- 313.
 Blindleistung 161.
 Blindleistungsmaschine 118, 406.
 Blindschaltbild 430, 446, 520.
 Blindstrom 106, 161.
 — voreilend 60, 106, 160.
 Blindstromkompensation (s. Leistungs-
 faktorverbesserung).
 Blocktrennung 415, 421, 422, 449, 502.
 Bremsdrehmoment 25, 103.
 Bremsmagnet 20.
 Bremsung,
 — beim Drehstrom-Asynchronmotor
 104.
 — — — -Kollektormotor 145.
 — beim Einphasen-Reihenschlußmotor
 132.
 — — — -Repulsions-Induktionsmotor
 140.
 — elektrische (s. Nutzbremung).
 — beim Gleichstrom-Hauptschluß-
 motor 15, 20, 24.
 — — — -Nebenschlußmotor 29, 32, 40.
 Buchholtzschutz 342, 420, 435, 524.
 Bürstenabhebevorrichtung 70, 95, 185.
 Bürstenfeuer,
 — beim Einankerumformer 184, 200.
 — beim Gleichstrommotor 6, 30, 37, 52.
Dachreiter 360, 362.
 Dämpferwicklung,
 — beim Einankerumformer 192, 201.
 — beim Kaskadenumformer 211.
 — beim Synchronmotor 167.
 Dämpfungswiderstand beim Überspan-
 nungsschutz 436.
 Deckendurchführung von Leitungen
 443, 514, 518.
 Derimotor 135.
 Dieselmaschine (s. Antriebsmaschinen).
 Doppeldrehtransformator 397.
 Doppelfrequenzmesser 176.
 Doppelkäfigmotor 79, 89.
 Doppel-Repulsionsmotor 136.
 Doppelsammelschiene (s. Samm-
 schiene).
 Doppelschlußgenerator 172, 225.
 Doppelstabmotor 79.
 Doppelstrommaschine 181, 204.
 Dorftransformator 276, 289, 352, 375,
 413, 419, 440, 466, 482, 488.
 Drehfeld,
 — des Drehstrommotors 53.
 — des Einphasen-Asynchronmotors 124.
 — des Kaskadenumformers 207.
 — der Synchronmaschine 165, 258.
 Drehfeldrichtungsanzeiger 175.
 Drehmoment,
 — Brems- 25, 103.
 — beim Drehstrom-Asynchronmotor
 56, 64, 66.
 — — — mit Polumschaltung 86.
 — beim Drehstrom-Reihenschlußmotor
 142.
 — beim Einphasenmotor 123.
 — beim Einphasen-Reihenschlußmotor
 129.
 — — — -Repulsionsmotor 135, 136.
 — — — -Repulsions-Induktionsmotor
 137.
 — beim Generator 25.
 — beim Gleichstrommotor im allge-
 meinen 4.
 — — — -Doppelschlußmotor 43.
 — — — -Hauptschlußmotor 9, 12, 19.
 — — — -Nebenschlußmotor 27, 32, 33,
 37, 38.
 — bei der Leonard-Schaltung 34.
 — beim Synchronmotor 165.
 Drehrichtungswechsel (s. auch Inhalts-
 verzeichnis),
 — beim Drehstrom-Asynchronmotor 65.
 — — — -Kollektormotor 143, 146.
 — beim Einphasen-Reihenschlußmotor
 132.
 — — — -Repulsionsmotor 135.
 — — — -Repulsions-Induktionsmotor
 139.
 — beim Gleichstrommotor im allge-
 meinen 8.
 — — — -Hauptschlußmotor 15, 20, 22.
 — — — -Nebenschlußmotor 29, 34.
 Drehstromtransformator aus Einphasen-
 transformatoren 403.
 Drehtransformator 190, 227.
 Drehtrennschalter 427, 450.
 Drehzahl,
 — beim Drehstrom-Asynchronmotor
 55, 59.
 — — — -Nebenschlußmotor 146.
 — — — -Reihenschlußmotor 143.
 — beim Einankerumformer 183.
 — beim Einphasen-Reihenschlußmotor
 127.
 — — — -Repulsionsmotor 134.
 — — — -Repulsions-Induktionsmotor
 138.
 — beim Gleichstrommotor im allge-
 meinen 4, 12.

- Drehzahl,
 — beim Gleichstrom-Doppelschlußmotor 42.
 — — — -Hauptschlußmotor 8, 12.
 — — — -Nebenschlußmotor 26.
 — bei der Kaskadenschaltung 92.
 — beim Kaskadenumformer 207, 210.
 — beim Synchronmotor 164.
 — bei Übertragungsorganen (Riemen, Seile) 156.
 Drehzahlregelung (s. Inhaltsverzeichnis).
 Drehzahlregelung, verlustlose,
 — beim Drehstrom-Asynchronmotor 66.
 — beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor 33.
 Dreieckschaltung, offene, beim Dreiphasentransformator 82.
 Dreieck-Sternschaltung beim Drehstrommotor 78.
 Dreikesselschalter 431, 508.
 Dreileiteranlage,
 — beim Einankerumformer 201.
 — beim Gleichrichter 228, 245.
 — beim Kaskadenumformer 211.
 Dreiwicklungstransformator 296, 304, 506, 523.
 Drosselspule,
 — Anlaß- 193.
 — Anoden- 224, 237.
 — Campos- 437.
 — beim Einankerumformer 188, 204.
 — beim Einphasen-Induktionsmotor 124.
 — Erdungs- 506.
 — Glättungs- 200, 237.
 — Induktivität 438.
 — beim Kaskadenumformer 210.
 — Kathoden- 237.
 — Kurzschluß- 197, 220.
 — Saug- 216.
 — zur Spannungsregeln von Umformern (s. Inhaltsverzeichnis).
 — Spannungsteiler- 201.
 — Strombegrenzungs- 281, 418, 466.
 — Synchronisier- 195.
 — Überschalt- 195.
 — als Überspannungsschutz 437, 466, 496, 525.
 Druckhöhe 355.
 Drucklüfter 363.
 Druckzeiger 342.
 Dunkelschaltung 176.
 Durchführungsstromwandler 435.
 Durchgangsanlage 409, 448, 454, 466, 502.
 Eichbergmotor 146.
 Eigenanlage 60, 65, 102, 113, 118, 145, 149, 178, 195, 253, 277.
 Eigenkompensierung 107.
 Eigenverbrauch des Synchronphasenschiebers 121.
 Eilregler 37.
 Einankerumformer 98, 102.
 Einfachzellenschalter 179.
 Einheitsform für Transformatorenwerke 466.
 Einkesselschalter 431.
 Einphasengenerator 125, 159.
 Einphasentransformator in Drehstromnetzen 377, 425.
 Eisenbrand beim Transformator 314.
 Eisensättigung 313, 524.
 Eisenverlust,
 — beim Einankerumformer 182.
 — beim Transformator 284, 313, 352, 389.
 Einschaltdauer bei Motoren 14.
 Einschaltzeit bei Motoren 14.
 Einzelkompensation 117.
 Elektrizitätswerke,
 — allgemeine Bemerkungen für (s. auch Fremdstrombezug, Kraftwerke, Überlandkraftwerke) 19, 253, 346, 375.
 — Anschlußbedingungen für Drehstrommotoren 73, 81, 139, 171.
 Elektronen 213.
 Endgasungsklemme 220.
 Energierückgewinnung (s. Nutzbrem-
 sung).
 Entflammungspunkt bei Öl 323.
 Erdbebengend bei Transformatoren-
 anlagen 482.
 Erdschluß 294.
 Erdschlußlöschung 197, 306.
 Erdseil 499.
 Erdung 462.
 — bei Transformatoren 374, 430.
 Erdungsschalter 430, 499, 512.
 Erdungswiderstand 439.
 Erregeranode 232.
 Erregermaschine 159.
 — angebaute 167.
 — beim Asynchron-Motorgenerator 172.
 Erregertransformator 388, 398.
 Erregung,
 — beim Einankerumformer 186, 203.
 — beim Synchronmotor 159.
 Explosion, Ölschalter- 149, 449, 452, 453.
 Farbentafel 475.
 Fenster 472, 522.
 Fernsprechanlagen 237, 436, 443, 446, 518, 520.
 Fernthermometer 451, 524.
 Feuerlöscher (s. auch Schaumlöscher) 529.
 Flachbau bei Innenanlagen 446, 459.
 — — Freiluftanlagen 459.

- Fliehkraftkupplung 74, 124.
 — regler 72, 202.
 — riemenscheibe 74, 124.
 — schalter 131, 135, 144, 202, 212.
 Flügeldurchmesser bei Lüftern 365.
 Freiluftanlagen,
 — allgemeine Bemerkungen 379, 389, 447, 455, 476, 502, 506.
 — Feldbreiten 459.
 — Phasenabstände 459.
 — Schalterfundament 461.
 Fremderregung,
 — beim Drehstrommotor (s. Inhaltsverzeichnis).
 — beim Einankerumformer 203.
 — beim Gleichstromgenerator 34.
 — beim Gleichstrommotor 34, 40.
 — beim Synchronmotor 169.
 — beim Umformer 169.
 Fremdstrombezug, allgemeine Bemerkungen 19, 48, 60, 84, 102, 113, 118, 145, 149, 197, 256, 278, 287.
 Frequenz beim Einankerumformer 184.
 Frequenzmesser (s. Meßgeräte).
 Frequenzschwankungen, Einfluß auf
 — Asynchronmotoren 55, 67, 113, 115, 147, 260.
 — Asynchron-Motorgenerator 255.
 — für Einankerumformer 198, 202.
 — Gleichrichter 223, 251, 255.
 — Kaskadenumformer 255.
 — Netz allgemein 37, 256.
 — Regelsätze 102.
 — Synchronmotoren 114, 166, 260.
 — Synchronmotorgeneratoren 255.
 — Transformatoren 273.
 Frequenzwandler 155.
 Frischluftbeschaffenheit 352.
 Fußbodenbelag 474.
- Gabelschaltung beim Transformator 220.
 Gebäude, allgemeine Baubemerkungen 348, 467.
 Gebäudeeinführung 435, 501.
 Gefahrlampe (s. Meldelampe) 442.
 Gefahrmelder 342, 435, 524.
 Gegenschaltung bei Motoren zur Drehzahlregelung 35.
 — bei der Transformator-Spannungsregelung 390.
 Gemeinden, Transformator für — (s. Dorftransformator).
 Generatoren, allgemeine Bemerkungen 17.
 Geschwindigkeitshöhe 355.
 Glasplatte bei Mauerdurchbrüchen 451.
 Gleichrichter,
 — allgemein 197, 199.
 — Eisen- 212, 237.
- Gleichrichter,
 — -formierung 240.
 — Glas- 212, 232.
 — Grenzstrom- 222.
 — -Hilfszündung 213.
 — -Zündung 232, 241.
 Gleichstromgenerator 171, 174, 177, 189, 225.
 Gleisanschluß (s. Bahnanschluß).
 Glimmentladungen 317.
 Glühlampenwiderstand 197.
 Grobsynchronisierung 171.
 Großkraftwerk 149, 466.
 Grundlast 225, 229, 281.
 Gruppenkompensierung bei der Leistungsfaktorverbesserung 107, 112, 115, 117, 118.
 Gütevergleich bei Motoren 61.
 Güteverhältnis beim Gleichstrommotor 5.
- Hängeisolatoren in Schaltanlagen 444, 449.
 Hallenbau 448, 502, 514.
 Harmonische, höhere,
 — beim Einankerumformer 200.
 — beim Transformator 295, 305, 313, 525.
 Haupteigenschaft,
 — des Asynchron-Drehstrommotors mit besonderer Erregung 112, 119.
 — — — mit Kurzschlußläufer 54.
 — — — mit Schleifringläufer 54.
 — — — Einphasenmotors 123.
 — des Drehstrom-Nebenschlußmotors 147.
 — — — -Reihenschlußmotors 141, 145.
 — des Einankerumformers 187.
 — des Einphasen-Reihenschlußmotors 126.
 — — — -Repulsionsmotors 133.
 — — — -Repulsions-Induktionsmotors 138.
 — des Frequenzumformers 256.
 — des Gleichrichters 251.
 — des Gleichstrom-Doppelschlußmotors 42.
 — — — -Hauptschlußmotors 9, 17, 25.
 — — — -Nebenschlußmotors 27.
 — der Kaskadenschaltung bei Drehstrommotoren 91.
 — des Kaskadenumformers 206.
 — des Motorgenerators 173.
 — der Regelkaskaden 97, 98, 99.
 — des Schleuderlüfters 366.
 — des Synchron-Motors 164.
 — — — -Motorgenerators 252.
 — des Transformators 269.
 — der künstlichen Wärmebeseitigung 353.

- Hebelschalter (s. Schalter).
 Heizung 476.
 — elektrische 521.
 — für Schalträume 362.
 — durch Transformatorabluft 362, 525.
 Hellschaltung zum Parallelschalten 176.
 Heubachdiagramm 128.
 Heylanddiagramm 65.
 Hilfskompoundwicklung beim Einanker-
 umformer 201.
 Hilfszündung beim Gleichrichter 213.
 Himmelsrichtung,
 — für Bauplatzwahl (s. Bauplatz).
 — für Raumbelüftung 351.
 Hörnerfunkenstrecke (s. Überspannungs-
 schutz).
- Induktionsmotor** 53.
Induktionsregler (s. Drehtransformator).
Intermittierender Betrieb (s. Betrieb).
Isolatoren (s. auch Hängeisolatoren,
 Stützisolatoren).
 — aus Hartpapier 455.
 — in der Schaltanlage 415, 416, 444,
 485, 499.
Isolierung des Gleichrichters 246.
- Jahresbenutzungsstunden** 286, 289.
Jahreswirkungsgrad,
 — beim Gleichrichter 251.
 — beim Transformator 285, 375, 379.
 — bei Umformern 253.
Jalousieverschluß (s. Stabverschluß).
- Kabel** 148, 485, 497.
 — Anlassen von — 403.
 — kanal 344.
 — Melde- 250.
 — Steuer- 250.
 — trommel 497.
 — als Überspannungsschutz 438.
 — Verlegung der Steuer- 344.
Kammerbau 448, 502.
Kanalanlage, allgemeine Gesichtspunkte 321, 356.
 — für Trockentransformatoren 321.
Kanalverschluß 361, 370.
Karbidöfen, Transformator für — 320.
Kaskadenschaltung 90, 262.
Kathode 212, 239.
Kathodenfleck 213.
Kerntransformator 298, 310.
Kippfenster 472.
Kippmoment,
 — beim Asynchronmotor 57, 61, 81,
 112, 115.
 — beim eigenregten Asynchronmotor 112.
 — beim synchronisierten Asynchron-
 motor 115.
- Klappen in Kanälen** 361, 370.
Klemmenkasten 344, 511.
Klemmenleisten 344, 511.
Kletterschutz an Masten 494.
Kompensationswicklung 7.
Kompensierung wattloser Ströme (s.
 Leistungsfaktorverbesserung).
Kondensator,
 — durchführung 435, 501.
 — zur Leistungsfaktorverbesserung
 116.
 — zum Transformatorwicklungsschutz
 398.
Kondenswasserbildung (s. auch Schwitz-
 wasserbildung).
 — im Transformator-kessel 325.
Kopfanlage 409, 421, 454, 466, 502.
Kraftwerk, allgemeine Bemerkungen
 für das — (s. auch Antriebsmaschi-
 nen, Elektrizitätswerk, Großkraft-
 werk, Überlandkraftwerk) 152, 163,
 198.
 — bei Drehstrom 59, 65, 73.
 — bei Gleichstrom 17, 18, 27, 37, 44.
Kühlformen, vergleichende Zusammen-
 stellung 343.
Kühlgewährleistung 525.
Kühlluftbeschaffenheit 352.
Kühlmitteltemperatur 12, 279.
Kühlrippen am Transformator-kessel
 323, 327.
Kühlrohre am Transformator-kessel 323,
 327.
Kühlschlangen, Baustoffbeschaffenheit
 331.
 — im Transformator-kessel 331.
 — zur Wasserkühlung 336.
Kühlturm 244.
Kühlung,
 — beim Drehtransformator 402.
 — Formen der — 343.
 — beim Gleichrichter 215, 224, 233,
 240.
 — Preßluft 379, 524.
 — beim Transformator 278, 289, 311,
 323, 326.
Kühlwasserbedarf,
 — beim Gleichrichter 244.
 — beim Transformator 334.
Kühlwasserbeschaffenheit 240, 244, 331,
 340.
Kühlwassergrube 336.
Kühlwasserleitung, Isolierung der —
 244.
Kühlwassertemperatur 333.
Kupferverlust,
 — beim Einankerumformer 183.
 — beim Transformator 284, 352, 389.
Kuppelschalter 425, 507.
Kuppeltrennschalter 411, 424, 505.

- Kupplung,**
 — beim Anwurfsmotor 171.
 — elastische 157, 178.
 — bei der Erregermaschine 195.
 — bei zwei Gleichstrommotoren 23, 39.
 — bei Motorgeneratoren 157.
 — von Netzen über Drehtransformatoren 402.
 — — — über Frequenzumformer 261, 265.
 — starre 157.
Kurzschluß,
 — bremsung 26.
 — und Bürstenabhebevorrichtung 70, 95, 185.
 — leistung 149, 384, 391, 421, 466.
 — sicherheit von Schaltanlagen 149.
 — sicherheit durch Strombegrenzungsdrosselspulen 220, 418.
 — spannung beim Regeltransformator 384.
 — spannung beim Transformator 150, 220.
 — strom, Dauer- 173, 220.
 — strom, Stoß- 173, 220.
 — windungen beim Transformator 314.
Lager, Anzahl der — bei Motorgeneratoren 157.
Landschaftsbild (s. auch Architektur) 440.
Landwirtschaft, Transformatoren für die — 276, 375, 413, 440, 466, 488, 494.
Lastverteilung 384, 398.
Lebensdauer,
 — von Glaskolben 233, 237.
 — von Transformatoren 279, 313.
Leerlauf,
 — Energie beim Transformator 83, 273.
 — beim Gleichrichter 222.
 — beim Gleichstrom-Doppelschlußmotor 42.
 — — — -Hauptschlußmotor 12, 17.
 — — — -Nebenschlußmotor 28, 31.
 — kennlinie beim Motor 10.
 — strom beim Kondensator 116.
 — strom beim Motor 28, 65.
 — strom beim Transformator 83, 272, 284.
Leichtbauweise bei Transformatorenwerken 454.
Leistung,
 — bei Drehbewegung 10.
 — beim Drehstrom-Asynchronmotor 58, 93.
 — — — im übersynchronen Betrieb 104.
 — bei Drehstrom-Regelsätze 93.
 — beim Einankerumformer 183.
Leistung,
 — beim Einphasen-Induktionsmotor 123.
 — beim Frequenzumformer 257.
 — beim Gleichstrom-Hauptschlußmotor 9, 12, 21.
 — — — mit Reihen-Parallelschaltung 21.
 — — — -Nebenschlußmotor 27, 33, 38.
 — bei gradliniger Bewegung 10.
 — bei der Kaskadenschaltung 91, 93.
 — beim Kaskadenumformer 200, 209.
 — beim polumschaltbaren Motor 86.
 — beim Spartransformator 374.
 — beim Wechselstrommotor 129.
Leistungsfaktor,
 — beim Drehstrom-Asynchronmotor 59, 66, 73, 78, 93, 102, 115, 144.
 — — — -Kollektormotor 142, 146.
 — beim Einankerumformer 183, 189, 201.
 — beim Einphasen-Kollektormotor 130, 135.
 — beim Generator 57.
 — beim Gleichrichter 220, 251.
 — beim Kaskadenumformer 206.
 — bei der Kraftübertragung allgemein 105, 118, 162, 222, 259, 280, 375, 406.
 — beim Motorgenerator asynchron 173.
 — beim Motorgenerator synchron 164.
 — bei der Polumschaltung 86.
 — bei Regelmachinesätzen 98, 101.
 — des Repulsionsmotors 136, 137.
 — beim Synchronmotor 161.
 — beim Transformator 59, 280, 406.
Leistungsfaktorverbesserung allgemein (s. auch Gruppenkompensierung, Leistungsfaktor, Stromlieferungsvertrag, Tarif) 60, 105, 118, 257, 406.
 — durch Drehstrom-Asynchronmotor mit besonderer Erregung 105, 115.
 — durch Drehtransformator 398.
 — durch Einankerumformer 201.
 — durch Gleichrichter 222.
 — durch Kaskadenumformer 211.
 — durch Kondensator 116, 120.
 — durch Regelsätze 102.
 — durch Synchronmotor 120.
 — Wirtschaftlichkeit der — 118, 222.
Leistungszeiger s. Meßgeräte.
Leitung,
 — Einfach- 410.
 — Doppel- 410, 425.
 — Ring- 411, 412.
Leitungsführung in Transformatorenanlagen 518.
Leitungsquerschnitt beim Drehstromanlasser 70.

Leonard-Schaltung 33, 95.
 Leuchtschaltbild (s. Blindschaltbild).
 Löschtransformator 439.
 Luftaustrittsöffnung 355, 359.
 Luftbewegung, künstliche — 353.
 Lufteintrittsöffnung 355.
 Luftgeschwindigkeit für Kühlanlagen 329, 358.
 Lüfter,
 — Antriebskraft 365.
 — Arbeitskennlinien 367.
 — Drehzahl 366.
 — Druck 363.
 — Flügeldurchmesser 365.
 — Luftmenge 366.
 — Saug- 363.
 — Schleuder- 365.
 Luftfilter 363.
 Luftkühlung beim Trockentransformator 320.
 Luftmenge für Wärmebeseitigung 350.
 Luftpumpe 240.
 Luftsäule 365.
 Luftwechsel für Raumbelüftung 352, 362.
 Magnetausschalter 51.
 Magnetisierungslinie 10.
 Magnetisierungsstrom,
 — beim Asynchronmotor 53, 62, 68, 107, 111.
 — beim Drehtransformator 396.
 — beim Transformator 272.
 Manteltransformator 298, 309.
 Mastschalter 496.
 Masttransformator (s. Inhaltsverzeichnis).
 Mauerdurchführungen (s. auch Deckendurchführungen) 443.
 Mauerwerk,
 — Wärmeabgabe 348.
 — Herstellung mit Luftschicht 348, 467, 471, 515.
 Meldeeinrichtungen,
 — akustische 344, 446, 524.
 — für Schalter 434, 446.
 — für Transformatoren 330, 508.
 Meldekabel 344.
 Meldelampen 430, 434, 435, 442, 450, 463, 510.
 Meldeleitungen 344, 511.
 Meßgeräte,
 — bei Drehstrommotoren 94, 150.
 — beim Gleichrichter 215, 235, 244.
 — bei Gleichstrommotoren 49.
 — bei Transformatoren 434, 495, 507.
 — bei Umformern 174, 177.
 Meßwandler 176.
 Mischungstemperatur 345.
 Montagezeichnung 471.

Netzaufteilung 254.
 Netzkupplung 256, 259, 304.
 Neumannschaltung 199.
 Neutrale Zone 353.
 Normalspannung bei Transformatoren 271.
 Notbeleuchtung 476, 508.
 Nulleiter 298.
 Nulleiterbelastung beim Transformator 298.
 Nullpunkt 149, 295, 316, 374.
 — Erdung des — 439.
 Nutzbremmung,
 — beim Drehstrom-Ansynchronmotor 90, 95, 103.
 — — — mit Polumschaltung 90, 104.
 — — — -Kollektormotor 145.
 — — — -Reihenschlußmotor 145.
 — beim Einphasen-Ansynchronmotor 125.
 — beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor 29, 41.
 — bei der Kaskadenschaltung 95, 104.
 Öl,
 — allgemeine Bedingung für das — 323.
 — Transformator- 323.
 Ölausdehnungsgefäß 325, 382, 460.
 — Abmessungen bei Freiluftanlagen 326.
 — — bei Innenanlagen 326.
 Ölauskochen beim Transformator 324.
 Ölauspuffrohr 508.
 Ölbeschaffenheit bei verschiedenen Temperaturen 325.
 Ölbrand 149, 361, 362, 409, 443, 453, 458, 474, 529.
 Ölfanggrube 461, 474, 529.
 Ölfilterpresse 326.
 Ölkessel 326.
 — versengter bei Schaltern 453, 503, 514.
 Ölkonservator (s. Ölausdehnungsgefäß).
 Öloxydation 324.
 Ortstransformator (s. Dorftransformator).
 Parallelbetrieb,
 — beim Drehtransformator 397, 402.
 — beim Dreiwicklungstransformator 305.
 — beim Frequenzumformer 257.
 — beim Gleichrichter 217, 219, 224, 231, 247, 251.
 — bei Gleichstrom 172.
 — bei Gleichstrom mit Pufferbatterie 189, 204.
 — Netz- 198, 257, 303, 381, 384.
 — beim Schubtransformator 405.
 — bei Transformatoren 300.

- Parallelschaltung,
 — bei Drehtransformatoren 397.
 — beim Einankerumformer 195.
 — beim Frequenzumformer 258.
 — bei Generatoren 175.
 — beim Gleichrichter 247, 251.
 — beim Kaskadenumformer 210.
 — beim Motorgenerator (synchron) 175.
 — Spannungsregelung für die — 384.
 Parallelwiderstand bei Motoren 23, 40.
 Pendeln,
 — allgemein 173, 175.
 — beim Einankerumformer 102, 189, 190, 192.
 — beim Frequenzumformer 257.
 — beim Kaskadenumformer 211.
 — bei der Synchronmaschine 102.
 Petersenspule 295, 306, 439, 449.
 Phasenlampen 176.
 Phasenschieber 406.
 — Asynchron- 406.
 — Eigenverbrauch des — 407.
 — Synchron- 406.
 Phasenspannung 272.
 Phasenverschiebung (s. Leistungsfaktor).
 Phasenzahl,
 — beim Einankerumformer 183.
 — beim Gleichrichter 214.
 — beim Kaskadenumformer 209.
 Polarität beim Einankerumformer 194, 195.
 Polumschaltung beim Drehstrom-Asynchronmotor 85, 104.
 Potentialregler (s. Drehtransformator).
 Pufferbatterie 189, 204.
 Putzbau 471.
Quecksilberdampf 215.
Radiator 327.
 Raumbelüftung 467, 472, 522.
 Raumtemperatur 345, 347, 351.
 Reaktanz (s. Drosselspule).
 Reduktionskupplung beim Anwurfsmotor 171.
 Regeltransformator 135, 144.
 — Kurzschlußspannung beim — 384.
 — Stufen 390, 525.
 Regelzeit beim Stufentransformator 385.
 Reichenbach-Schaltung 391, 525.
 Reihen-Parallelschaltung,
 — bei Gleichstrom-Hauptschlußmotoren 21.
 — — — -Nebenschlußmotoren 39.
 Relais bei Schaltern (s. auch Rückstromrelais, Schalter) 149, 432, 510.
 — thermisches 46.
 — Zeit- 46, 148, 149, 433.
 Reservephase, vierte — 426.
 Riemenantrieb bei Motorgeneratoren 155.
 Riemenscheibe 56.
 Ringleitung 178, 498.
 — Leistungsverchiebung in der — 398.
 Ringsammelschiene (s. Sammelschienen).
 Röhrenkessel 327.
 Röhrenkühler 338.
 Röhrenwicklung 314.
 Rückkühler 244.
 Rückstrom beim Einankerumformer 198.
 Rückstromrelais (s. Relais, Schalter).
 — bei Umformern 198, 199.
 Rückzündung 220, 223, 233, 239.
Sammelschienen 443.
 — Doppel- 409, 416, 418, 423, 445, 479, 502.
 — Einfach- 409, 415, 419, 502.
 — Hilfs- 418, 448.
 — Ring- 418.
 Sauglüfter 363.
Schaltanlagen,
 — Feldbreite für Freiluftanlagen 459.
 — Feldbreite für Innenanlagen 446.
 — Phasenabstände für Freiluftanlagen 459.
 — Umbauter Raum 449, 532.
Schalter,
 — Anlaß- 82.
 — Dreikessel- 431.
 — Einkessel- 431.
 — Explosion 149, 432, 434, 452, 466.
 — Freiluftausführung 460.
 — Fundament für Freiluftanlagen 460.
 — Hebel- 45, 47, 148, 427.
 — Kurzschlußleistung 149.
 — Magnet- 51.
 — Öl- 148, 431.
 — Ölbrand 149.
 — Relais 46, 148, 198, 199, 432.
 — Rückstrom- 170, 199, 231.
 — Schnell- 199, 231.
 — Schutz- 117, 149, 385, 400, 434, 506.
 — selbsttätiger Höchststrom- 174.
 — — — bei Drehstrommotoren 57, 148.
 — — — bei Gleichstrommotoren 45.
 — — — bei Transformatoren 431.
 — — — bei Umformern 170, 199.
 — Spannungsrückgangs- 45, 149, 400.
 — — bei Drehstrommotoren 149.
 — — bei Einankerumformern 199.
 — — bei Gleichstrommotoren 46, 48.
 — — bei Motorgeneratoren 170.
 — Stern-Dreieck-, allgemein 77, 81, 173, 180.
 — — mit Schutzwiderstand 77.
 — Steuer- 510.
 — Verriegelung 94.
 — Vorkontakt- (s. Schutzschalter).
 — Walzen- 45.

- Schaltdienst 532.
 Schaltgruppen beim Drehstromtransformator 293.
 Schaltleistung bei Trennschaltern 431.
 Schaltpult 520.
 Schaltstange 329.
 Schalttafel 466, 481.
 Schaltung,
 — Doppelstern- 293, 299.
 — Dreieck- 293.
 — Gemischte 293, 302.
 — offene Dreieck- 292.
 — Stern- 293.
 — unverkettete 291.
 — verkettete 291.
 — Vierleiter- 293, 297.
 — Zick-Zack- 293, 300.
 Schaltwerk für Steuermotoren 401.
 Schaltzellen 443.
 — Feldbreite 446.
 Schaumlöcher 474.
 Scheibenwicklung 314.
 Scheinleistung 161.
 Schleuderlüfter 365.
 Schlupffrequenz 107.
 Schlupfregler 173.
 Schlupfwiderstand,
 — beim Drehstrommotor 56.
 — beim Gleichstrom-Doppelschlußmotor 44.
 Schlüpfung 54, 64, 84, 95, 104.
 Schnellregler 37, 380.
 Schottentür 452.
 Schraubenlüfter 365.
 Schützensteuerung 71.
 Schwitzwasserbildung 320, 361, 451, 455, 522.
 Schwungmassen 25, 44, 71, 98, 173.
 Schwungräder (s. Schwungmassen) 44.
 Seilantrieb bei Umformern 155.
 Seiltrommel 9, 24.
 Selbstanlauf beim Synchronmotor 165.
 Selbsterregung beim Einankerumformer 195.
 Selbstinduktion der Ankerwicklung 6.
 Selektivschutz (s. auch Wahlschutz) 197, 277, 411.
 Sicherheitsgrad einer Schaltanlage 499.
 Sicherungen,
 — Abschmelzstrom 45.
 — Belastungsdauer 45.
 — bei Drehstrommotoren 57, 76, 147.
 — bei Erregermaschinen 177, 178.
 — bei Gleichstrommotoren 45.
 — Prüfstrom 45.
 — Schmelzzeit 45, 148.
 — bei Transformatoren 277, 434, 489, 494.
 — Überlastung 45.
 — Zuverlässigkeit 148.
 Signallampe (s. Meldelampe).
 Signalvorrichtungen (s. Anzeigetafel, Buchholzschutz, Gefahrenlampe, Gefahrmelder, Meldelampe).
 Skottschaltung 137, 370, 373.
 Sonnschaltung 372.
 Spannung, ungleiche Phasen- 61.
 Spannungsabfall,
 — beim Drehtransformator 396.
 — beim Einankerumformer 182.
 — beim Gleichrichter 217, 219.
 — Transformator 270.
 Spannungsabsenkung (s. Spannungsschwankung).
 Spannungsänderung (s. Spannungsschwankung).
 Spannungsauslöser 149.
 Spannungsdiagramm (s. Vektordiagramm).
 Spannungsreglung,
 — allgemein 172, 282.
 — Regelzeit 386, 391.
 — selbsttätige —, bei Gleichstrom 172.
 — Stufen- 191, 384.
 Spannungsrelais 386, 401.
 Spannungsschwankung, Einfluß beim
 — Drehstrom-Asynchronmotor 57, 61, 75, 112, 115, 149, 260. 147.]
 — Drehstrom-Kollektormotor 143, 145.
 — Einankerumformer 192, 197, 225.
 — Gleichrichter 224, 255.
 — Motorgenerator, synchron 225.
 — Regelsatz 102.
 — Synchronmotor 114, 166, 260.
 — Wechselstrommotor 127.
 Spannungsteilung bei Dreileiteranlagen 201, 228, 265.
 Spannungsverhältnis,
 — beim Einankerumformer 182.
 — beim Gleichrichter 215.
 — bei der Gleichstromspannungswandlung 266.
 — beim Kaskadenumformer 208.
 — beim Motorgenerator, asynchron 172.
 — beim Motorgenerator, synchron 155.
 — beim Transformator 270.
 Spannungsverlust,
 — in Leitungen 380.
 — in Motorleitungen 18.
 Spannungszeiger (s. Meßgeräte).
 Sparschaltung 82, 302, 377.
 Spartransformator 132, 141, 383.
 Spieldauer bei Motoren 14.
 Spitzenlast 225, 229, 279.
 Spragueschaltung 24.
 Sprungwellenschutz beim Transformator 316, 524.
 Stabverschluß 356, 359, 361.
 Stadttransformator 277.
 Ständeranlasser 74, 82.
 Statische Elektrizität 295, 436, 439.

- Stern-Dreieckschaltung beim Drehstrommotor 74, 76, 144, 148.
 Stockwerksbau,
 — bei Freiluftanlagen 459.
 — bei Innenanlagen 446.
 Strahler am Transformatorckessel 327.
 Streutransformator 189, 200, 210.
 Streuung beim Transformator 269.
 Stützisolator 444.
 Stromlieferungsvertrag 60, 102.
 Stromwärmeverlust beim Einankerumformer 182.
 Stromzeiger (s. Meßgeräte).
 Stufenschalter 135, 144, 190, 227, 385, 389.
 Stufentransformator 83, 190, 375.
 Summenschaltung bei Zählern 508.
 Synchronisierende Kraft 165.
 Synchronmaschine 102, 118, 121.
 Synchronmotor 53, 114, 118.
 Synchronphasenschieber (s. Leistungsfaktorverbesserung, Synchronmaschine, Synchronmotor).

 Tarif 60, 66, 102, 118, 508.
 Telefon (s. Fernsprechanlagen).
 Temperatur, Abluft- 321.
 Temperaturanzeiger 342.
 Temperaturregelung 361, 521.
 Temperatursturz 361.
 Tertiärwicklung (s. auch Dreiwicklungs- transformator) 296.
 Thüringenwerksschaltung 411, 424, 504.
 Transformator,
 — -abluft zum Heizen 362.
 — Anwendung allgemein 310.
 — anzapfungen 220, 310, 318, 382.
 — Eingangswindungen 316, 438, 524.
 — Einheits- 275, 289.
 — Eisensättigung 313.
 — Entgasungsklemme 220.
 — fahrbar 320.
 — frequenz 273.
 — Kurzschlußleistung 391.
 — Kurzschlußspannung 281, 301, 310, 323, 381, 524.
 — Landwirtschaftlicher — 276, 289.
 — Leerlauf 270, 273, 284, 375.
 — Nachspannvorrichtung beim Transformatorckern 318.
 — Nullpunktserdung 439.
 — Spulenform 315.
 — Spulenversteifung 314.
 — Überlastung 278.
 Transformatorwicklungsverstärkung 524.
 Transformatorwicklungsversteifung 495.
 Treppen 473, 510.
 Trockentransformator 82.

 Türen 473, 517.
 — eiserne 351.
 — Schlupf- 473.
 — Schotten- 452.
 Überdruck 363.
 Übererregung,
 — beim Einankerumformer 186.
 — beim Kaskadenumformer 211.
 — beim Synchronmotor 160.
 Überkompensierung 107.
 Überlandkraftwerke, Bemerkungen für (s. auch Antriebsmaschine, Dorf- transformatoren, Elektrizitätswerke, Kraftwerke, landwirtschaftliche Transformatoren) 19, 52, 118, 149, 157, 178, 287, 346, 375, 379, 440, 446, 494.
 Überlastung,
 — beim Asynchronmotor 57, 61, 65, 112, 166.
 — beim Einankerumformer 189.
 — beim Einphasenmotor 123.
 — beim Gleichrichter 223, 229, 251.
 — beim Gleichstrommotor 6, 16, 30, 45, 49.
 — beim Synchronmotor 166.
 — beim Transformator 223, 277, 278.
 Übersetzung,
 — bei Getrieben 9.
 — bei Wellen 9.
 — bei Zahnrädern 9.
 Übersetzung, Spannungs- (s. auch Span- nungsverhältnis),
 — beim Dreiwicklungstransformator 306.
 — beim Einankerumformer 182.
 — beim Spartransformator 374.
 — beim Transformator 269, 301, 383.
 Überspannung, allgemein 436.
 — bei Motoren 75, 148.
 — bei Schaltern 231, 431, 434.
 — bei Transformatoren 376.
 Überspannungsschutz (s. auch Drossel- spule) 230, 489, 496, 507.
 — durch Kabel 438.
 Umfangsgeschwindigkeit 9.
 Unterdruck 363.
 Unterhaltungskosten für Bauwerke 471.
 Vektordiagramm,
 — des Doppeldrehtransformators 397.
 — des Drehstrom-Asynchronmotors 61.
 — des Drehtransformators 395.
 — des Dreiwicklungstransformators 306.
 — des Einphasen-Reihenschluß- motors 127.
 — des Frequenzumformers 258.
 — des Repulsionsmotors 133.
 — des Transformators 273.

- Verbindungsleitungen beim Drehstrom-Schleifringläufermotor 70.
 Verluste innerhalb einer Kanalanlage 356.
 — bei Transformatoren (s. Eisenverlust, Kupferverlust, Leerlauf).
 — bei Wechselstrom 162.
 Verqualmung, Öl- 362, 409, 443, 447, 449, 452, 458.
 Verzerrungswert beim Gleichrichter 221.
 Vierleiternetz bei Drehstrom 297.
 Vierte Phase 426, 498, 518.
 Vorkontaktschalter 149.
 Vorstufentransformator 399.
- Wärmeauslöser 342, 420.
 Wärmedurchlässigkeitswerte von Baustoffen 348.
 Wärmewanderung 348, 363.
 Wahlschutz (s. auch Selektivschutz) 197, 277, 411, 424, 510.
 Wanderwellen 388, 436.
 Ward Leonard-Schaltung 33.
 Warnlampe (s. auch Gefahrenlampe) 529.
 Warnungstafel 494.
 Warte 436, 445, 455, 462, 510, 514, 520.
 Wassersäule 365.
 Wattloser Strom (s. Blindstrom).
 Welligkeit beim Gleichstrom 214.
 Wendefeld 6.
 Wendepole,
 — im allgemeinen 5.
 — beim Doppelstromgenerator 204.
 — beim Einankerumformer 184, 201.
 — beim Gleichstrom-Doppelschlußmotor 43.
 — — — -Hauptschlußmotor 13, 16.
 — — — -Nebenschlußmotor 30, 38.
 — beim Kaskadenumformer 209, 211.
 — beim Wechselstrom Reihenschlußmotor 126.
 Wicklungswärme 7.
 Wiederschaltung, selbsttätige, beim Einankerumformer 201.
 Windungsschalter (s. auch Stufenschalter) 385, 392.
 Winter-Eichbergmotor 146.
 Wirbelstromanker 81.
 Wirkleistung 161.
 Wirkstrom 60, 161.
 Wirkungsgrad,
 — im allgemeinen 7, 255.
 — einer Akkumulatorenbatterie 37.
 — beim Drehstrom-Asynchronmotor mit Kurzschlußläufer 61, 73.
 — — — mit Schleifungsläufer 57, 58, 61, 69, 84, 93, 144.
 — — — mit Polumschaltung 89.
- Wirkungsgrad,
 — beim Drehstrom-Kollektormotor 144, 147.
 — — -Regelsatz 93, 102.
 — beim Einankerumformer 184, 252, 255.
 — beim Einphasen-Reihenschlußmotor 130.
 — — — -Repulsionsmotor 136.
 — beim Gleichrichter 218, 233, 251, 255.
 — beim Gleichstrom-Doppelschlußmotor 43.
 — — — -Hauptschlußmotor 10.
 — — — -Nebenschlußmotor 33, 37.
 — — — -Spannungswandler 267.
 — bei der Kaskadenschaltung 93, 102.
 — beim Kaskadenumformer 206, 209, 252, 255.
 — beim Lüfter 365, 369.
 — beim Motorgenerator asynchron 166.
 — beim Motorgenerator synchron 171, 254.
 — beim Synchronmotor 254.
 — beim Transformator 284, 334.
 — einer Übersetzung 9.
 Wirtschaftlichkeitsberechnung, allgemeine Angaben 118, 122, 153, 269, 288, 378, 407.
 Wohnhaus 471, 478, 530.
- Zählschiene 508.
 Zahnradübersetzung,
 — allgemein 9.
 — bei Anwurfmotoren 171, 195.
 Zeitkennlinien,
 — für die Motorerwärmung 14.
 — für die Ölerwärmung bei Transformatoren 324.
 Zentralkommandoraum (s. Warte).
 Ziegelbau 471, 485.
 Zone, neutrale 353.
 Zugkraft 9, 56.
 Zuleitung, Berechnung der
 — bei Drehstrom 60, 65.
 — bei Gleichstrom 27, 29, 52.
 — Verlust 60.
 Zündanode 232, 239.
 Zündung,
 — Gleichstrom- 243.
 — Kipp- 232.
 — Spritz- 232.
 — Wechselstrom- 242.
 Zündsolenoid 239, 241.
 Zusammenarbeit,
 — von Gleichstrom-Hauptschlußmotoren 22.
 — — — -Nebenschlußmotoren 39.
 Zusatzgenerator 36, 201.
 Zusatztransformator 278, 381, 383, 399.

Die elektrische Kraftübertragung. Von Oberbaurat Dipl.-Ing. Herbert Kysler.

Zweiter Band: Die Niederspannungs- und Hochspannungs-Leitungsanlagen. Ihre Projektierung, Berechnung, elektrische und mechanische Ausführung und Untersuchung. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 319 Textfiguren und 44 Tabellen. VIII, 405 Seiten. 1921. Unveränderter Neudruck 1923. Gebunden RM 25.—

Dritter Band: Die maschinellen und elektrischen Einrichtungen des Kraftwerkes und die wirtschaftlichen Gesichtspunkte für die Projektierung. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 665 Textfiguren, 2 Tafeln und 87 Tabellen. XII, 930 Seiten. 1923. Unveränderter Neudruck 1929. Gebunden RM 54.—

Theorie der Wechselstromübertragung (Fernleitung und Umspannung). Von Dr.-Ing. H. Grünholz. Mit 130 Abbildungen im Text und auf 12 Tafeln. VI, 222 Seiten. 1928. Gebunden RM 36.75

Berechnung von Drehstrom-Kraftübertragungen. Von Oberingenieur Oswald Burger. Mit 36 Textabbildungen. V, 115 Seiten. 1927. RM 7.50

Bau großer Elektrizitätswerke. Von Geh. Baurat Professor Dr.-Ing. h. c., Dr. phil. G. Klingenberg. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 770 Textabbildungen und 13 Tafeln. VIII, 608 Seiten. 1924. Berichtigter Neudruck 1926. Gebunden RM 45.—

Wahl, Projektierung und Betrieb von Kraftanlagen. Ein Hilfsbuch für Ingenieure, Betriebsleiter, Fabrikbesitzer. Von Dipl.-Ing. Friedrich Barth. Vierte, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 161 Figuren im Text und auf 3 Tafeln. XII, 525 Seiten. 1925. Gebunden RM 18.—

Entwurf und Bau von Schaltanlagen für Drehstrom-Kraftwerke. Von Oberingenieur Johann Waltjen. Mit 373 Abbildungen im Text. XVI, 268 Seiten. 1929. Gebunden RM 39.—

Relais und Schutzschaltungen in elektrischen Kraftwerken und Netzen. Vorträge von Oberbaurat Direktor A. Rachel, Dresden; Professor Dr.-Ing. R. Rüdtenberg, Berlin; Oberingenieur Dr.-Ing. M. Schleicher, Berlin; Oberingenieur Dr.-Ing. E. Sommer, Dresden; Oberingenieur O. Mayr, Berlin; Chefelektriker Dr.-Ing. E. Rühle, Berlin; Direktor M. Neustätter, Berlin. Veranstaltet durch den Elektrotechnischen Verein E. V. zu Berlin, in Gemeinschaft mit dem Außeninstitut der Technischen Hochschule zu Berlin. Herausgegeben von Reinhold Rüdtenberg, Dr.-Ing. und Dr.-Ing. e. h., Chefelektriker der Siemens-Schuckertwerke A.-G. und Honorarprofessor an der Technischen Hochschule zu Berlin. Mit 336 Textabbildungen. VIII, 281 Seiten. 1929. Gebunden RM 25.50

Kurzschlußströme beim Betrieb von Großkraftwerken. Von Dr.-Ing. und Dr.-Ing. e. h. Reinhold Rüdtenberg, Chefelektriker, Honorarprofessor an der Technischen Hochschule zu Berlin. Mit 60 Textabbildungen. IV, 75 Seiten. 1925. RM 4.80

Elektrische Gleichrichter und Ventile. Von Professor Dr.-Ing. A. Güntherschulze. Zweite, erweiterte und verbesserte Auflage. Mit 305 Textabbildungen. IV, 330 Seiten. 1929. Gebunden RM 29.—

Der Quecksilberdampf-Gleichrichter. Von Kurt E. Müller-Lübeck, Ingenieur der AEG-Apparatefabriken, Treptow.

Erster Band: **Theoretische Grundlagen.** Mit 49 Textabbildungen und 4 Zahlentafeln. IX, 217 Seiten. 1925. Gebunden RM 15.—

Zweiter Band: **Konstruktive Grundlagen.** Mit 340 Textabbildungen und 4 Tafeln. VI, 350 Seiten. 1929. Gebunden RM 42.—

Der Drehstrommotor. Ein Handbuch für Studium und Praxis. Von Professor Julius Heubach, Direktor der Elektromotorenwerke Heidenau G. m. b. H. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 222 Abbildungen. XII, 599 Seiten. 1923. Gebunden RM 20.—

Die Drehstrom-Induktionsregler. Von Professor Dr. sc. techn. H. F. Schait, Winterthur. Mit 165 Textabbildungen. VIII, 356 Seiten. 1927. Gebunden RM 25.50

Die wirtschaftliche Regelung von Drehstrommotoren durch Drehstrom-Gleichstrom-Kaskaden. Von Dr.-Ing. H. Zabransky. Mit 105 Textabbildungen. IV, 112 Seiten. 1927. RM 9.—

Die asynchronen Wechselfeldmotoren. Kommutator- und Induktionsmotoren. Von Professor Dr. Gustav Benischke, Berlin. Zweite, erweiterte Auflage. Mit 109 Abbildungen im Text. V, 123 Seiten. 1929. RM 11.40; gebunden RM 12.60

Elektrische Maschinen. Von Professor Dr.-Ing. Rudolf Richter, Direktor des Elektrotechnischen Instituts, Karlsruhe.

Erster Band: **Allgemeine Berechnungselemente. Die Gleichstrommaschinen.** Mit 453 Textabbildungen. X, 630 Seiten. 1924. Gebunden RM 32.—

Zweiter Band: **Synchronmaschinen und Einankerumformer.** Mit Beiträgen von Professor Dr.-Ing. Robert Bröderlink, Karlsruhe. Mit 519 Textabbildungen. XIV, 707 Seiten. 1930. Gebunden RM 39.—

Die Transformatoren. Von Professor Dr. techn. Milan Vidmar, Ljubljana. Zweite, verbesserte und vermehrte Auflage. Mit 320 Abbildungen im Text und auf einer Tafel. XVIII, 751 Seiten. 1925. Gebunden RM 36.—

Der Transformator im Betrieb. Von Professor Dr. techn. Milan Vidmar, Ljubljana. Mit 126 Abbildungen im Text. VIII, 310 Seiten. 1927. Gebunden RM 19.—

Schaltbilder für Synchron-Motorgeneratoren.

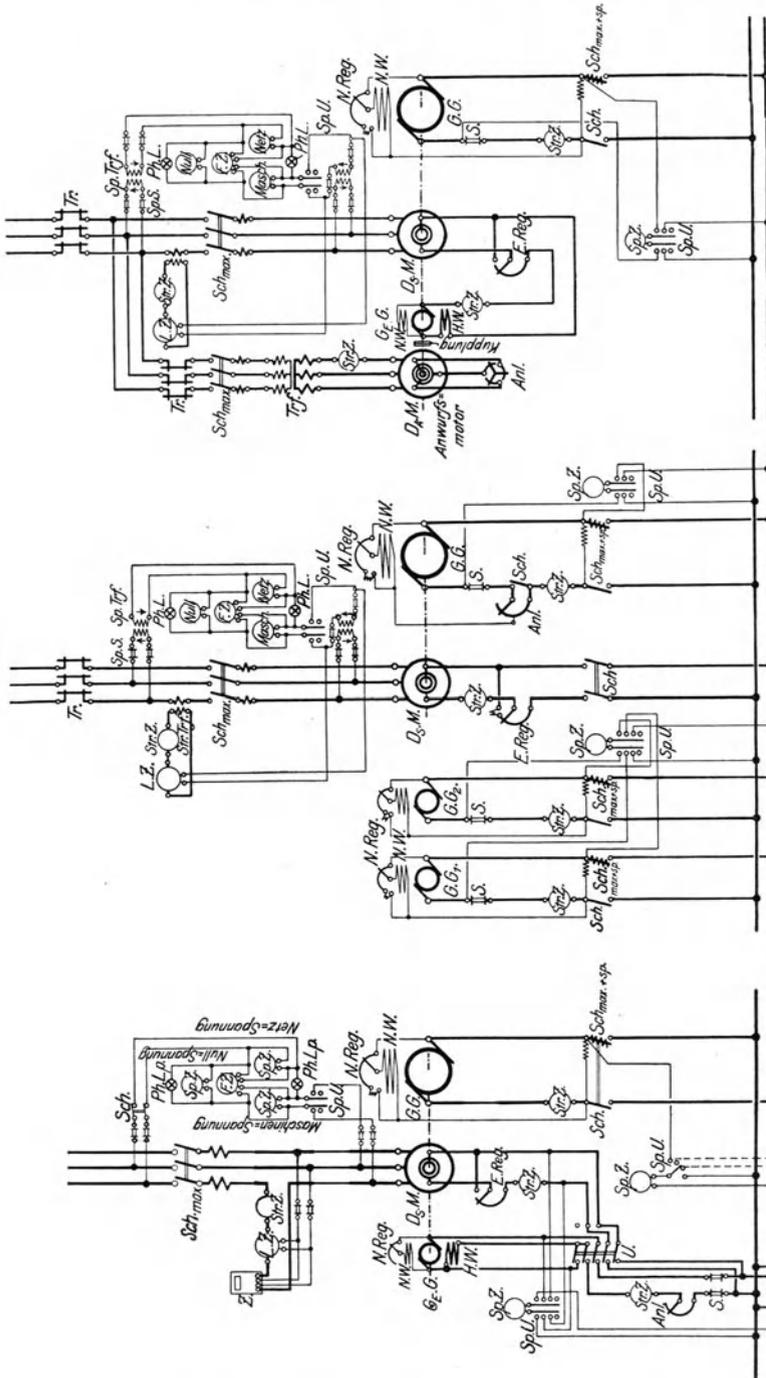
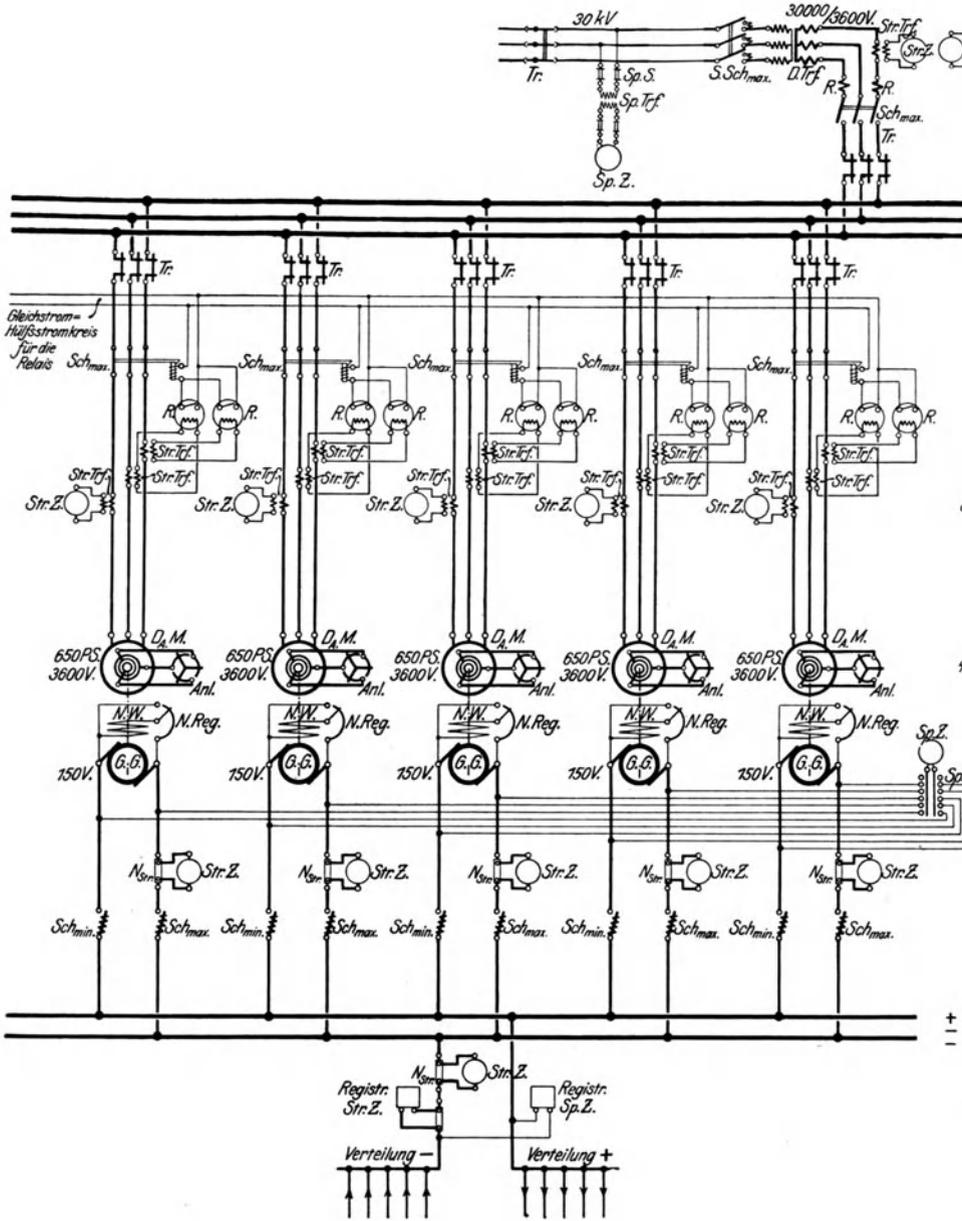


Abb. III. Anlassen durch besonderen Drehstrom-Asynchron-Anzugsmotor.

Abb. II. Anlassen von der Gleichstromseite mit Benutzung des Gleichstromgenerators des Motor-generators als Anzugsmotor. Erregung von den Gleichstromsammelschienen.

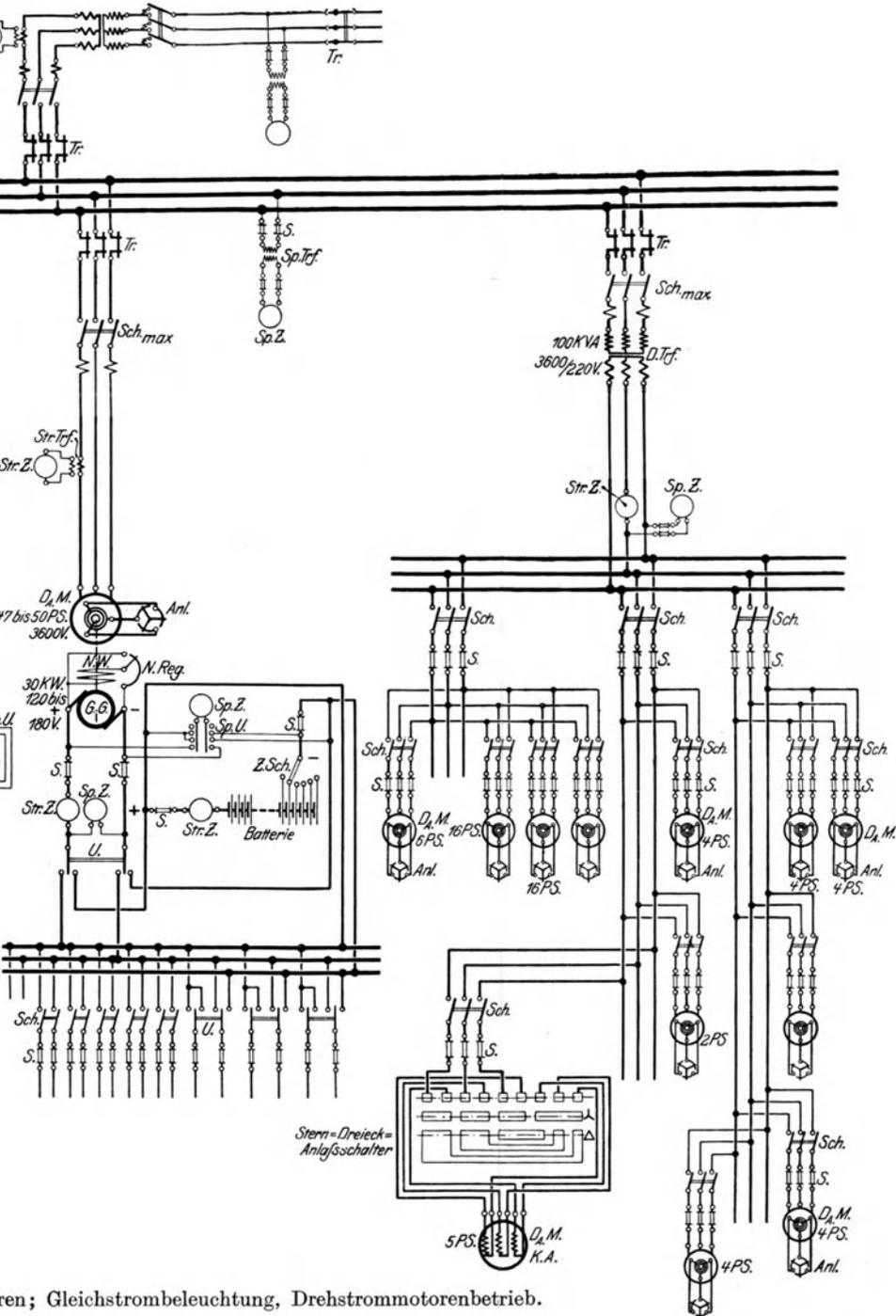
Abb. I. Erregungs-maschine als Anzugs-motor.

Schaltbild für die elektrische A

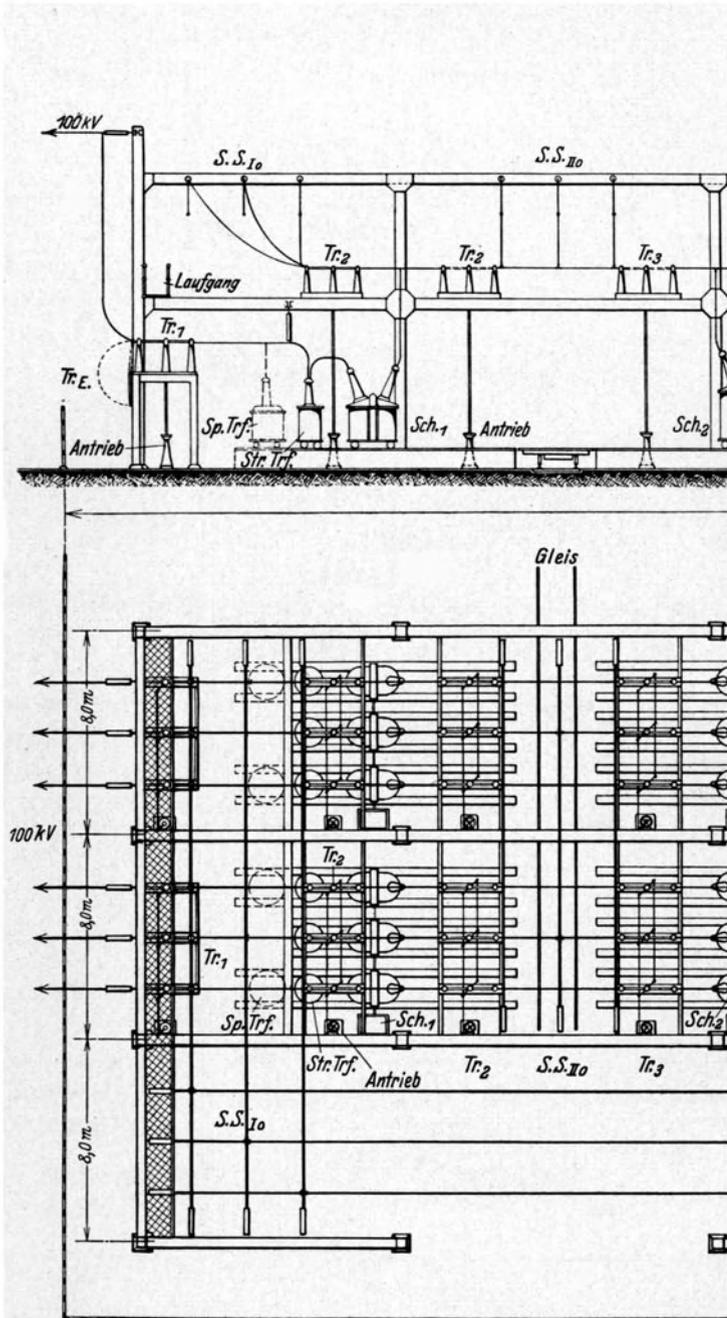


Drehstrom-Gleichstromumformung durch Asynchron-Motorgeneratoren

Anlage eines Industrierwerkes.

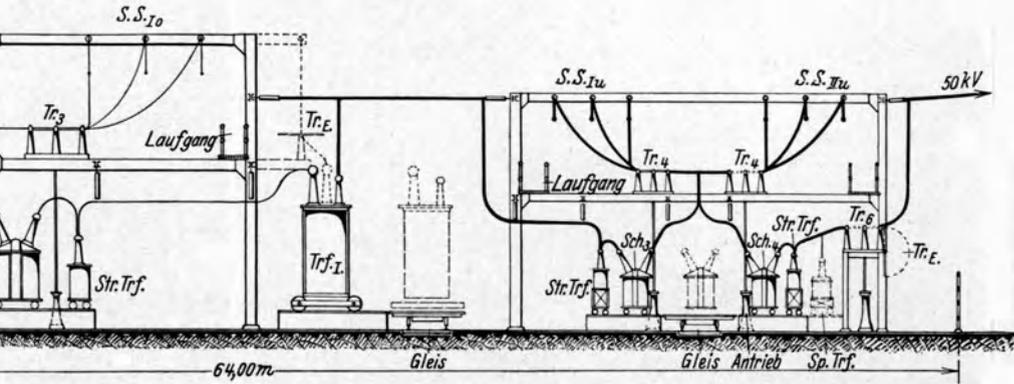


ren; Gleichstrombeleuchtung, Drehstrommotorenbetrieb.

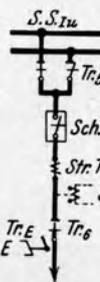
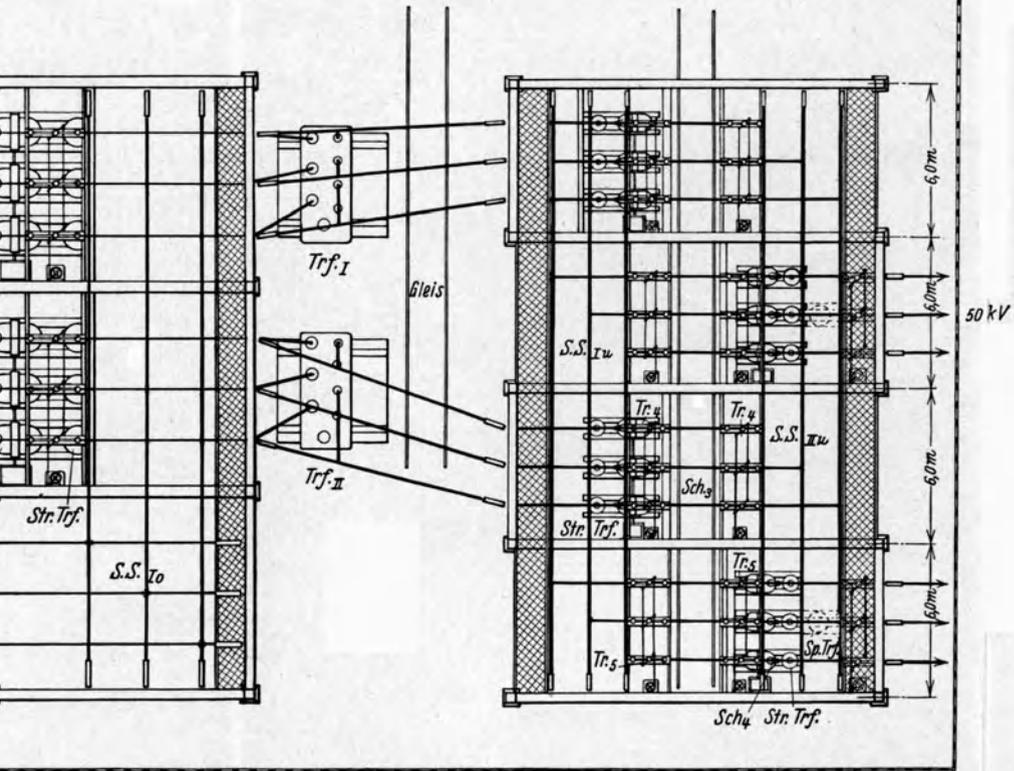


Form A. Freiluftanlage 100/50 kV, Trennschalter

Aufbau von Freiluftanlagen (Beschreibung siehe S. 459).



- Ausführung**
- Hochbau ...
 - Mittelbau ...
 - Flachbau ...

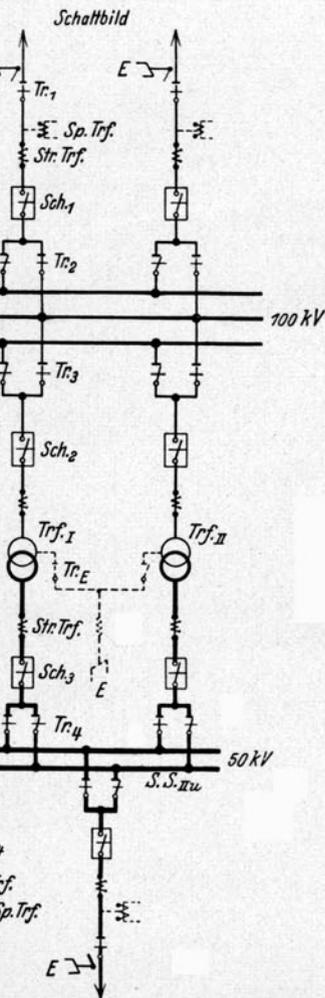


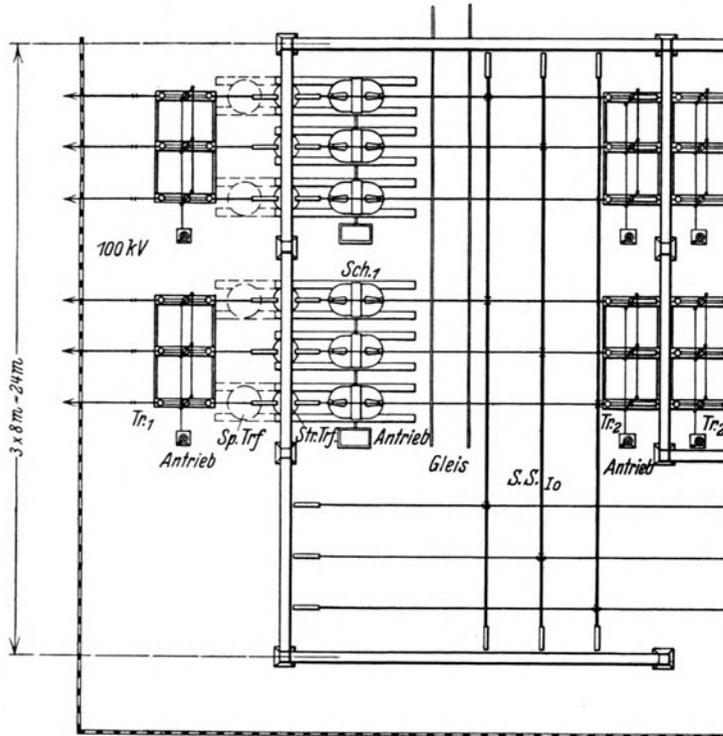
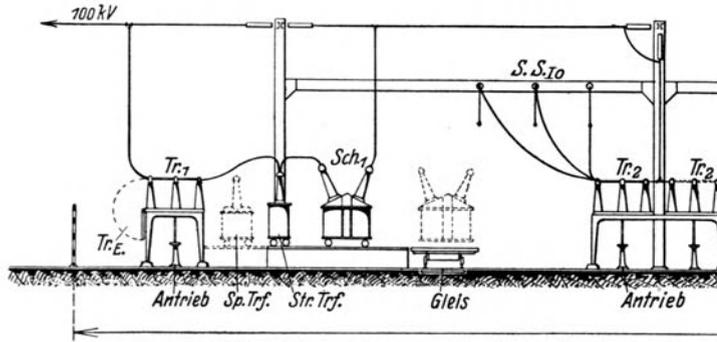
... über den Ölschaltern (Stockwerksbau).

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20m.

Tafel III.

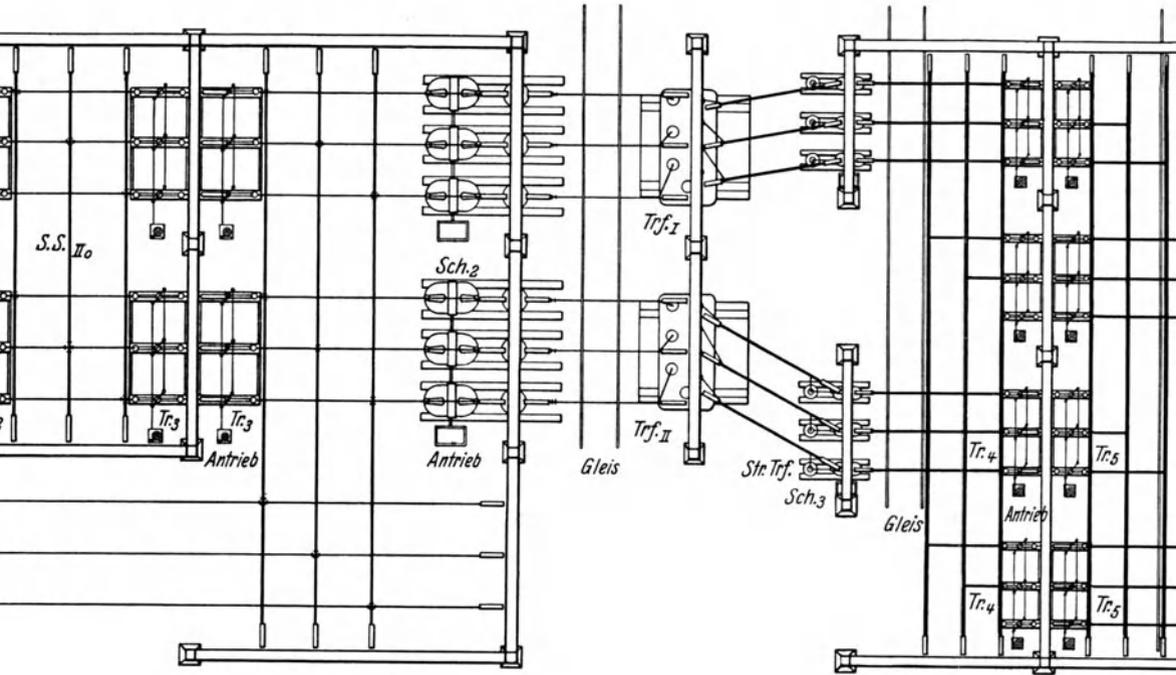
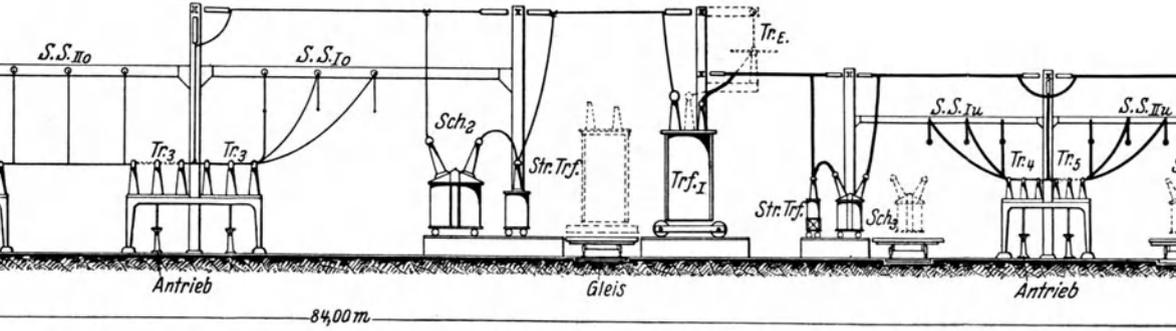
Platzbedarf, Grundfläche etwa	Feldbreite		Gewicht der Eisenkonstr. t	Fundamente f. Eisenkonstr. m ³
	100 kV	50 kV		
1920 m ²	8,0 m	6,0 m	80	190
2520 „	8,0 „	6,0 „	60	220
3960 „	8,0 „	7,5 „	40	280



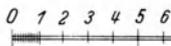


For

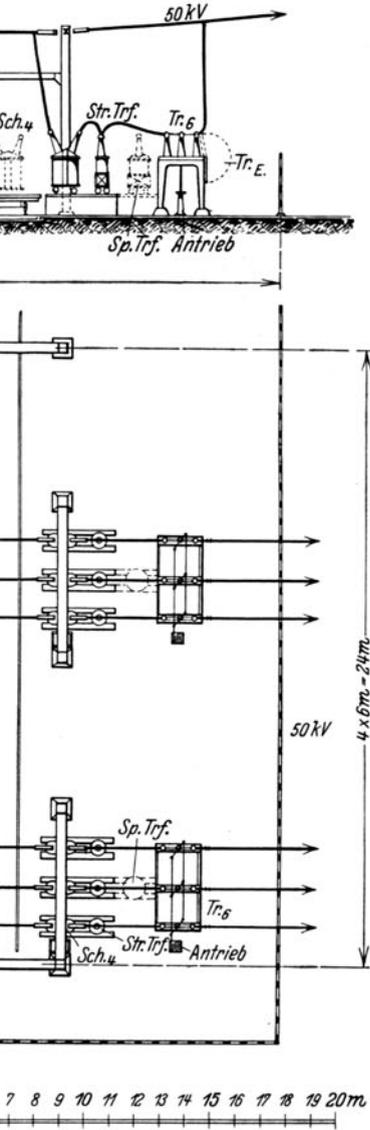
Aufbau von Freiluftanlagen (Beschreibung siehe S. 459).

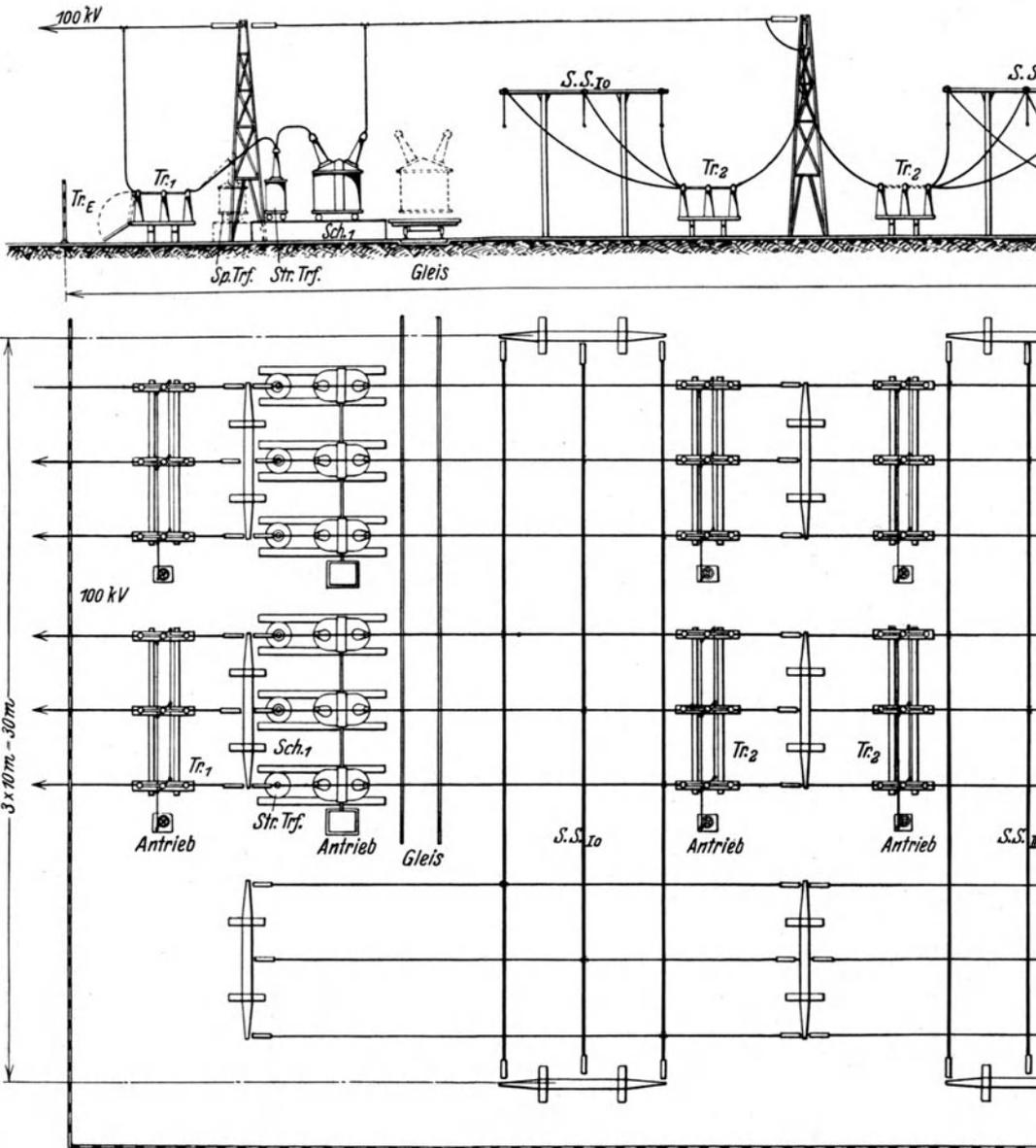


m B. Freiluftanlage 100/50 kV, Trennschalter hochgestellt neben den Ölschaltern.

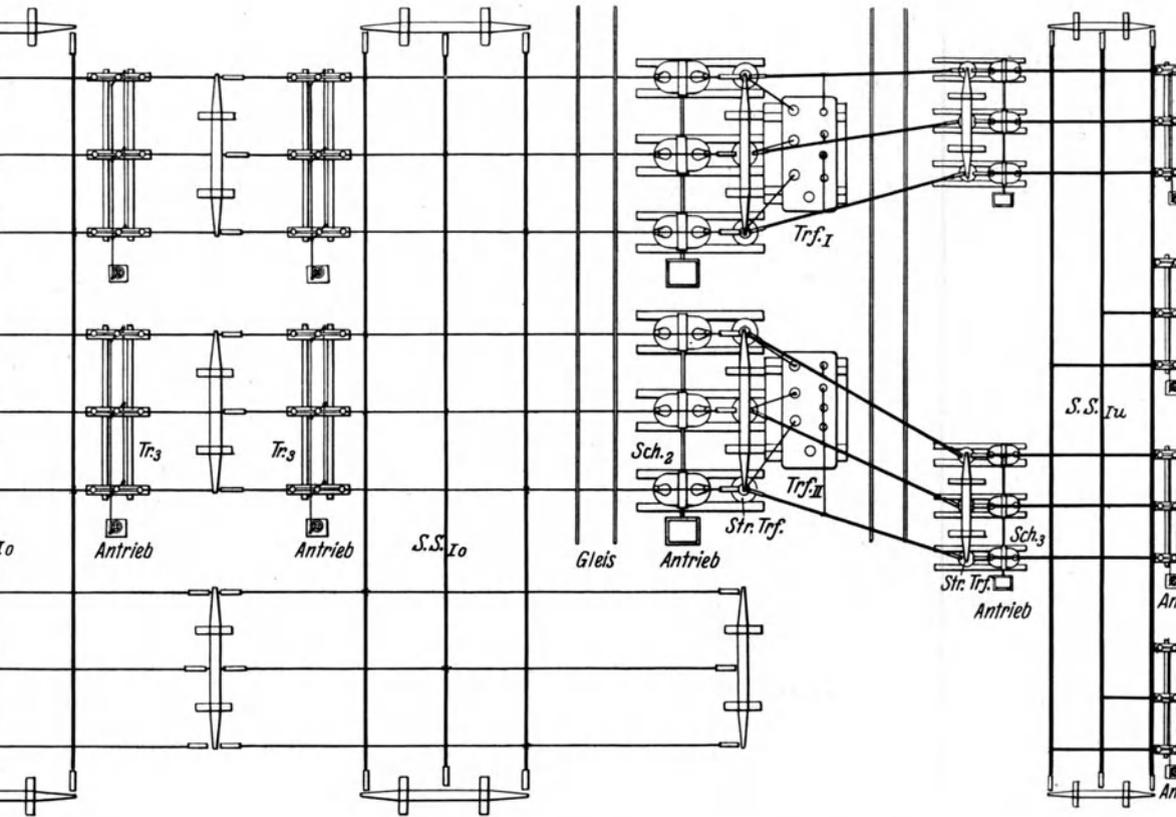
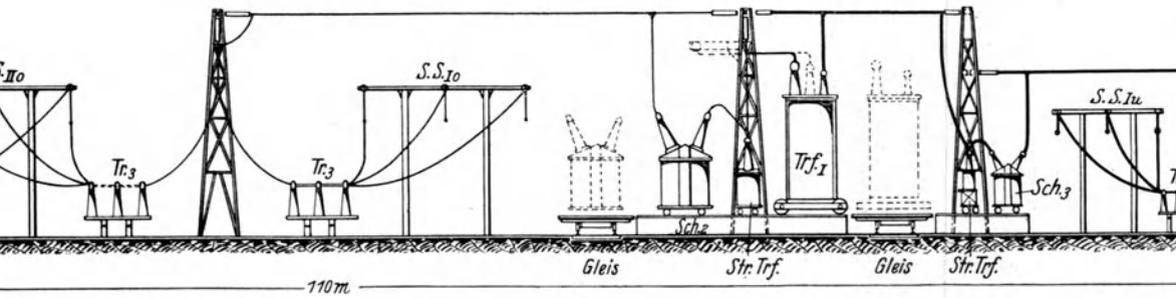


Tafel IV.



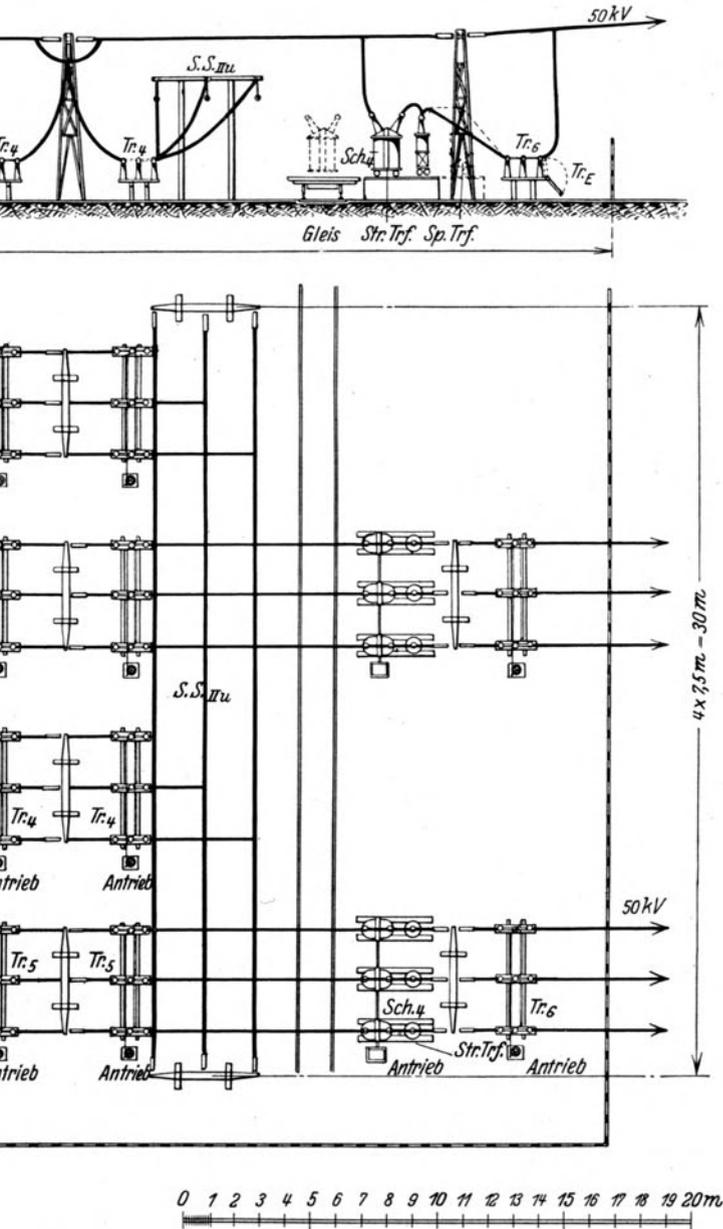


Aufbau von Freiluftanlagen (Beschreibung siehe S. 459).

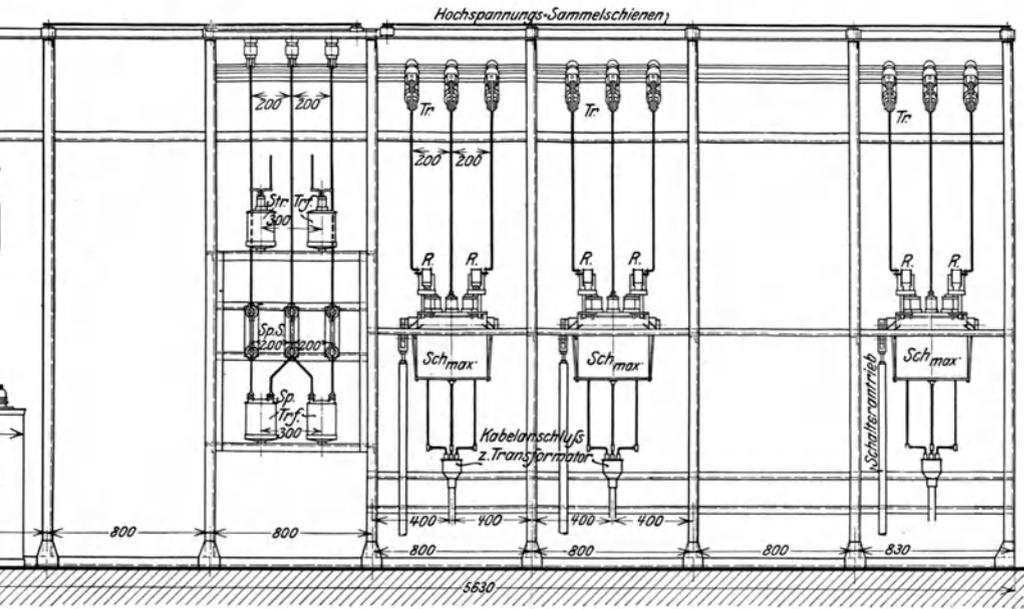


Form C. Freiluftanlage 100/50 kV, Trennschalter zu ebener Erde (Flachbau).

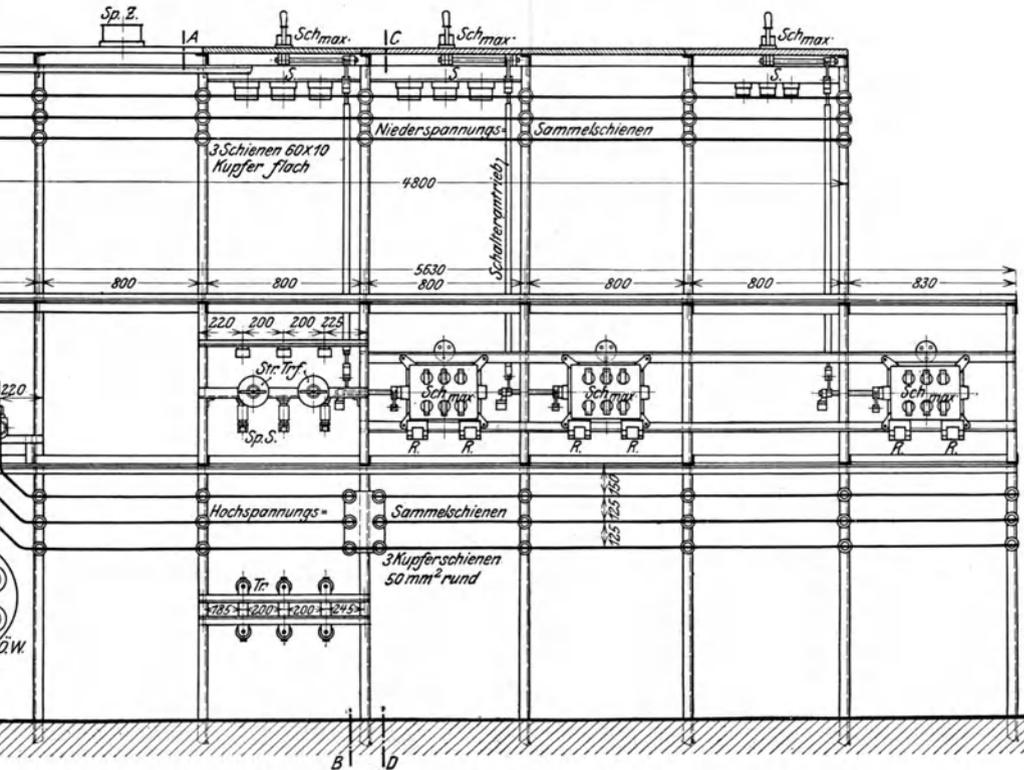
Tafel V.



zum Schaltbild 392, Beschreibung siehe S. 482).

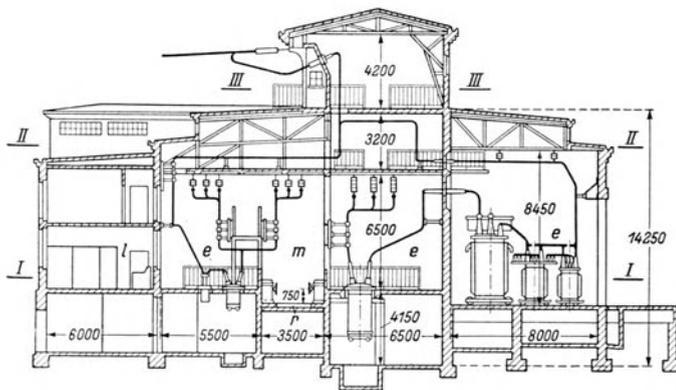


Rückansicht des Hochspannungsgerütes.



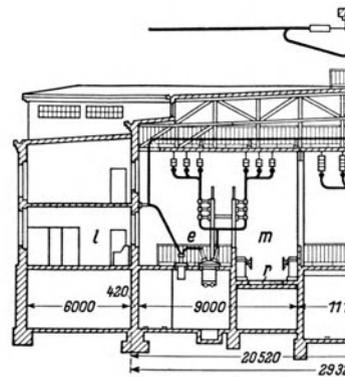
Grundriß.

Vergleich verschiedener Bauformen für das 100-kV-Transformator



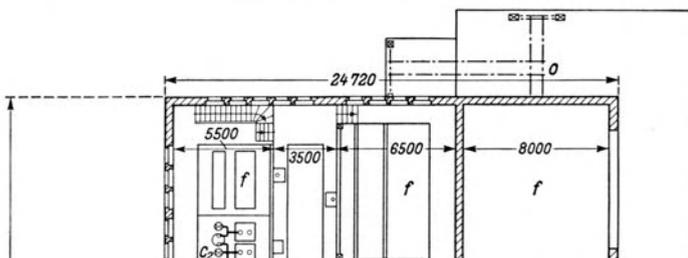
Schnitt V-V

Abb. I a. Räumlicher Aufbau der Schaltanlage (Schnitt).



Schnitt IV-V

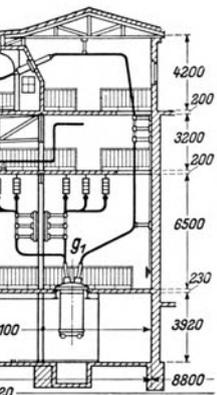
Abb. II. Ausbau mit 100-kV-Dop



- a Überspannungsschutz
- b₁ Freileitung I, A.
- b₂ Freileitung II, A.
- c₁ Freileitung I, S.
- c₂ Freileitung II, S.

Tafel VII.

enwerk im 63. Kapitel. (Beschreibung und Zahlentafel siehe S. 504.)



apselsammelschienen.

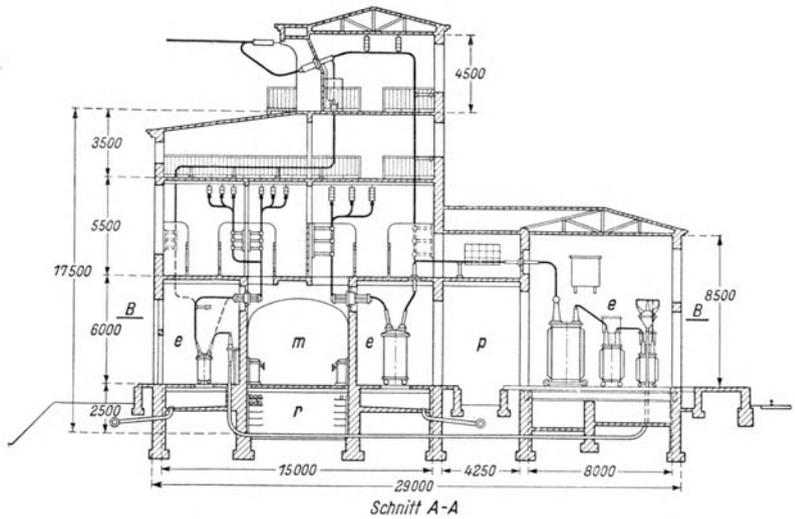
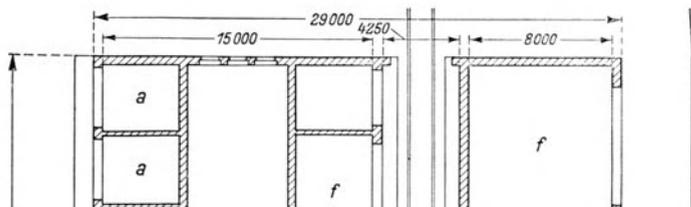
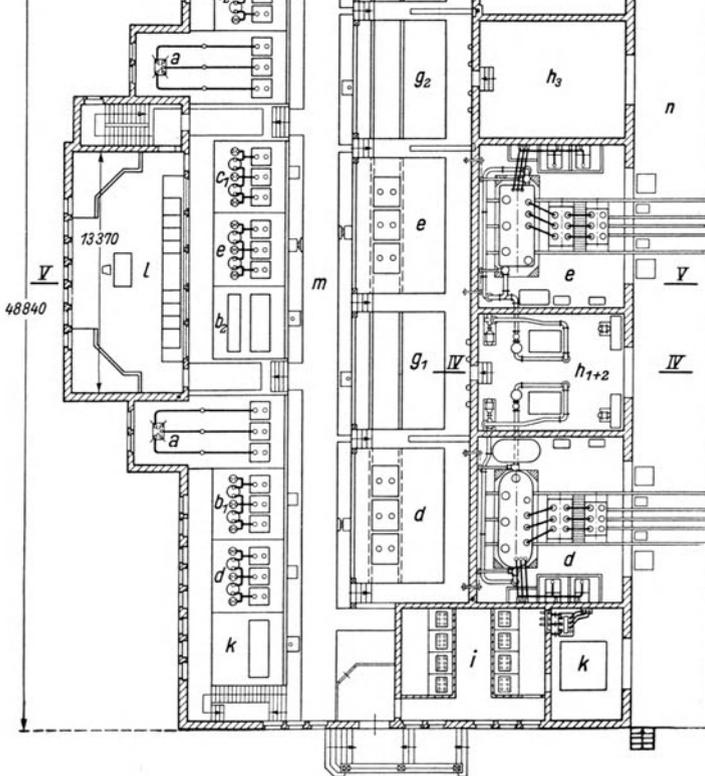


Abb. IIIa. Kammerbau mit 100-kV-Einfachsammelschienen.





- d Transformator I
- e Transformator II
- f Transformator III Re
- g₁ Freileitung I, B.
- g₂ Freileitung II, B.
- h_{1 u. 2} Kühlanlage, Transfor
- h₃ Kühlanlage, Transfor
- i 10-kV-Anlage
- k 10-kV-Transformator
- l Warte
- m Bedienungsgang
- n Rampe
- o Krananlage
- p Transportgleis
- r Kabelkanal
- s Besichtigungsbühne

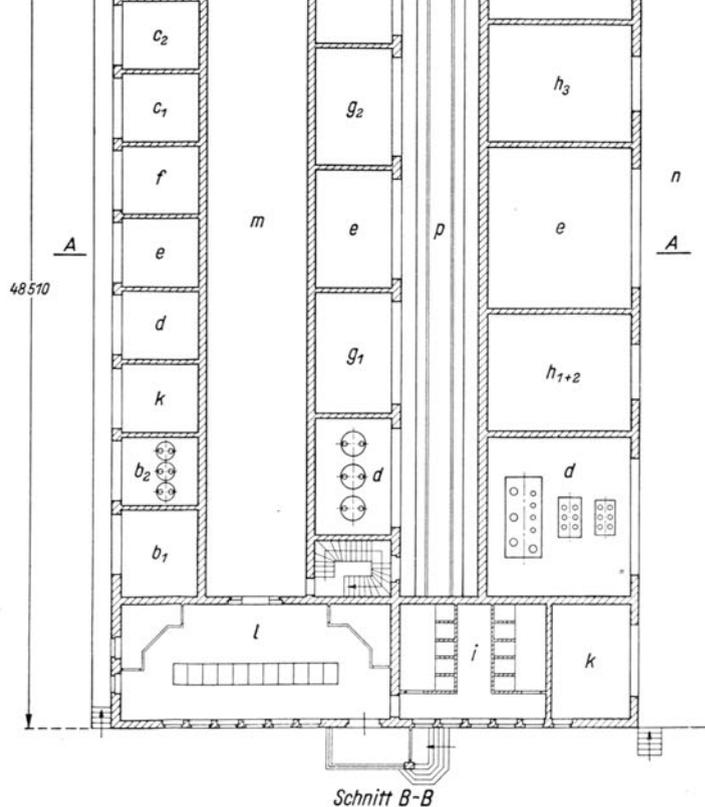
Grundriß I-I

Abb. I b. Räumlicher Aufbau der Schaltanlage (Grundriß).

Kyser, Kraftübertragung. I. 3. Aufl.

serve

motor I und II
motor III Reserve



Schnitt B-B

Abb. IIIb. Kammerbau mit 100-kV-Einfachsammelschienen (Schnitt B).

Verlag von Julius Springer in Berlin.